

Guia de Boas Práticas para a Construção Modular em Madeira

ANDRÉ TEIXEIRA PEDROSO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos
Guimarães Teixeira

Co-orientador: Doutor João Manuel do Paço Quesado Delgado

JUNHO 2023

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

“A dúvida é o princípio da sabedoria”

Aristóteles

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, um agradecimento muito especial à minha mãe, Isabel, à minha irmã, Rita e à minha tia, Cátia, por todo o apoio que sempre me deram. Quero agradecer-vos do fundo do meu coração pelo amor, carinho e motivação, sem vocês nada seria possível.

Um sincero agradecimento à orientadora Professora Ana Sofia Guimarães pelos conselhos e correções dados ao longo deste projeto.

Um muito obrigado ao co-orientador Doutor João Delgado por toda a sua disponibilidade, preocupação, ajuda, interesse e por ter tornado possível o desenvolvimento da presente dissertação.

Um agradecimento especial ao meu coordenador na KOZOWOOD INDUSTRIES S.A., Arquiteto Hélder Rodrigues, que acompanhou de perto todo o processo e compartilhou as dificuldades, incertezas e conquistas. Obrigado pelo tempo despendido, motivação constante e atitude entusiástica de solucionador de problemas. Um agradecimento também ao Engº. Nuno Gomes, da KOZOWOOD INDUSTRIES S.A., pela sua disponibilidade e por todo o conhecimento partilhado.

Agradeço a toda a minha família e amigos que me apoiaram e motivaram ao longo de todo o meu percurso académico.

Por fim, embora não menos importante por se encontrar no final dos agradecimentos, queria agradecer a todos os leitores, que de alguma forma despenderam do seu tempo e mostram preocupação com esta temática.

O trabalho resulta do Projeto de Investigação “BlueWoodenHouse”, com a referência POCI-01-0247-FEDER-047157, co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (ERDF) por meio do Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), no âmbito do acordo de parceria Portugal 2020; e do Projeto de Investigação “BlueHouseSim”, com a referência 2022.06841.PTDC, financiado por fundos nacionais (PIDDAC) através da FCT/MCTES.

RESUMO

Com o aumento crescente do interesse do setor construtivo na procura de práticas mais sustentáveis e eficientes, a construção modular em madeira tem ganho cada vez mais atenção por parte do setor. Este processo construtivo baseado em painéis e/ou módulos padronizados, permite uma série de vantagens como a rapidez de execução, a redução de desperdícios de materiais e a redução dos custos da construção. Para além disto, a madeira é um recurso natural, renovável e reutilizável, permite uma grande flexibilidade de manuseamento, tem custos acessíveis e a capacidade de absorção do carbono.

Atenta à situação ambiental mundial, à escassez de recursos naturais e ao impacto que o sector da construção tem sobre o planeta, a presente dissertação tem como principal objetivo, a exploração de algumas opções de construção modular sustentável em madeira existentes em Portugal, com o fim de desenvolver um pequeno guia de boas práticas que agregue estratégias para esta construção, de forma clara e sucinta, para que esta temática seja mais facilmente abordada e compreendida.

As suas normas portuguesas estão definidas segundo as diretivas europeias, sendo que a evolução da legislação relativa à eficiência energética dos edifícios tem vindo a tornar-se cada vez mais exigente. Atualmente, estas normas exigem que todos os novos edifícios apresentem elevados índices de eficiência energética.

A otimização das soluções passivas é essencial para a redução das necessidades energéticas das habitações, aumentando assim a eficiência energética da habitação e reduzindo a necessidade de soluções ativas. De forma a atingir-se um balanço energético nulo ou praticamente nulo nestas habitações, podem ser adotadas soluções ativas que reduzem a dependência de consumo energético da rede pública, surgindo assim o conceito de habitações *nZEB*.

Nesta dissertação são analisados os elementos passivos e ativos que podem ser integrados em habitações modulares de madeira, de forma a atingir-se elevados índices de eficiência energética com custos otimizados. Neste seguimento, foram analisadas as melhores práticas durante a fase de execução de uma habitação em madeira, assim como do processo de fabrico e transporte. São ainda apresentados os resultados dos ensaios aos materiais utilizados nesta habitação, numa perspetiva de aumentar e garantir a qualidade dos mesmos.

PALAVRAS-CHAVE: Guia de Boas Práticas, Construção em Madeira, Soluções Passivas, Soluções Ativas, Eficiência Energética.

ABSTRACT

With the increasing interest of the construction sector in the search for more sustainable and efficient practices, modular wooden construction has gained more and more attention from the sector. This constructive process based on standardized panels and/or modules, allows for a series of advantages such as speed of execution, reduction of material waste and reduction of construction costs. In addition, wood is a natural, renewable and reusable resource, allowing great handling flexibility, affordable costs and the ability to absorb carbon.

Attentive to the global environmental situation, the scarcity of natural resources and the impact that the construction sector has on the planet, this dissertation has as its main objective the exploration of some options for sustainable modular timber construction existing in Portugal, with the aim of to develop a small guide of good practices that adds strategies for this construction, in a clear and succinct way, so that this theme is more easily approached and understood.

Its Portuguese standards are defined according to European directives, and the evolution of legislation on the energy efficiency of buildings has become increasingly demanding. Currently, these standards require that all new buildings have high levels of energy efficiency.

The optimization of passive solutions is essential for reducing the energy needs of homes, thus increasing the energy efficiency of buildings and reducing the need for active solutions. In order to achieve a zero or practically zero energy balance in these buildings, active solutions can be adopted that reduce dependence on energy consumption from the public network, thus giving rise to the concept of nZEB buildings.

This dissertation analyzes the passive and active elements that can be integrated into modular wooden houses, in order to achieve high levels of energy efficiency with optimized costs. In this regard, the best practices during the execution phase of a wooden house were analysed, as well as the manufacturing and transport process. The test results on the materials used in this building are also presented, with a view to increasing their quality assurance.

KEYWORDS: Good Practices Guide, Timber Construction, Passive Solutions, Active Solutions, Energy Efficiency.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2.....	3
CONSTRUÇÃO MODULAR EM MADEIRA	3
2.1 INTRODUÇÃO.....	3
2.2 CONTEXTO HISTÓRICO	4
2.3 MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	5
2.4 SISTEMAS CONSTRUTIVOS.....	7
2.4.1 Painéis 2D.....	9
2.4.1.1 Sistema Plataforma.....	11
2.4.1.2 Sistema Balão.....	11
2.4.2 Módulos 3D	12
2.4.3 Exemplos destes sistemas construtivos no mercado.....	13
2.5 VANTAGENS DESTES TIPO DE CONSTRUÇÃO	19
2.6 LIMITAÇÕES	21
2.6.1 Limitações Normativas	21
2.6.2 Limitações de Produção.....	22
2.6.3 Limitações de Transporte.....	22
2.6.4 Outras Limitações	23
3.....	25
HABITAÇÕES MODULARES EM MADEIRA nZEB	25
3.1 INTRODUÇÃO.....	25
3.2 DEFINIÇÃO DE UM nZEB.....	25
3.3 PRINCÍPIOS DE UM nZEB.....	26

3.4 LEGISLAÇÃO nZEB	27
3.5 SOLUÇÕES PASSIVAS	29
3.5.1 Orientação espacial	30
3.5.2 Eliminação de pontes térmicas e seleção do isolamento	32
3.5.2.1 Pontes Térmicas	33
3.5.2.2 Seleção do isolamento térmico	35
3.5.3 Estanquidade ao ar	36
3.5.4 Ventilação natural e outros sistemas de arrefecimento passivos	37
3.5.4.1 Ventilação natural	37
3.5.4.2 Arrefecimento através do solo	38
3.5.4.3 Arrefecimento evaporativo	39
3.5.4.4 Arrefecimento radiativo	40
3.5.4.5 Coberturas verdes	40
3.5.5 Vãos envidraçados e outros sistemas de aquecimento passivos	41
3.5.5.1 Vãos envidraçados e sistemas de sombreamento	41
3.5.5.2 Sistemas de aquecimento passivos por ganhos indiretos	42
3.5.5.3 Sistemas de aquecimento passivos por ganhos isolados	44
3.6 SOLUÇÕES ATIVAS	45
3.6.1 Sistemas de produção de energia	45
3.6.1.1 Painéis fotovoltaicos	45
3.6.1.2 Coletores solares térmicos	47
3.6.1.3 Biomassa	49
3.6.2 Sistemas de armazenamento de energia	51
3.6.3 Bombas de calor	53
3.6.4 Piso Radiante	54
3.6.5 Ventilação mecânica controlada (VMC)	54
3.6.5.1 Sistema de fluxo simples	55
3.6.5.2 Sistema de fluxo duplo	56
4	59
CASO DE ESTUDO	59
4.1 HABITAÇÃO UNIFAMILIAR	59
4.2 MATERIAIS UTILIZADOS	61
4.2.1 Parede Exterior	61
4.2.2 Piso	61
4.2.3 Cobertura	62
4.2.4 Pormenores das ligações entre elementos	62
4.3 ENSAIOS AOS MATERIAIS UTILIZADOS	63
4.3.1 OSB	63
4.3.2 Thermowood (32 mm)	65
4.3.3 Wood CL4 (28 mm)	66

4.3.4	Floating floor (7 mm)	66
4.3.5	Lã de Rocha (100 mm) e EPS (30 e 40 mm)	66
4.3.6	Gesso cartonado (32 mm)	67
4.4	OUTROS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	68
4.4.1	Determinação das emissões de formaldeído e COVs.....	68
4.5	RESULTADOS DOS ENSAIOS	71
4.6	CONCLUSÕES	76
5.....	79	
CONCLUSÕES	79	
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5.2	TRABALHOS FUTUROS	80
6.....	81	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81	
ANEXO: Guia de boas práticas para habitações modulares em madeira.....	87	
	<i>Manual ilustrado para se atingir a eficiência energética e a sustentabilidade....</i>	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Construção modular [5].....	4
Figura 2.2 – Exemplos de derivados da madeira [8].....	6
Figura 2.3 – Evolução dos derivados da madeira ao longo dos anos [11]	7
Figura 2.4 – Sistema de painéis 2D vs. Sistema de módulos 3D [4]	8
Figura 2.5 – CLT (Cross Laminated Timber) [13]	9
Figura 2.6 – Sistema ITS (neste caso com isolamento de cortiça) [16].....	10
Figura 2.7 – Murray Grove, em Londres [18]	10
Figura 2.8 – Representação esquemática de uma estrutura em plataforma com 2 pisos [19] ..	11
Figura 2.9 – Estrutura em plataforma vs. Estrutura em balão [19]	12
Figura 2.10 – Acoplagem e Transporte do Módulo [20, 21].....	12
Figura 2.11 – Cuidados necessários durante a acoplagem [5].....	13
Figura 2.12 – Diferentes categorias do sistema construtivo [22]	14
Figura 2.13 – Habitações da tribo Toda [23]	14
Figura 2.14 – Tamanhos do modelo A [22]	15
Figura 2.15 – Centro de estágios [22]	15
Figura 2.16 – Modelo A Zero [22].....	16
Figura 2.17 – Modelos B XP1 e B XP2	17
Figura 2.18– Personalização dos materiais e soluções do modelo B [22]	17
Figura 2.19 – Isolamento de Lã mineral (à esquerda) e de Celulose (à direita) [24, 25].....	18
Figura 2.20 – “Lunawood” e Criptoméria dos Açores [26, 27]	19
Figura 2.21 – Outras opções de revestimento exterior [22]	19
Figura 2.22 – Síntese das vantagens da construção modular em madeira	20

Figura 2.23 – Limitações normativas para as construções em madeira, vigentes em Portugal.	22
Figura 2.24 – Dimensões do camião lona padrão para transporte de painéis [7]	23
Figura 3.1 – Balanço Energético de um <i>nZEB</i> [41].....	26
Figura 3.2 – Elementos passivos [40]	30
Figura 3.3 – Incidência solar ao longo do ano [49]	31
Figura 3.4 – Influência da topografia e do edificado pré-existente na incidência solar [50]	31
Figura 3.5 – Intensidade e orientação dos ventos locais [50]	32
Figura 3.6 – Isolamento térmico em todos os elementos da envolvente [52].....	33
Figura 3.7 – Pontes térmicas tridimensionais derivadas de duas ou mais pontes térmicas lineares [51].....	34
Figura 3.8 – Ponte térmica pontual derivada da interseção de três elementos da envolvente (duas paredes e um pavimento) [51].....	34
Figura 3.9 – Blower Door Test	37
Figura 3.10 – Tipos de ventilação natural	38
Figura 3.11 – Arrefecimento através do solo - método indireto	39
Figura 3.12 – Arrefecimento evaporativo através de espelhos de água	39
Figura 3.13 – Constituição da cobertura verde	40
Figura 3.14 – Sistema de aquecimento passivo de ganho direto	41
Figura 3.15 – Sistemas de sombreamento: pala mista contínua [A], lamelado vertical [B], estore exterior [C] e barreira vegetal de folha caduca (à direita)	42
Figura 3.16 – Funcionamento da parede de Trombe durante as várias estações e exemplo de parede de Trombe com parede em pedra	43
Figura 3.17 – Sistema de aquecimento por ganhos isolados (em cima) e exemplo de habitação com estufa incorporada (em baixo).....	44
Figura 3.18 – Funcionamento dos coletores de ar durante as estações de Inverno e Verão	44
Figura 3.19 – Sistema fotovoltaico	46

Figura 3.20 – Incidência da radiação solar nas fachadas verticais e coberturas inclinadas: início de manhã e final de tarde (a) e meio-dia (b)	46
Figura 3.21 – Constituição da claraboia fotovoltaica	47
Figura 3.22 – Sistema de termossifão	48
Figura 3.23 – Sistema de circulação forçada	48
Figura 3.24 – Sistema de termossifão vs. Sistema de circulação forçada	49
Figura 3.25 – Lascas de madeira (A), <i>pellets</i> de madeira (B), lascas de madeira torrificadas (C) e <i>pellets</i> de madeira torrificados (D)	51
Figura 3.26 – Funcionamento das baterias de vanádio	52
Figura 3.27 – Funcionamento do ciclo de compressão de vapor	53
Figura 3.28 – Funcionamento do piso radiante (em cima) e configurações mais comuns: serpentina (A), espiral em contracorrente (B) e espiral modular (C)	54
Figura 3.29 – Ventilação Mecânica Controlada (VMC)	55
Figura 3.30 – Sistema de fluxo simples	56
Figura 3.31 – Sistema de fluxo duplo	57
 Figura 4.1 – Variações da temperatura média e pluviosidade média ao longo do ano, em Fão [73]	 59
Figura 4.2 – Esquema 3D da Casa Protótipo, estruturas em construção em estaleiro e obras no terreno	60
Figura 4.3 – (a) Composição da parede (sistema A) e (b) composição da parede (sistema B) ..	61
Figura 4.4 – Composição do pavimento	62
Figura 4.5 – Composição da cobertura	62
Figura 4.6 – Pormenor da ligação entre a parede e o pavimento	63
Figura 4.7 – Pormenor da ligação entre a parede e a cobertura	63
Figura 4.8 – Ensaio de determinação da resistência à tração perpendicular às faces da placa ..	64
Figura 4.9 – Ensaio de determinação do inchamento em espessura após imersão em água ...	64

Figura 4.10 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade em flexão e da resistência à flexão	64
Figura 4.11 – Ensaio de flexão a 3 pontos de Thermowood®	65
Figura 4.12 – Princípio do ensaio de compressão ou tração perpendicular ao fio	65
Figura 4.13 – Exemplo de provete para determinação da retração	66
Figura 4.14 – Materiais de isolamento: Rockwool e EPS	66
Figura 4.15 – Equipamento para determinação da condutividade térmica onde foi colocada uma amostra de OSB	67
Figura 4.16 – ABES (Automated Bonding Evaluation System)	68
Figura 4.17 – Princípio de funcionamento do ABES (Automated Bonding Evaluation System)	68
Figura 4.18 – Perforadores utilizados para a determinação do teor de formaldeído	70
Figura 4.19 – Câmaras e frascos de recolha utilizados no método da análise do gás	70
Figura 4.20 – Câmara de emissão de formaldeído e tubos de tenax para recolha dos gases ..	71
Figura 4.21 – Amostras de materiais de construção para aplicação no interior/exterior; esquerda – OSB, direita – Pavimento flutuante	72
Figura 4.22 – Amostra de Thermowood, madeira modificada submetida a ensaio	72
Figura 4.23 – Resultados de condutividade térmica de placas de poliestireno	75
Figura 4.24 – Resultados de condutividade térmica de placas de lã de rocha	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Árvores Resinosas vs. Árvores Folhosas [8]	5
Tabela 2.2 – Níveis de modularidade [12]	8
Tabela 2.3 – Características técnicas do modelo A [22].....	15
Tabela 2.4 – Características técnicas do modelo A Zero [22]	16
Tabela 2.5 – Características técnicas do modelo B [22].....	18
Tabela 3.1 – Os 4 Princípios de um <i>nZEB</i> [40].....	27
Tabela 3.2 – Exigências para edifícios de habitação <i>nZEB</i> em Portugal	28
Tabela 3.3 – Exigências para edifícios de comércio e serviços <i>nZEB</i> em Portugal.....	29
Tabela 3.4 – Consumos energéticos segundo três orientações diferentes [41]	31
Tabela 3.5 – Fatores que influenciam o desempenho térmico do isolamento	35
Tabela 3.6 – Condutividade térmica de alguns materiais	36
Tabela 3.7 – Propriedades dos combustíveis: lascas de madeira, <i>pellets</i> de madeira, biomassa torrificada, <i>pellets</i> de biomassa torrificada (TPBs) e carvão betuminoso	50
Tabela 3.8 – Principais indicadores das soluções de baterias mais frequentes no mercado	52
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas de diferentes materiais de construção para aplicação interior/exterior.....	72
Tabela 4.2 – Resistência à flexão do OSB na direção longitudinal e transversal em relação à orientação do fio nas partículas	73
Tabela 4.3 – Determinação do TF - Método da análise de gás (EN ISO 12460-3).....	73
Tabela 4.4 – Determinação do TF - Método do perforador (EN ISO 12460-5)	73

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

nZEB	<i>Net Zero Energy Building</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
ITS	<i>Insulated Timber System</i>
ONU	Organização da Nações Unidas
PHI	<i>Passive House Institute</i>
BDT	<i>Blower Door Test</i>
VMC	Ventilação Mecânica Controlada
°C	Graus Celsius
Pa	Pascal
W	Watt
m	Metro
K	Kelvin

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

Desde meados do séc. XIX, que o Homem tem desempenhado um papel crucial na emissão de gases de efeito de estufa para a atmosfera, principalmente dióxido de carbono (CO₂), o que tem vindo a provocar um aumento gradual da temperatura no planeta. Atualmente, o aumento da temperatura média global, as alterações nos padrões de precipitação e o aumento de eventos climáticos extremos estão a afetar cada vez, tanto as nossas vidas como os vários ecossistemas. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a concentração de gases de efeito de estufa estão em níveis sem precedentes em pelo menos 800 mil anos, e as temperaturas médias globais já aumentaram em quase 1,1°C em relação aos níveis pré-industriais [1].

Estas mudanças conduziram a um aumento da consciencialização sobre a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito de estufa e adotar práticas mais sustentáveis em todos os setores, incluindo a construção civil. De acordo com a Agência Internacional de Energia, a construção é responsável por cerca de 40% das emissões globais de CO₂, concluindo-se então, que a construção tem um papel preponderante a desempenhar na luta contra as alterações climáticas [2].

Neste contexto, a construção modular em madeira tem ganho bastante destaque, por ser uma forma de construção mais sustentável e eficiente. A madeira é um recurso natural e renovável, com baixa emissão de carbono e que pode ser produzido de forma controlada e responsável. Além disso, a construção modular oferece várias vantagens comparativamente à construção tradicional, incluindo a redução do tempo/custo da construção, maior eficiência energética e grande flexibilidade da arquitetura [3].

Existe assim, grande interesse na análise das melhores práticas na construção modular em madeira, tendo em consideração as questões de sustentabilidade e as alterações climáticas. Irão ser apresentadas técnicas de sucesso e desafios associados a este tipo de construção, além de recomendações para a sua utilização sustentável.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Com o aumento crescente do interesse do setor construtivo na procura de práticas mais sustentáveis e eficientes, a construção modular em madeira tem ganho cada vez mais atenção por parte do setor. Este processo construtivo baseado em painéis e/ou módulos padronizados, permite uma série de vantagens como a rapidez de execução, a redução de desperdícios de materiais e a redução dos custos da construção. Para além disto, a madeira é um recurso natural, renovável e reutilizável, permite uma grande flexibilidade de manuseamento, tem custos acessíveis e a capacidade de absorção do carbono.

Os objetivos desta dissertação são:

- Efetuar uma pesquisa bibliográfica exaustiva sobre as melhores práticas de construção de habitações modulares em madeira
- Analisar os elementos passivos e ativos que asseguram a construção de habitações modulares em madeira *nZEB* com custos otimizados
- Elaborar um manual de boas práticas para este tipo de construção de habitações

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

De forma a atingir os objetivos propostos, a dissertação está organizada em três capítulos.

O primeiro capítulo aborda a madeira como material de construção sustentável e os sistemas construtivos associados, sendo apresentados exemplos destes presentes no mercado. Aborda também a evolução da construção modular em madeira, assim como as suas vantagens e limitações.

No segundo capítulo são apresentados a definição e os princípios de um edifício *Net Zero Energy Building*, assim como a legislação associada (europeia e portuguesa). Como seguimento, apresentam-se as que foram consideradas as melhores soluções passivas e as ativas. A distinção entre estratégias ativas e passivas é essencial para se entender a aplicação do conceito *nZEB*. Como soluções passivas são apresentadas a orientação espacial, a importância do isolamento térmico, a estanquidade ao ar, a ventilação natural e outros sistemas de arrefecimento passivos e ainda, os sistemas de aquecimento passivos. Nas soluções ativas são apresentados os sistemas de produção e armazenamento de energia elétrica e os sistemas de climatização e aquecimento de águas sanitárias.

No terceiro capítulo foi efetuado um acompanhamento da execução de uma casa protótipo, onde foram analisadas as melhores práticas associadas à construção modular em madeira *nZEB*. Apresenta-se inicialmente uma descrição da habitação, do local de implantação e dos materiais e soluções utilizados. Apresenta-se de seguida os ensaios realizados aos materiais utilizados na casa protótipo e os seus resultados. É ainda apresentada uma conclusão sobre a utilidade e importância da realização destes ensaios.

2

CONSTRUÇÃO MODULAR EM MADEIRA

2.1 INTRODUÇÃO

A construção modular e a construção pré-fabricada, apesar de apresentarem várias semelhanças, são dois tipos de construção distintos. Na construção pré-fabricada, apesar dos elementos serem produzidos em fábrica sob ambiente controlado, estão previstos trabalhos em obra semelhantes a trabalhos característicos da construção convencional [4].

De acordo com o Modular Building Institute (MBI), a construção modular é “um processo no qual um edifício é constituído fora do local de construção, sob condições controladas” [4]. Este tipo de construção é caracterizado por etapas e processos padronizados, tendo em vista a adaptabilidade do módulo para vários tipos de soluções diferentes. Esta é uma das várias vantagens apresentadas pela construção modular que é também caracterizada pela sua facilidade e velocidade de construção, após preparação dos módulos e o seu transporte para o local da obra, basta unir os vários módulos, daí a sua típica associação à construção de um lego. Assim, conclui-se rapidamente, que a redução de desperdício material e a rapidez de construção são outras das muitas vantagens associadas [5].

Face às claras e preocupantes alterações climáticas verificadas nas últimas décadas, o Homem foi obrigado a redefinir os seus padrões de consumo de matérias-primas nos vários setores. Assim, na Construção Civil, a madeira ganhou um novo estatuto perante os tradicionais betão e aço. Neste setor, a madeira tem sido alvo de grande procura devido ao seu bom desempenho e às suas características como material natural, renovável e reutilizável, contribuindo assim para a procura da utilização de materiais cada vez mais sustentáveis. A industrialização dos processos construtivos tem sido um tema cada vez mais atual na procura de uma resposta cada vez mais eficaz às problemáticas associadas ao crescimento demográfico e à crescente procura habitacional, sendo que a construção modular em madeira preenche ambos os requisitos permitindo uma alta variedade de vantagens associadas (Figura 2.1).

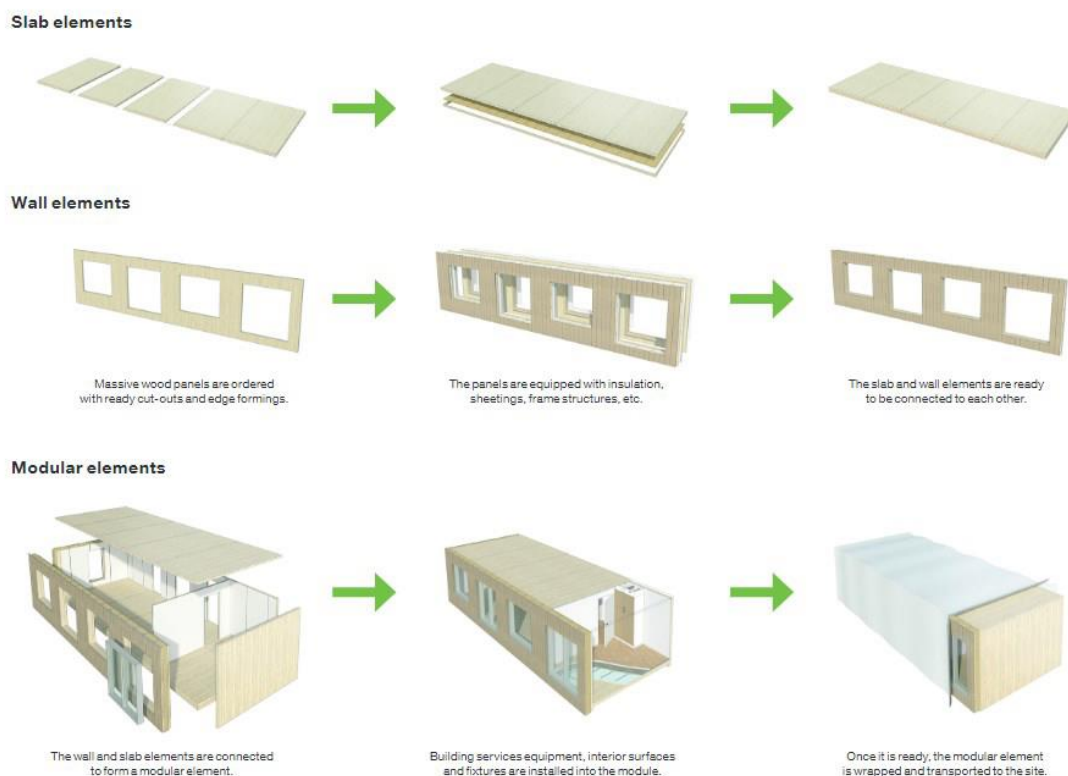


Figura 2.1 – Construção modular [6]

2.2 CONTEXTO HISTÓRICO

A construção modular foi criada, em 1837, por Henry Manning, um carpinteiro que trabalhava em Londres e que tinha como objetivo ajudar o seu filho, que iria emigrar para a Austrália. Assim, Henry projetou e construiu a primeira habitação modular e, após o transporte das várias peças, estas foram unidas pelo seu filho, erguendo assim a primeira habitação modular. O seu design inovador captou a atenção dos locais devido à sua rapidez de montagem e à facilidade em mover [7].

Na Califórnia, entre 1848 e 1855, a construção modular em madeira foi o método construtivo adotado devido à grande procura provocada pela emigração de mais de 300.000 pessoas derivada da corrida ao ouro. A adoção deste sistema deveu-se às vantagens associadas e ao sucesso do mesmo verificado na Austrália [7].

Em 1854, este tipo de construção apareceu também na Crimeia, quando Isambard Kingdom Brunel foi contratado para construir um hospital modular em madeira em Scutari. O projeto e a sua execução levaram apenas 5 meses, demonstrando assim a rapidez de montagem da construção modular em madeira [7].

Após o término da Segunda Guerra Mundial, no Reino Unido, face à necessidade urgente de reerguer o que havia sido destruído, adotou-se a construção modular em madeira como solução também devido à sua eficiência e rapidez de montagem [7].

Nos dias que correm, a construção modular em madeira já não é vista como um tipo de construção de baixo custo e de fraca qualidade, e adquiriu uma nova importância, bem como, uma grande procura com o aumento das preocupações e responsabilidades do Homem para com o ambiente. Assim, é possível concluir que foi a necessidade/procura de soluções mais sustentáveis que ditou a ascensão da construção modular em madeira, não só devido ao sucesso e às vantagens provenientes da construção modular, mas também devido à utilização da madeira como material de construção.

2.3 MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Desde os primórdios da história da Humanidade que a madeira é utilizada na construção de refúgios que serviam de proteção contra os animais selvagens e contra o meio ambiente envolvente. Com o tempo, a madeira foi gradualmente substituída por outros materiais como o aço e o betão armado. No entanto, a utilização da madeira tem ganho um novo destaque na construção pré-fabricada e na construção modular, não só devido ao seu bom desempenho como material construtivo, mas também devido à sua versatilidade e resposta positiva às problemáticas ambientais [3].

A madeira pode ser classificada como madeira macia ou madeira dura, dependendo da sua origem. As árvores podem também ser classificadas segundo duas categorias: árvores resinosas (ou coníferas) e árvores folhosas (ou caducas), sendo a madeira resultante destas é a madeira macia e a madeira dura, respetivamente [8]. Através da Tabela 2.1, representada abaixo, é possível verificar as principais diferenças entre as árvores resinosas e as folhosas:

Tabela 2.1 – Árvores Resinosas vs. Árvores Folhosas [8]

	Resinosas	Folhosas
Folhas	Normalmente, com folhas persistente e estreitas de pontas aguçadas.	Folhas persistentes ou caducas. Normalmente, folhas planas com uma rede fina de nervuras.
Flores	Sem pétalas.	Com pétalas, por norma.
Frutos	Geralmente um cone, muitas vezes com escamas lenhosas.	Grande variedade de forma, de textura e de cor.
Ambientes	Aceitam ambientes hostis.	Preferem ambientes menos hostis.
Exemplos	Pinheiro, Abeto, Cedro.	Carvalho, Nogueira, Cerejeira, Eucalipto.

Estes dois tipos de madeira possuem diferenças em relação às suas propriedades mecânicas, às possíveis aplicações e preços associados. Por norma, a madeira dura é mais cara devido às maiores dificuldades no corte e no processamento, comparativamente com a madeira macia. Desta forma, sendo a madeira macia mais acessível, esta é utilizada para produzir as armações e elementos que

não exigem tanta resistência e durabilidade, ao contrário da madeira dura, que costuma ser aplicada em carpintaria, caixilharias, pavimentos e acabamentos. Estas aplicações são definidas pelas características mecânicas associadas à madeira, sendo que a madeira dura é mais densa e resistente que a madeira macia, apresentando uma maior durabilidade. Assim, as propriedades mecânicas vão sempre depender dos seguintes fatores [8, 9]:

- Espécie botânica da madeira;
- Massa específica aparente;
- Posição relativa no lenho;
- Possíveis defeitos na peça;
- Humidade.

Apesar da clara predominância do betão e do aço na construção, a madeira é um material muito utilizado neste setor devido ao seu bom desempenho, facilidade de manuseamento e carácter ecológico, sendo que a sua procura tem vindo a aumentar gradualmente. A madeira é um recurso natural, renovável, biodegradável e, quando gerido adequadamente, é sustentável. Apresenta elevada resistência mecânica, baixa densidade, é facilmente trabalhável, tem alta capacidade de manutenção e, consequentemente, grande durabilidade. Além destas características, a madeira apresenta também propriedades de isolamento térmico e de isolamento acústico (baixa condutividade térmica e boa absorção acústica), o que a tornam num material bastante eficiente na construção de edifícios sustentáveis [10].

A madeira pode ser empregada na construção sob a forma de madeira maciça e sob a forma de derivados da madeira, estes últimos de forma a colmatar as limitações naturais da madeira maciça e resultantes também da procura de soluções para fins mais específicos e exigentes, como por exemplo a aumento da resistência mecânica à tração. Estes derivados da madeira são compostos por lamelas, folhas, fibras, rebarbas, lascas e aparas de madeira, que são unidos com ligantes normalmente orgânicos, existindo, no entanto, produtos que utilizam ligantes inorgânicos como o gesso e o cimento. Existem vários tipos de derivados de madeira como por exemplo os contraplacados, as placas de aglomerados de partículas (como é o caso do OSB – “Oriented Strand Board”), as placas de aglomerados de fibras, os painéis madeira folheada-colada (LVL), entre outros (Figura 2.2) [9, 11].



Figura 2.2 – Exemplos de derivados da madeira [8]

Nas últimas décadas, o interesse geral e a investigação à volta destes derivados têm vindo a aumentar e, consequentemente, têm aparecido no mercado cada vez mais variedade destes derivados, sendo esta uma tendência que deverá manter-se no futuro (Figura 2.3).

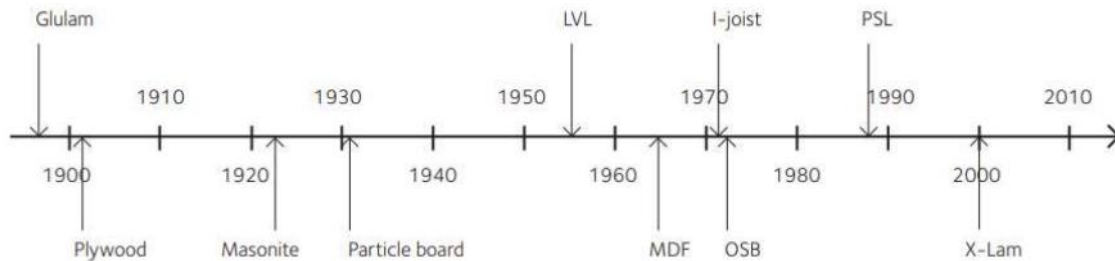


Figura 2.3 – Evolução dos derivados da madeira ao longo dos anos [11]

Estes derivados da madeira apresentam uma elevada resistência mecânica e grande estabilidade dimensional como consequência da homogeneização da madeira, eliminando os defeitos. Apresentam também uma resistência ao fogo normalmente superior à apresentada pela madeira maciça, e muitos destes derivados são produzidos a partir de madeira de reflorestamento, o que os torna uma solução sustentável [10].

Apresentam também outra grande vantagem, a versatilidade, ou seja, podem ser produzidos em diferentes tamanhos e formas, permitindo a sua aplicação numa ampla variedade de produtos, sendo principalmente utilizados em fábrica na produção de painéis (que podem ser usados como paredes, lajes e coberturas) e de módulos completos, permitindo uma rápida montagem no local da obra [3].

2.4 SISTEMAS CONSTRUTIVOS

São vários os níveis de modularidade que podem ser assumidos na construção (Tabela 2.2). A construção tradicional apresenta o nível de modularidade mais baixo possível, na qual toda a produção é realizada no local de construção. Por outro lado, a construção modular apresenta outro tipo de soluções, as quais limitam a quantidade de trabalhos a realizar no local de construção.

Existem dois tipos de sistemas na construção modular em madeira: sistema de painéis de duas dimensões (2D) e sistema de módulos de três dimensões (3D). A seleção do sistema a aplicar é sempre determinada pelo projeto a executar [5].

O sistema a duas dimensões torna possível uma grande flexibilidade na arquitetura do projeto, bem como uma simplificação de toda a logística inerente. Utiliza painéis de duas dimensões (2D) que são produzidos em fábrica, sob ambiente controlado, e após transporte para o local, são acoplados entre si. Já o sistema formado por módulos de três dimensões (3D), está associado à produção em série, permitindo uma padronização das operações a executar, e assim, uma redução nos custos da execução do projeto (Figura 2.4). Neste caso, os módulos são produzidos em fábrica, e já no local de execução, apenas é necessária a acoplação dos módulos entre si [12].

Tabela 2.2 – Níveis de modularidade [12]

Nível de Modularidade	Tipo	Definição
Elevado	Completa	Elementos-caixa, volumes, edifício completo entregue no local do destino.
	Modular	Elementos estruturais, potencialmente preparados, enviados e montados no local de construção.
	“Pods”	Estrutura pré-montada. Unidades completamente montadas que são ligadas a uma estrutura criada no local de construção.
	Painéis	Elementos estruturais não volumétricos que podem ser utilizados para criação de espaços. Exemplo – SIP’s (Structured Insulated Panels) e painéis de cimento pré-fabricados.
	Estruturas pré-montadas	Componentes pré-fabricados que não podem ser feitos no local de construção. Exemplo – portas.
Baixo	Materiais	Materiais de construção normalizados, utilizados no local de construção.

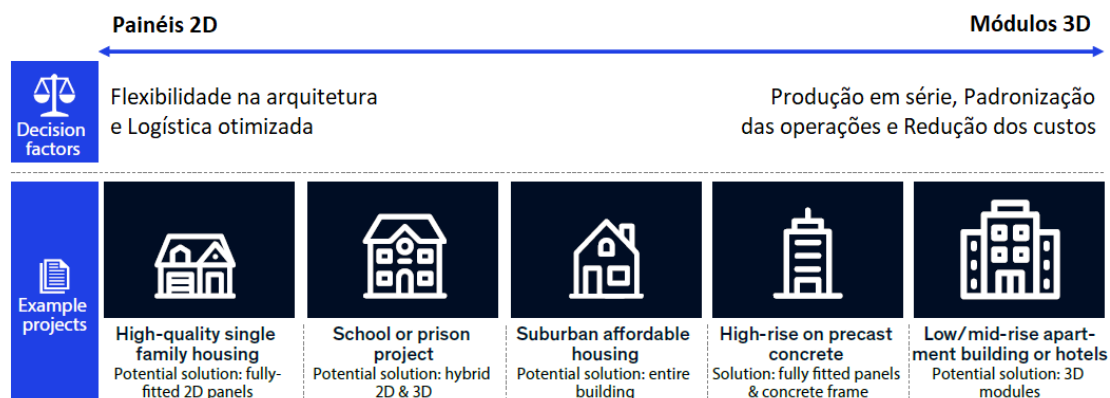


Figura 2.4 – Sistema de painéis 2D vs. Sistema de módulos 3D [5]

Existe também um sistema híbrido, que combina módulos 3D com painéis 2D, promovendo vantagens de ambos, a produtividade dos módulos com a flexibilidade e fácil transporte dos painéis. É frequente a conjugação de módulos tridimensionais de compartimentos de serviço, por norma as áreas sujeitas a humidade, com a restante estrutura do edifício [5].

2.4.1 Painéis 2D

Os painéis 2D são um sistema construtivo centrado nos painéis pré-fabricados de duas dimensões, geralmente constituídos por madeira maciça ou por derivados da madeira como é o caso da madeira lamelada cruzada, “Cross Laminated Timber” – CLT (Figura 2.5). Estes painéis após fabricados, são transportados para o local de construção, onde mais tarde são acoplados formando a estrutura do edifício. Comparativamente com os módulos 3D, o transporte dos painéis tem uma logística mais simples assim como custos mais reduzidos [3].

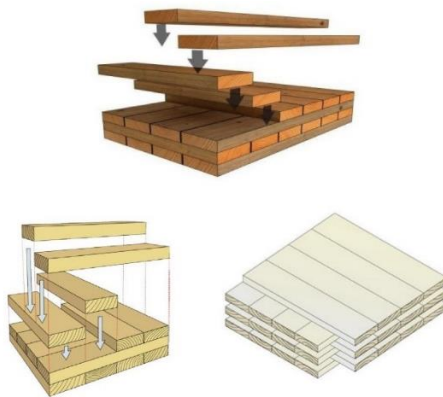


Figura 2.5 – CLT (Cross Laminated Timber) [13]

São vários os motivos pelos quais os painéis 2D são cada vez mais utilizados como sistema construtivo. Estes possibilitam uma construção mais rápida e eficiente, reduzindo significativamente o tempo de construção e, por consequência, os custos. Além disto, os painéis são produzidos em fábrica com alta precisão e controlo, o que garante que as dimensões e encaixes estejam em perfeita harmonia, resultando numa construção de alta qualidade e na redução dos desperdícios de materiais [3]. Este sistema construtivo é considerado ecologicamente correto e sustentável, além de possibilitar um melhor controlo das propriedades térmicas e acústicas [14].

O sistema ITS (Insulated Timber System) consiste na aplicação de painéis de madeira lamelada colada, com isolamento térmico incorporado, de forma a minimizar as transferências de calor entre o exterior e o interior do edifício (Figura 2.6). Isto é possível através da incorporação de um isolante térmico de alta qualidade, reduzindo significativamente a quantidade de energia necessária para aquecer ou arrefecer o espaço interior [15, 16].

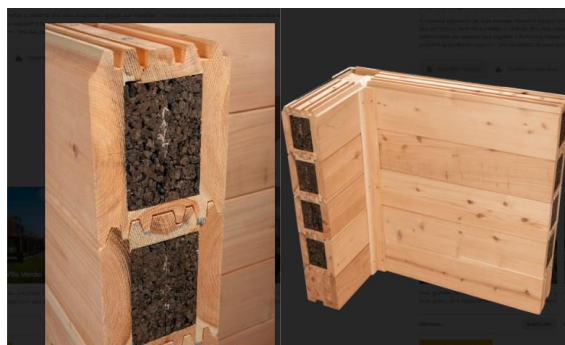


Figura 2.6 – Sistema ITS (neste caso com isolamento de cortiça) [16]

Um exemplo de construção modular em madeira com painéis 2D (sistema ITS) é o edifício residencial Murray Grove, em Londres, que tem 8 andares de estrutura de madeira (Figura 2.7), foi construído em 2009 e apresenta um design moderno e sustentável. O edifício Murray Grove é um caso notável de sucesso, demonstrando que a construção modular em madeira com painéis de duas dimensões pode ser utilizada em projetos de grande escala [17].



Figura 2.7 – Murray Grove, em Londres [18]

O sistema construtivo para edifícios de madeira mais popular é em painéis, muito devido à sua versatilidade tanto na construção como no seu transporte. Os edifícios que utilizam este método construtivo podem ser erguidos segundo dois sistemas: sistema plataforma e sistema balão [19].

2.4.1.1 Sistema Plataforma

O Sistema Plataforma é uma abordagem da construção modular em madeira que utiliza painéis pré-fabricados para a criação de elementos estruturais e sistemas construtivos (Figura 2.8). A plataforma é composta por painéis que são dispostos horizontalmente sobre as fundações e servem como suporte para as paredes e pisos superiores. Os painéis verticais são fixos à plataforma, que funciona como uma base horizontal para a montagem dos elementos modulares [19].

A plataforma deve estar elevada em relação ao solo, permitindo a passagem de instalações elétricas, hidráulicas, entre outras [19].

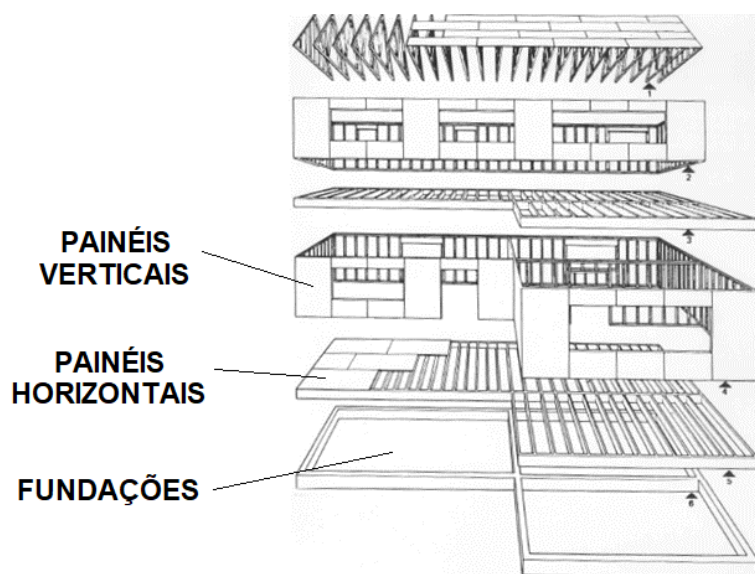


Figura 2.8 – Representação esquemática de uma estrutura em plataforma com 2 pisos [19]

2.4.1.2 Sistema Balão

O Sistema Balão é caracterizado pela utilização de painéis verticais contínuos que proporcionam estabilidade estrutural ao edifício. Estes painéis, geralmente de madeira maciça ou madeira lamelada colada, são fixos diretamente ao solo e à cobertura, e os elementos de pisos intermédios têm suas bordas presas lateralmente ao interior dos painéis verticais (paredes) [19].

Este método possibilita que o isolamento e a camada de controle de vapor sejam contínuos ao longo da parede, aumentando a eficiência energética do edifício (Figura 2.9).

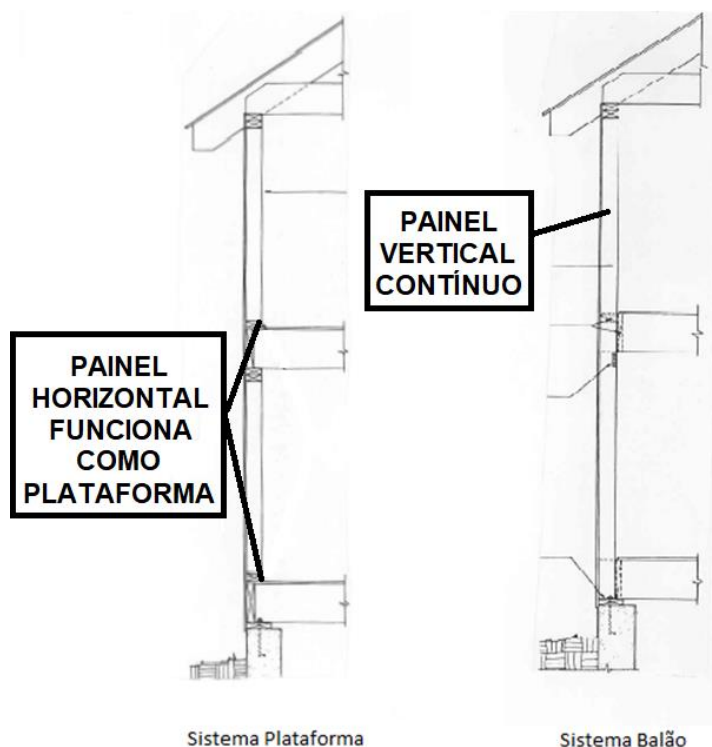


Figura 2.9 – Estrutura em plataforma vs. Estrutura em balão [19]

2.4.2 Módulos 3D

Conforme referido, este método construtivo é normalmente utilizado em edifícios padronizados, como hotéis, escolas, escritórios, entre outros. Os módulos são produzidos em fábrica, sob ambiente controlado, e transportados para o local de implantação. Os módulos incluem, geralmente, todos os acabamentos interiores e exteriores e estão já totalmente equipados e com todos os sistemas integrados, formando um elemento contínuo após a sua união (Figura 2.10). A partir do momento em que estejam no local da construção, ao contrário dos painéis, apenas será necessário acoplar os módulos entre si, maximizando a redução do tempo de construção pretendida [3, 10].



Figura 2.10 – Acoplagem e Transporte do Módulo [20, 21]

São necessários alguns cuidados com os módulos, especialmente durante o transporte e após colocação no local da construção (antes de serem acoplados). Após a sua produção em fábrica, os módulos devem ser protegidos com plástico. Ainda antes do seu transporte, é necessária uma verificação do percurso a utilizar, confirmando a acessibilidade do módulo ao local de construção. Efetuada a verificação do percurso, para o transporte do módulo, este terá de estar fixo ao reboque, de forma a evitar movimentos e danos do módulo. Para a acoplagem dos módulos existem também alguns cuidados necessários, como cobrir temporariamente os módulos enquanto a obra não está concluída, pois apenas os módulos superiores contêm telhado (Figura 2.11). É necessário também que estas coberturas temporárias possam escoar a água da chuva, protegendo o módulo [6].

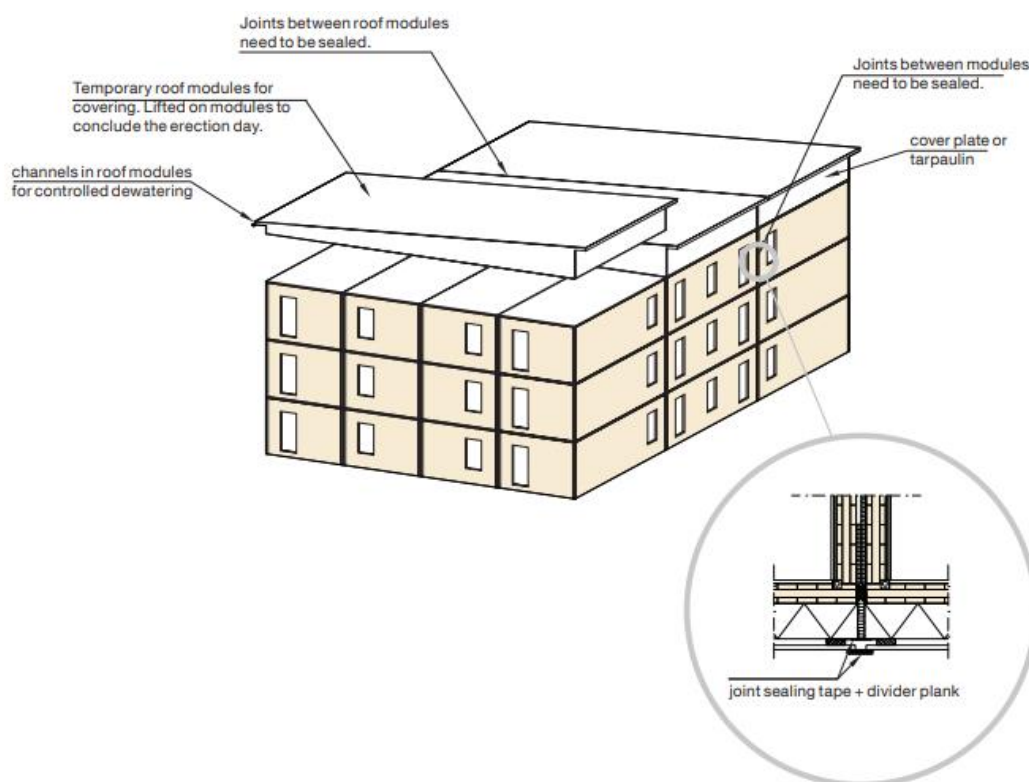


Figura 2.11 – Cuidados necessários durante a acoplagem [6]

2.4.3 Exemplos destes sistemas construtivos no mercado

Um exemplo atual é o de uma empresa portuguesa que desenvolveu um sistema construtivo que consiste em estruturas de madeira pré-fabricadas e modulares, que oferece uma arquitetura e perspetiva contemporânea, de baixa pegada ecológica e de alta eficiência energética. Este sistema está dividido em 4 categorias, sendo que dois deles, os sistemas A e B, centram-se no conceito modular, enquanto os sistemas C e D já apresentam um nível de modularidade mais baixo e semelhante ao conceito da pré-fabricação (Figura 2.12).



Figura 2.12 – Diferentes categorias do sistema construtivo [22]

O modelo A inspira-se na arquitetura tribal das pequenas habitações de uma localidade indiana localizada nas colinas Nilgiri, originalmente ocupadas pela tribo Toda, que ainda hoje estão presentes no referido local (Figura 2.13).



Figura 2.13 – Habitações da tribo Toda [23]

Este modelo A corresponde a pequenos módulos preparados para alojamento, com possibilidade de serem equipados com módulos de casa de banho e cozinha, sendo que também existem em 4 tamanhos diferentes, conforme mostra a Figura 2.14:

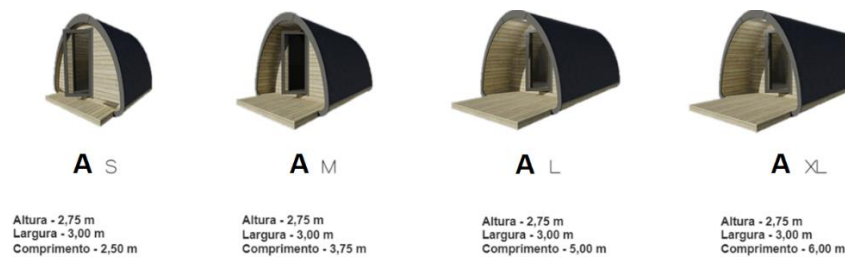


Figura 2.14 – Tamanhos do modelo A [22]

Estas unidades já foram implementadas com sucesso em vários locais, como por exemplo num centro de estágios de uma organização desportiva (Figura 2.15).



Figura 2.15 – Centro de estágios [22]

Apresentam soluções muito semelhantes, e algumas mesmo iguais, às soluções do modelo B, e têm as características técnicas apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Características técnicas do modelo A [22]

- Alta qualidade de construção	- Luminárias aço inoxidável	- Impermeabilização anti-condensações
- Madeira exterior termotratada	- Iluminação LED embutida	- Fecho de topos em Viroc
- Madeira interior em pinho nórdico	- Quatro, ou mais, tomadas elétricas	- Soleira em alumínio
- Isolamento térmico e acústico	- Tomada de TV, Rádio	- Design acolhedor
- Quadro elétrico individual	- Interruptores em comutação	- Módulo de casa de banho opcional
- Caixilharia de alumínio	- Iluminação exterior LED	- Módulo de cozinha opcional
- Vidro duplo	- Avançado de sombreamento	- Baixo consumo energético
- Teto falso em bétula	- Deck Exterior independente	- Baixa manutenção
- Pavimento OSB	- Telha Shingle, cor à escolha	- Pré-instalação de ar condicionado

Associado a este modelo A, a empresa desenvolveu também o modelo A Zero, um módulo em formato barril, mais económico e muito mais versátil (Figura 2.16).

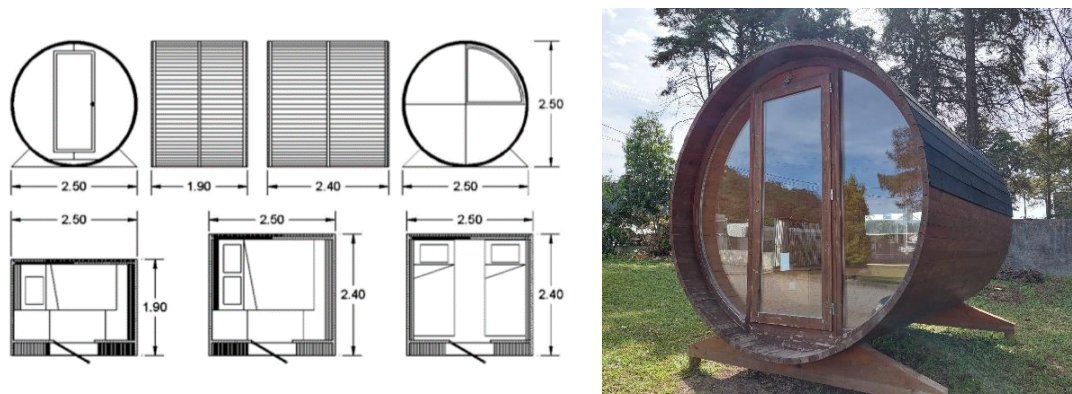


Figura 2.16 – Modelo A Zero [22]

Este módulo A Zero apresenta uma maior simplicidade de soluções, comparativamente com o modelo apresentado anteriormente, centrando-se principalmente nos fatores económicos e na adaptabilidade, e possui as características técnicas apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Características técnicas do modelo A Zero [22]

- Madeira maciça macheada em Abeto	- Tomada elétrica
- Tratamento de madeira em Xylofene	- Caixilharia de alumínio
- Velatura interior e exterior	- Vidro duplo
- Quadro elétrico individual	- Ambiente interior em madeira natural
- Iluminação interior e exterior	- Pavimento OSB

O modelo B já tem um nível de modularidade mais alto e completo, constituído por dois tipos de estruturas que podem ser acopladas, possibilitando habitações de maiores dimensões. Estas duas estruturas modulares, XP1 e XP2, podem ser amovíveis ou imóveis (Figura 2.17).

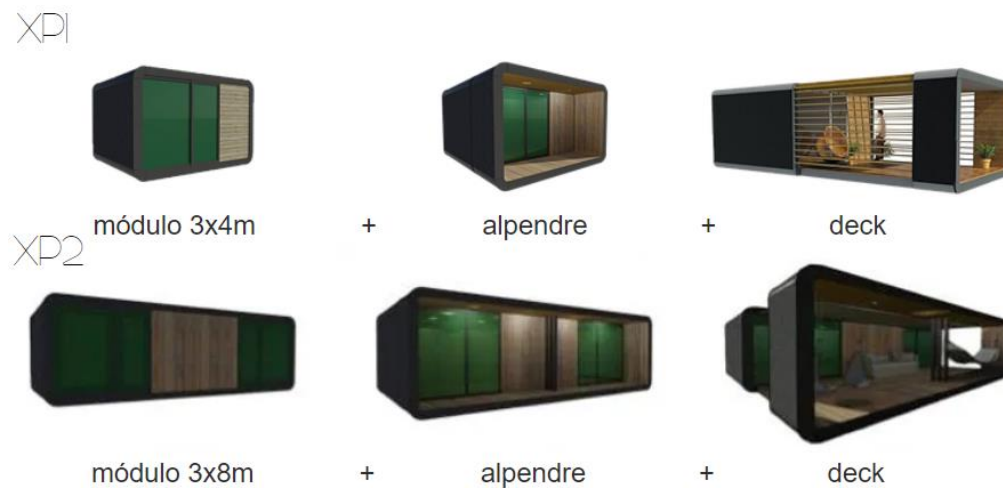


Figura 2.17 – Modelos B XP1 e B XP2

Estes módulos oferecem grande liberdade ao projeto, permitindo manipular facilmente a disposição da habitação, por meio de módulos padrão correspondentes a uma divisão da habitação, ou seja, existem módulos de quartos, salas, cozinhas e extras (alpendre, alpendre fechado e *deck*). Estes módulos oferecem também a possibilidade de manipular e personalizar alguns materiais e soluções, conforme mostra a Figura 2.18:



Figura 2.18– Personalização dos materiais e soluções do modelo B [22]

As características técnicas associadas a estas unidades não diferem muito das do modelo A. No entanto, o modelo B privilegia ainda mais o relacionamento personalizado com o cliente apresentando uma maior variedade de soluções disponíveis, apresentando as características técnicas presentes na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Características técnicas do modelo B [22]

- Alta qualidade de construção	- Luminárias aço inoxidável	- Impermeabilização anti-condensações
- Madeira exterior termotratada	- Iluminação LED embutida	- Fecho de topos em Viroc
- Madeira interior em pinho nórdico	- Quatro, ou mais, tomadas elétricas	- Soleira em alumínio
- Isolamento térmico e acústico	- Tomada de TV, Rádio	- Design acolhedor
- Quadro elétrico individual	- Interruptores em comutação	- Módulo de casa de banho opcional
- Caixilharia de alumínio	- Iluminação exterior LED	- Módulo de cozinha opcional
- Vidro duplo	- Avançado de sombreamento opcional	- Baixo consumo energético
- Teto falso em bétula	- Deck Exterior independente opcional	- Fachada Ventilada
- Pavimento OSB, Vinílico ou Vinílico Flutuante	- Variedade de revestimento exterior e interior	- Pré-instalação de ar condicionado

Os modelos A e B apresentam soluções iguais em várias áreas sendo que no modelo B são apresentadas outras soluções alternativas, como por exemplo para o pavimento que poderá ser em OSB tal como no modelo A, embora o cliente possa optar por um pavimento vinílico ou vinílico flutuante. Ambos os sistemas têm isolamento termo-acústico aplicado pelo exterior, que pode ser de lã mineral ou de celulose (Figura 2.19).



Figura 2.19 – Isolamento de Lã mineral (à esquerda) e de Celulose (à direita) [24, 25]

No modelo A, o revestimento exterior é feito com madeira termotratada, normalmente “lunawood”, havendo também a possibilidade de escolha da madeira criptoméria dos Açores, onde esta é altamente abundante. Ambas as soluções são de excelente qualidade e apresentam grande estabilidade dimensional, grande durabilidade e baixa necessidade de manutenção (Figura 2.20).



Figura 2.20 – “Lunawood” e Criptoméria dos Açores [26, 27]

Quanto ao modelo B, o revestimento exterior poderá ainda ser aplicado com telha asfáltica mineral (shingle), com cortiça, com capoto, com viroc ou com alumínio, para além das mencionadas anteriormente (Figura 2.21).



Figura 2.21 – Outras opções de revestimento exterior [22]

2.5 VANTAGENS DESTE TIPO DE CONSTRUÇÃO

Na sequência do que já foi referido anteriormente, este tipo de construção é cada vez mais procurado, principalmente pelo facto de reduzir significativamente o tempo de construção, o que

normalmente se traduz numa diminuição da mão-de-obra necessária, reduzindo assim os custos associados à construção. Para além disto, os elementos modulares são produzidos com alta precisão e controlo em fábrica, o que permite um maior controlo da qualidade, redução dos resíduos através da otimização do uso dos materiais, maior segurança durante a construção (trabalhadores menos expostos a acidentes de trabalho e uso de maquinaria pesada reduzido), oferecendo grande flexibilidade à arquitetura, sendo possível personalizar e exportar os elementos modulares de acordo com as necessidades específicas do projeto [12].

Apesar das imensas possibilidades na escolha dos materiais para estes módulos, a madeira tem ganho cada vez mais destaque, sobretudo porque é um material renovável, com baixa pegada de carbono, contribuindo assim para o desafio de tornar a construção cada vez mais sustentável. Ao mesmo tempo, apresenta uma baixa massa volúmica e elevada resistência mecânica, sendo capaz de suportar cargas elevadas e condições climáticas adversas. A madeira é também um material versátil e fácil de trabalhar, sendo possível ser utilizado tanto a nível estrutural, mas também em telhados, pisos, portas, janelas e mobiliário, podendo também ser utilizada para acabamentos e revestimentos de paredes e tetos, na construção de *decks*, entre outros. Este material tem grande capacidade de isolamento térmico, o que significa que as estruturas em madeira são mais eficientes em termos energéticos, sendo esta mais uma contribuição na procura de sistemas construtivos sustentáveis [3, 8].

Associada à construção modular em madeira, está a ideia de industrialização, que através da característica produção em série, permite a rápida adaptação às novas tecnologias e uma redução de trabalhos, problemas e responsabilidades entre os intervenientes presentes no local da construção [28].

Em suma, a construção modular em madeira apresenta uma série de vantagens significativas, que a tornam uma opção cada vez mais atraente para projetos de construção inovadores e sustentáveis. A Figura 2.22 apresenta as principais vantagens da construção modular em madeira, separando, as associadas à construção modular e as associadas à madeira como material de construção:

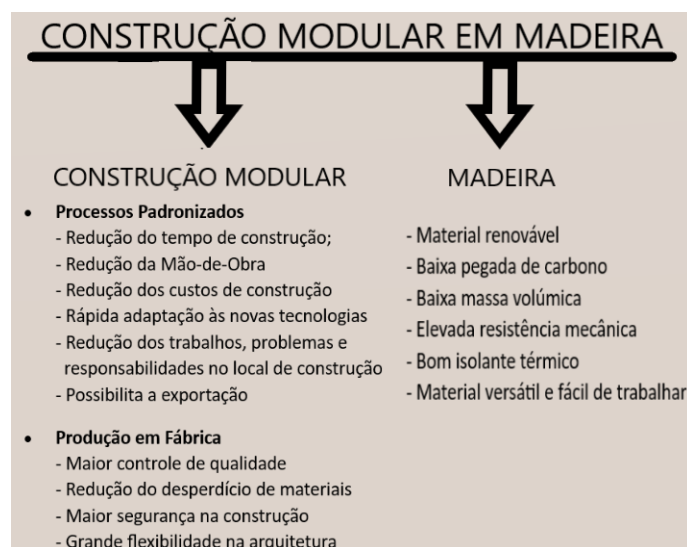


Figura 2.22 – Síntese das vantagens da construção modular em madeira

2.6 LIMITAÇÕES

Apesar das várias vantagens associadas, é de grande importância conhecer as limitações que são impostas nas construções que usam a madeira como elemento estrutural, segundo os regulamentos normativos vigentes, bem como as condições de produção, transporte e construção.

2.6.1 Limitações Normativas

Em Portugal, as estruturas de madeira devem cumprir o Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1), onde estão especificadas as exigências que estas estruturas devem satisfazer, de forma a garantir a segurança, a durabilidade e a manutenção [29].

O Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1) é um conjunto de normas técnicas harmonizadas que são aplicadas para o projeto de edifícios e obras de engenharia civil em madeira (madeira maciça, serrada, aplainada ou rolada, madeira lamelada colada ou produtos estruturais derivados da madeira como, por exemplo, LVL E CLT) ou painéis à base de madeira conectados através de adesivos ou ligações mecânicas. Fornece diretrizes detalhadas e requisitos técnicos relativos às ações solicitadas, à resistência mecânica dos materiais, dimensionamento de elementos estruturais, conectores, estabilidade, segurança e durabilidade das estruturas, bem como o comportamento da madeira ao fogo (EN 1995-1-2) e para o dimensionamento de pontes (EN 1995-2) [29]. Deve sempre aplicar-se o Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1) em conjunto com o Eurocódigo 0 (EN 1990) e com o Eurocódigo 1 (EN 1991), que indicam os requisitos para a segurança estrutural e as ações solicitadas nas estruturas, respetivamente [30, 31].

Existem mais normas europeias, como a EN 338, que define as características e requisitos para a madeira maciça e para os produtos derivados da madeira [32]. A EN 350-1 e a EN 350-2 abordam a temática da durabilidade da madeira por espécies e a resistência da mesma a fungos, insetos xilófagos e moluscos, assim como a facilidade de impregnabilidade [33]. A EN 408 é outra norma que especifica os vários tipos de ensaios que podem ser usados na caracterização das propriedades da madeira [34]. Por último, a EN 460 refere os tratamentos possíveis a aplicar à madeira e seus derivados, de forma a melhorar a sua durabilidade [35].

Em Portugal, apenas a madeira de pinho tem norma de classificação, a NP 4305, que define as classes de qualidade e classes de resistência correspondentes [36]. Os REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (DL 101-D/2020, de 7 de dezembro) e RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (DL 129/2022, de 11 de maio), impõem as limitações e requisitos para o correto desempenho acústico e térmico dos edifícios [37, 38]. De salientar, que são normas técnicas que estão sujeitas a revisões e atualizações periódicas, acompanhando os avanços tecnológicos da área (Figura 2.23).

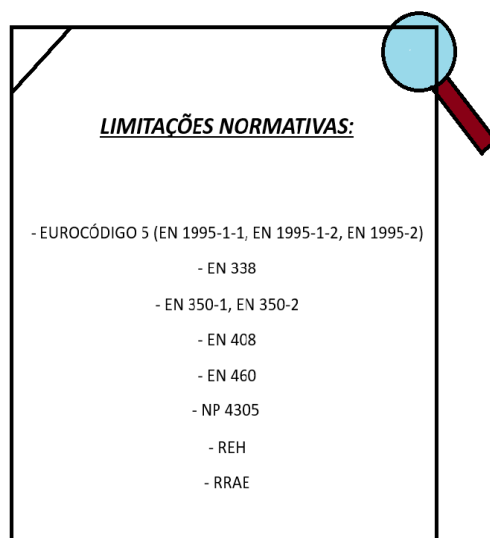


Figura 2.23 – Limitações normativas para as construções em madeira, vigentes em Portugal

2.6.2 Limitações de Produção

As limitações de produção centram-se na incapacidade das empresas de produzir painéis a partir de certas dimensões, estando sempre dependentes dos recursos humanos e tecnológicos disponíveis. Em Portugal, a tecnologia atual permite a produção em série painéis com dimensões fixas iguais ou inferiores a 1,25 metros de largura e 13,5 metros de comprimento [3]. Existem também painéis compostos por derivados de madeira que são produzidos e comercializados apenas em dimensões standard.

De forma a reduzir a mão-de-obra e o desperdício material, é importante ter em atenção as dimensões máximas que podem ser produzidas durante a fase de pormenorização e definição de juntas, o que permite promover a produção de painéis com dimensões iguais [3, 10].

2.6.3 Limitações de Transporte

Durante a conceção do módulo é importante saber as limitações impostas no transporte do mesmo, ou seja, a legislação em vigor e as dimensões dos camiões disponíveis. Em Portugal, é o Decreto-Lei nº132/2017, de 11 de outubro, que limita os pesos e as dimensões máximas permitidas para os veículos em circulação [39]. Assim, os painéis poderão ter as seguintes dimensões máximas (ver Figura 2.24):

- Comprimento: 13,60 metros;
- Largura: 2,45 – 2,48 metros;
- Altura: 2,50 – 3,00 metros;
- Peso da carga: 24 – 25,5 toneladas.

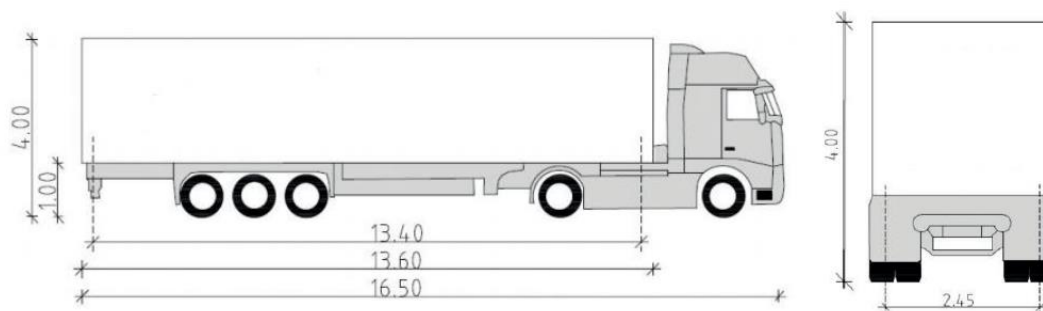


Figura 2.24 – Dimensões do camião lona padrão para transporte de painéis [3]

2.6.4 Outras Limitações

Com a necessidade de transporte dos módulos, por estes serem produzidos em fábrica, podem gerar-se mais algumas limitações consoante as condições de contorno da obra e também devido à falta de legislação normativa no que toca a aspetos construtivos de edifícios em madeira. Assim, torna-se necessária uma avaliação do espaço em obra que o camião terá para ser manobrado, de forma a descarregar o módulo sem o danificar. Em caso de necessidade de grua, é necessário verificar se esta suporta o peso dos módulos e avaliar a sua amplitude para o transporte dos mesmos. É também necessário definir o local onde o módulo será colocado, caso este não seja acoplado no próprio dia, bem como prever cenários de chuva, entre outros [3, 6]. Assim, torna-se imprescindível a elaboração de um planeamento rigoroso para que não surjam problemas com a chegada dos módulos à obra.

3

HABITAÇÕES MODULARES EM MADEIRA *nZEB*

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentada a definição de um edifício *nZEB*, abordando os princípios e diretrizes em vigor, assim como uma análise dos elementos passivos e ativos presentes neste tipo de construções de forma a otimizar os custos associados.

3.2 DEFINIÇÃO DE UM *nZEB*

O conceito dos *nZEBs* (*Net Zero Energy Building*), refere-se a edifícios que são projetados e operados com a finalidade de suprimir as necessidades energéticas em larga escala, através da otimização dos elementos passivos e da produção de energia proveniente de fontes renováveis, de forma a suprimir as restantes necessidades energéticas do edifício [40].

Ainda assim, os edifícios *nZEB*, em geral, utilizam fontes de energia tradicionais, como gás natural e eletricidade, quando a necessidade energética do edifício é superior à disponibilizada pela produção. Em contrapartida, caso a transformação de energia seja superior às necessidades do edifício, a energia produzida em excesso pode ser transferida para a rede. Assim, o balanço energético do edifício é a diferença entre a energia comprada da rede e a importada para a rede, sendo que um edifício com balanço energético nulo significa, teoricamente, que é um edifício autossustentável, alcançando assim o conceito *nZEB* [40, 41].

Apesar dos avanços tecnológicos, os dispositivos de armazenamento de energia continuam a ser limitados e dispendiosos, o que torna praticamente impossível a implementação de um *Net Zero Energy Building* sem ligação à rede. Assim, seria necessário um sobredimensionamento da rede de transformação de energia proveniente de fontes renováveis, o que implicaria um excesso de produção durante determinadas alturas e, consequentemente o desperdício dessa energia [40].

De salientar que, apenas após a otimização dos elementos passivos é que devem de ser exploradas soluções ativas, com o intuito de reduzir a dependência da habitação à rede. A Figura 3.1 oferece uma definição ilustrativa deste conceito:

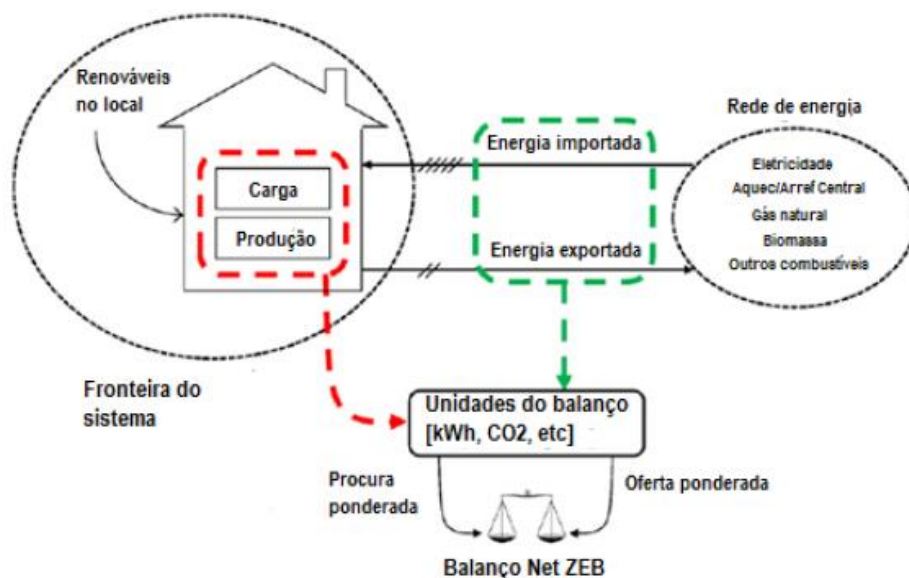


Figura 3.1 – Balanço Energético de um nZEB [41]

3.3 PRINCÍPIOS DE UM nZEB

Existem quatro princípios para projetar um *Net Zero Energy Building*, que podem ser implementados a diferentes níveis e podem incluir métricas detalhadas, tal como, energia incorporada e impacto ambiental. Dependendo da tipologia do edifício e do contexto climático do local de construção, os projetistas necessitam de identificar as medidas adequadas, aplicando os seguintes quatro princípios [40]:

1. Reduzir os gastos energéticos de todos os edifícios recém-construídos. O valor dos gastos energéticos pode ser obtido pela soma das várias necessidades energéticas (do edifício, dos sistemas de aquecimento e arrefecimento do ar, sistema de aquecimento de água, ventilação, iluminação, eletrodomésticos e energia auxiliar);
2. Melhorar a qualidade ambiental no interior do edifício, permitindo o máximo conforto térmico e evitando sobreaquecimentos. É necessária ventilação mecânica para controle da qualidade do ar;
3. Fixar uma percentagem dos gastos energéticos provenientes de energias renováveis a ser coberta pelo balanço anual de energias renováveis. Também é importante incluir outras medidas que abordem possíveis problemas na exportação e armazenamento da energia produzida;
4. Reduzir o valor anual de consumo de energia primária e as emissões de carbono;

A Tabela 3.1 refere uma série de medidas que podem e devem ser aplicadas, com base nos quatro princípios de um *Net Zero Energy Building*:

Tabela 3.1 – Os 4 Princípios de um *nZEB* [40]

First NZEB principle	Second NZEB principle	Third NZEB principle	Fourth ZNEB principle
Reduce energy demand Reduce internal loads Reduce Building envelope loads Reduce HVAC equipment energy consumption	Improve indoor environmental quality Set up minimum fresh air per person Enable natural lighting Set up a maximum occupant density	Provide renewable energy share Produce energy from renewable sources onsite Introduce renewable energy delivered from nearby or offsite Avoid double counting	Reduce primary energy and carbon emissions Reduce the primary energy demand Reduce the carbon emissions related to delivered energy

Neste contexto, como resposta face aos desafios climáticos, a construção de edifícios com alta eficiência energética é parte integrante dos objetivos propostos no Plano de Desenvolvimento Sustentável da ONU, garantindo assim preços acessíveis e fidedignos, focados numa construção sustentável à base de energia moderna para todos. Assim, torna-se vital identificar os limites de desempenho e estabelecer o mínimo de variações possíveis, de forma que o edifício mantenha a sua total funcionalidade e conforto.

3.4 LEGISLAÇÃO *nZEB*

Em 2002 foi aprovada a diretiva da União Europeia relativa ao desempenho energético dos edifícios, promovendo, aos Estados-Membro, a aplicação de uma metodologia, a nível nacional ou regional, baseada no cálculo do desempenho energético. Assim, cada Estado-Membro ficaria responsável por garantir os requisitos mínimos de desempenho energético, tendo em consideração as condições climáticas externas e locais, assim como as exigências relativas ao clima interior e rentabilidade económica.

Esta diretiva foi alvo de revisão e, em 2010, foi atualizada, exigindo os Estados-Membro que, até ao dia 31 de dezembro de 2020, todos os novos edifícios sejam *Net Zero Energy Building*, tal como todos os novos edifícios públicos, a partir de 31 de dezembro de 2018. Cada organização terá então de desenvolver um plano nacional que vise o aumento do número de edifícios *ZEB* e *nZEB*, e elaborar as suas próprias políticas e regras com a finalidade de incentivar a adaptação dos edifícios remodelados em *nZEBs*.

Foi novamente alvo de atualização em 2018, e é a Diretiva (UE) 2018/844 que está atualmente em vigor, exigindo que sejam atingidos os requisitos *nZEB* para todos os edifícios licenciados a partir de [42]:

- 1 de janeiro de 2019, para os edifícios em propriedade pública e edifícios a ser ocupados por uma entidade pública;
- 1 de janeiro de 2021, para os restantes edifícios.

Os Estados-Membro podem decidir não aplicar esta diretiva a edifícios com carácter especial, como por exemplo, edifícios classificados como património cultural, histórico ou arquitetónico ou edifícios religiosos. Assim, as diferentes organizações têm fornecido definições e critérios específicos para os *Net Zero Energy Buildings* com base na norma estabelecida pela Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios.

Em Portugal foram estabelecidas diferentes regras para edifícios de habitação (Portaria nº98/2019 de 2 de abril) e edifícios de comércio e serviços (Portaria nº42/2019 de 30 de janeiro), o REH (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação) e o RECS (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comercio e Serviços) [43, 44].

A Portaria 98/2019 de 2 de abril, define a metodologia de determinação da classe de desempenho energético para a tipologia de pré-certificados e certificados do Sistema de Certificação Energética, assim como as exigências em termos de comportamento técnico e de eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios de habitação novos e edifícios de habitação sujeitos a grande intervenção. A Tabela 3.2 apresenta essas exigências que, caso verificadas, permite aos edifícios de habitação obterem a classificação de *Net Zero Energy Building*:

Tabela 3.2 – Exigências para edifícios de habitação *nZEB* em Portugal

Tipo de requisito	Zona climática		
	I1	I2	I3
Conforto térmico			
Necessidades de aquecimento	$N_{ic}/N_i \leq 0,75$	$N_{ic}/N_i \leq 0,85$	$N_{ic}/N_i \leq 0,90$
Necessidades de arrefecimento	$N_{vc}/N_v \leq 1,00$		
Desempenho energético			
Classe energética	Igual ou superior a A		
Energia primária total (NZEB20)	$R_{NT} \leq 0,40$		
Energia primária renovável	$Ren_{Hab} \geq 0,50$		

Em relação aos edifícios de comércio e serviços, a Portaria 42/2019 de 30 de janeiro, estabelece os requisitos de conceção relativos à qualidade térmica da envolvente e à eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos, dos edifícios sujeitos a intervenção e dos edifícios existentes, através da definição de valores máximos do Indicador de Eficiência Energética (IEE_s) e do Rácio de Classe Energética (R_{IEE}) (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Exigências para edifícios de comércio e serviços *nZEB* em Portugal

Tipo de requisito	Requisito
Classe energética	Igual ou superior a B
Energia primária total (NZEB20)	$R_{IEE} \leq 0,60$
Energia primária renovável	$R_{enC\&S} \geq 0,50$ ⁽¹⁾
Energia primária fóssil	$IEE_{fossil,S} \leq 0,75 \times IEE_{ref,S}$

(1) Apenas aplicável quando existam necessidades de AQS

Nas tabelas anteriores está também apresentado o conceito *nZEB20*, que surgiu com a publicação do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) e dos respetivos avisos impondo aos edifícios requisitos adicionais de eficiência energética comparativamente com os presentes no Decreto-Lei nº101-D/2020, de 7 de dezembro, em particular a exigência prevista em alguns incentivos de que as necessidades energéticas primárias sejam pelo menos inferiores em 20% ao padrão *nZEB* (*nZEB20*) [37]. Esta exigência incide apenas no requisito de desempenho energético relativo à energia primária total do edifício, ou seja, adicionalmente às demais exigências já impostas, a este indicador é aumentada a exigência em 20%, assim a classificação *nZEB20* resulta dos requisitos previstos nas tabelas apresentadas anteriormente. Este conceito está presente na Nota Técnica sobre edifícios *nZEB20* e outros conceitos úteis para acessos a incentivos (NT-SCE-02), que também promove a articulação entre o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios e incentivos já operacionalizados ou a operacionalizar [45].

O Decreto-Lei 101-D/2020 de 7 de dezembro, define os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificação Energética de Edifícios, transpondo a Diretiva (UE) 2018/844 e parcialmente a Diretiva (UE) 2019/944, esta última relativa a regras comuns para o mercado interno da eletricidade [42, 46].

3.5 SOLUÇÕES PASSIVAS

As soluções passivas são estratégias definidas em projeto que tem por objetivo aumentar a eficiência energética da habitação e o conforto dos utilizadores, sem recorrer a meios mecânicos. Através da otimização dos elementos passivos neste tipo de construções, podem ser obtidos altos índices de eficiência energética, otimizando os custos destas habitações, contribuindo para o desenvolvimento sustentável [41, 47].

Os princípios fundamentais da construção passiva focam-se nas medidas passivas e na simplicidade das soluções tecnológicas e dos materiais. Estes princípios assentam no pressuposto que, quanto maior a simplicidade do *nZEB*, melhor será o seu desempenho e maior a sua durabilidade com manutenção mínima, sendo portanto crucial para garantir o conforto dos ocupantes e a longevidade da habitação [40, 48].

Neste subcapítulo, serão descritos e analisados os elementos passivos considerados mais importantes para o aumento da eficiência energética deste tipo de construções, nomeadamente a orientação espacial do edifício, a eliminação de pontes térmicas e a eficiência do isolamento térmico, a estanquidade o ar, as estratégias de ventilação natural e outros sistemas de arrefecimento passivos e ainda os sistemas de aquecimento passivos (Figura 3.2).

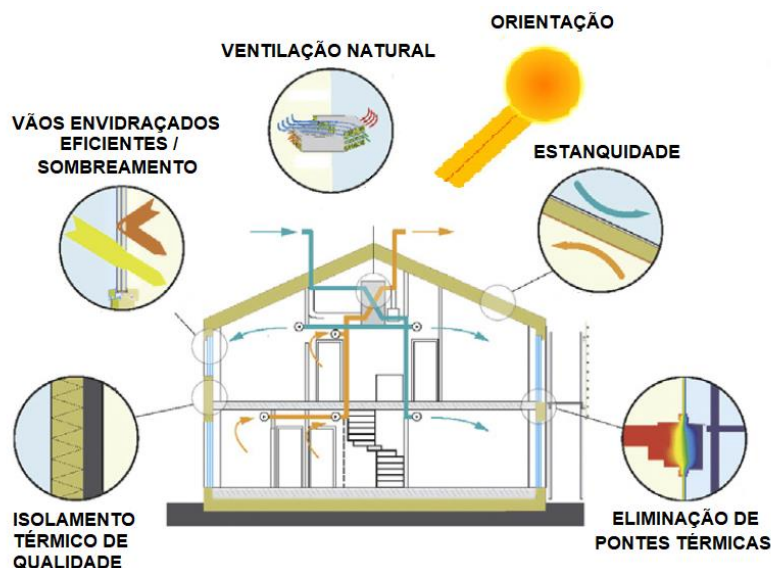


Figura 3.2 – Elementos passivos [40]

3.5.1 Orientação espacial

A orientação solar é, geralmente, determinante na orientação espacial do edifício, permitindo um desenho passivo centrado na otimização da radiação solar recebida. É uma medida que não tem custos associados durante as fases de projeto que, caso otimizada, reduz a necessidade de soluções ativas e permite um maior rendimento da luz natural, evitando iluminação artificial excessiva. A orientação solar é também o fator mais importante na orientação dos coletores solares, sendo que uma correta orientação promove a otimização do rendimento dos mesmos [41].

No caso do Hemisfério Norte, e mais concretamente em Portugal, a orientação solar aceite como ideal é a Sul, permitindo uma maior absorção da radiação incidente nos vãos envidraçados durante o Inverno assim como, controlar a radiação incidente durante o Verão. Ainda assim, a disposição espacial do edifício e das divisões devem ser adaptadas às necessidades e condições específicas do local de implantação [41].

Portugal é caracterizado por um clima temperado e temperaturas amenas, sendo que no Sul a temperatura média é superior que no Norte. O litoral é caracterizado por um clima húmido e por Invernos e Verões menos rigorosos, ao contrário do interior onde se atingem as temperaturas mínimas e máximas durante estas mesmas estações. Estas variações no clima revelam

fundamental que a determinação da orientação espacial da habitação tenha por base uma análise das necessidades do edifício tendo em conta a sua localização (Figura 3.3).

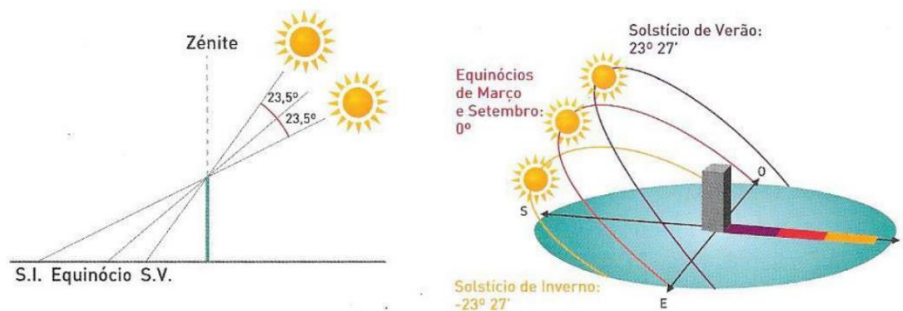


Figura 3.3 – Incidência solar ao longo do ano [49]

Um estudo realizado em Telavive, no qual foram realizadas diferentes simulações e análises dos consumos energéticos de um edifício de escritórios, que permitiu concluir que caso não seja possível uma orientação a Sul, a orientação mais favorável será a Sudeste, conforme se pode verificar na Tabela 3.4 [41]:

Tabela 3.4 – Consumos energéticos segundo três orientações diferentes [41]

	Sul kWh/ano	%	30° Este kWh/ano	%	30° Oeste kWh/ano	%
Aquecimento	186	0	231	24	219	18
Arrefecimento	281	0	286	2	369	31
Total	467	0	517	11	588	26
T ^a max (°C)	26,4		26,6		27,0	

É também necessário ter em consideração a própria topografia do local de implantação bem como o edificado envolvente pré-existente, pois estes poderão influenciar a incidência solar na habitação a construir, sendo que poderá ser um influência positiva ou negativa [50] (Figura 3.4).

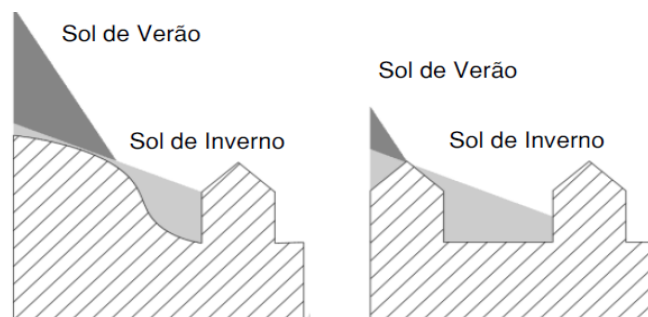


Figura 3.4 – Influência da topografia e do edificado pré-existente na incidência solar [50]

A ação do vento pode também influenciar significativamente o desempenho energético de um edifício, contribuindo também para o aumento da taxa de renovação de ar do edifício através da ventilação natural. Assim, esta ação deverá também ser tomada em consideração durante as fases de projeto, especialmente nas regiões onde a ação do vento se destaca. Torna-se então vital a análise dos ventos predominantes, a sua direção, intensidade e frequência, tendo por objetivo o aproveitamento destes para arrefecimento e ventilação dos espaços interiores. Deve ser feita, com recurso a uma rosa dos ventos, uma análise do padrão dos ventos locais integrados na topografia e nas condições envolventes do local, de forma a promover a captação ou proteção destes ventos. Devem também ser previstas as implicações, no padrão local dos ventos, provenientes da construção do novo edifício [50].

A importância destes estudos revela-se de grande importância, especialmente quando se pretendem atingir baixas necessidades energéticas, contribuindo também para a melhoria da qualidade de vida dos utilizadores e evitando o desconforto dos utilizadores da via pública. É comum a utilização de vegetação de forma a proteger o edifício dos ventos dominantes locais (Figura 3.5).

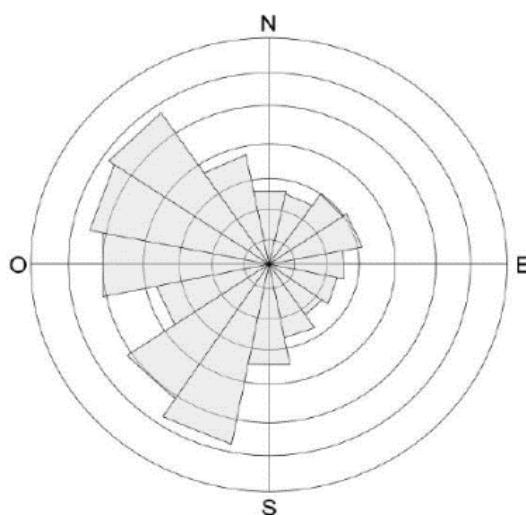


Figura 3.5 – Intensidade e orientação dos ventos locais [50]

3.5.2 Eliminação de pontes térmicas e seleção do isolamento

A envolvente do edifício, corretamente e totalmente isolada termicamente, é outro elemento passivo crítico a ter em consideração durante a fase de projeto e construção, uma vez que reduz as transferências de calor entre o interior e o exterior, facilitando a regulação da temperatura no interior do edifício (Figura 3.6). A escolha do material isolante deve ser feita tendo em consideração a sua eficiência térmica, a sua durabilidade, o seu impacto ambiental e o seu custo. O principal propósito do isolamento térmico é minimizar as transferências de calor através das envolventes, tendo como objetivo evitar as pontes térmicas [40, 51].

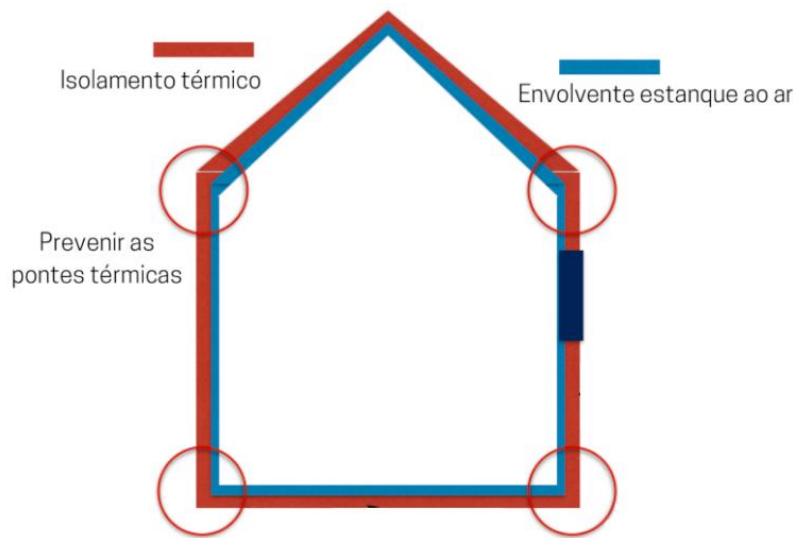


Figura 3.6 – Isolamento térmico em todos os elementos da envoltória [52]

3.5.2.1 Pontes Térmicas

Ponte térmica é uma área localizada da envoltória do edifício que tem um fluxo de calor diferente, geralmente mais elevado, em relação ao da restante envoltória e, por norma ocorrem onde há uma interrupção da camada de isolamento térmico. As pontes térmicas podem ser responsáveis por um aumento significativo no consumo energético do edifício (aumenta a perda de calor no Inverno e os ganhos solares no Verão), reduzindo o conforto térmico dos utilizadores. Podem também causar problemas de condensação e humidade, o que poderá levar a danos estruturais e à diminuição da qualidade do ar no interior do edifício. De forma a minimizar as perdas de calor torna-se então essencial analisar o coeficiente de transmissão térmica (U) de cada elemento da envoltória do edifício [51].

Relativamente ao trajeto do fluxo de calor, é possível distinguir três tipos diferentes de pontes térmicas: as pontes térmicas tridimensionais, as pontes térmicas lineares e as pontes térmicas pontuais. [51] A descontinuidade de isolamento térmico na ligação de dois ou mais elementos da envoltória do edifício é característico das pontes térmicas lineares (ou bidimensionais), e utiliza-se o coeficiente de transmissão térmica linear ($W/m.K$) para análise e avaliação. As pontes térmicas tridimensionais são caracterizadas pela interseção de duas ou mais pontes térmicas lineares. A interseção de dois elementos verticais da envoltória com um elemento horizontal, a interseção da ligação horizontal do vão envidraçado com a ligação vertical e a zona de bordos das varandas são alguns exemplos de pontes térmicas tridimensionais (Figura 3.7) [51, 53].

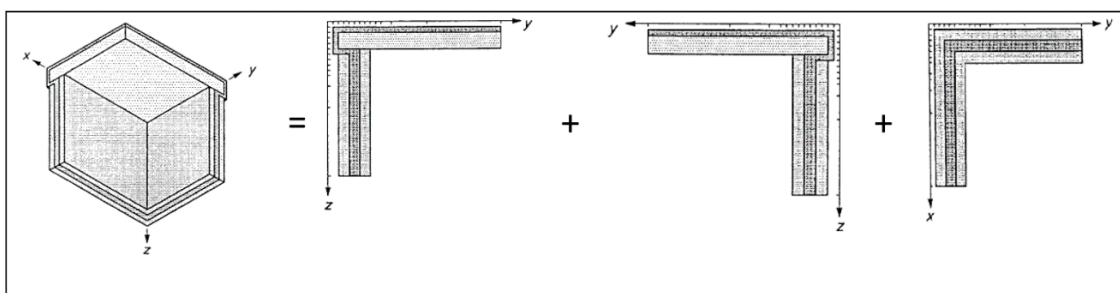


Figura 3.7 – Pontes térmicas tridimensionais derivadas de duas ou mais pontes térmicas lineares [51]

As pontes térmicas tridimensionais são da mesma ordem de grandeza que as pontes térmicas pontuais, que por sua vez resultam de discontinuidades pontuais do isolamento térmico, devido a ancoragens ou instalação de outros tipos de dispositivos, e também nas interseções entre três elementos da envolvente (dois elementos verticais e um horizontal) [51] (Figura 3.8).

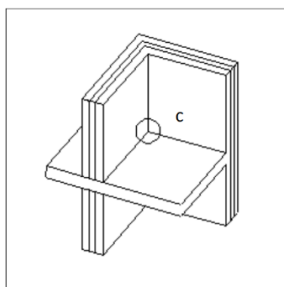


Figura 3.8 – Ponte térmica pontual derivada da interseção de três elementos da envolvente (duas paredes e um pavimento) [51]

De maneira a prevenir as pontes térmicas, o Passive House Institute (PHI) recomenda as seguintes ações como boas práticas [54]:

- Envolvente com isolamento contínuo;
- Caso seja mesmo necessário perfurar ou penetrar a camada de isolamento térmico, a condutividade térmica desse material deve ser o mais baixa possível, como por exemplo a madeira;
- Nas juntas dos vários elementos da envolvente do edifício, as camadas de isolamento térmico não devem ter interrupções ou deslocamentos.

3.5.2.2 Seleção do isolamento térmico

A escolha do material varia consoante as necessidades específicas de cada habitação, sendo que os materiais mais eficientes são os também os mais caros. O material deve ser escolhido seguindo os seguintes critérios [53, 55]:

1. Desempenho térmico;
2. Controlo de humidade;
3. Não inflamável ou corta-fogo;
4. Resistência à humidade e roedores;
5. Riscos para a saúde;
6. Custos;
7. Durabilidade do isolamento;
8. Desempenho acústico.

O critério mais importante é sem dúvida o desempenho térmico do isolamento, no qual são analisadas a condutibilidade térmica, o coeficiente de transmissão térmica, a capacidade térmica e a efusividade térmica de um material (Tabela 3.5), sendo que estas propriedades são muitas vezes decisivas na escolha do isolamento [55]:

Tabela 3.5 – Fatores que influenciam o desempenho térmico do isolamento

Condutibilidade térmica	Coeficiente de transmissão térmica	Inércia térmica	Efusividade térmica
- define o poder isolante de um material (não depende da espessura)	- fluxo térmico que atravessa um m ² de material para uma diferença de temperatura de um Kelvin	- capacidade de armazenamento de calor em relação ao seu volume	- facilidade de trocar calor com o seu ambiente
- capacidade de transmitir calor por condução		- aumenta com a densidade	

Podem ser aplicados diferentes materiais como isolamento térmico sendo possível classifica-los segundo três diferentes categorias: os minerais, os orgânicos e os sintéticos. Os isolantes minerais são produzidos à base de materiais inorgânicos minerais, por norma sob a forma de painéis e resistentes ao fogo como é o caso da lã de rocha e da lã de vidro. Os isolantes orgânicos são feitos a partir de matérias vegetais ou animais, como por exemplo a cortiça e a celulose. Por último, os isolantes sintéticos provém, geralmente, de recursos fósseis, como o poliestireno expandido (EPS). Os isolantes minerais e orgânicos são considerados materiais sustentáveis, ao contrário dos isolantes sintéticos que geralmente derivam de fontes de combustíveis fósseis. Os isolantes orgânicos costumam ser mais leves e flexíveis que os minerais, facilitando a sua aplicação por insuflação [52].

Tabela 3.6 – Condutividade térmica de alguns materiais [52]

Materiais	Condutividade Térmica (W/mK)
Aço	50,0-75,0
Betão	2,3-2,5
Betão poroso	0,08-0,25
Madeira (Pinho)	0,11-0,14
Lã de vidro	0,036-0,045
Poliuretano	0,024-0,035
Poliestireno expandido/ extrudido	0,031-0,045
Celulose	0,039-0,050

Conforme é possível observar na Tabela 3.6, o baixo valor de condutividade térmica associado à madeira, revela a eficácia deste material como isolante e assim, a sua superioridade de desempenho térmico comparativamente com o desempenho térmico do betão e do aço. Esta é uma das várias vantagens associadas às construções em madeira, contribuindo também como elemento passivo na diminuição das necessidades energéticas da habitação.

3.5.3 Estanquidade ao ar

Tal como o isolamento térmico, a estanquidade ao ar é um elemento passivo de grande importância em qualquer edifício, especialmente quando se tem por objetivo minimizar as necessidades energéticas do mesmo. Um edifício está sujeito a infiltrações de ar e a fugas de ar, sendo que as primeiras aumentam as necessidades de aquecimento e arrefecimento, enquanto que as segundas, devido às possíveis condensações nos elementos por diferencial de temperatura, poderão danificar os componentes do edifício. Estas últimas ocorrem maioritariamente devido [41]:

- Às ligações entre os elementos;
- Às aberturas na envolvente em contacto com o exterior;
- Aos sistemas de ventilação;
- Aos sistemas de aquecimento e arrefecimento.

É importante selecionar materiais que tenham elevada durabilidade, resistência à água e ao ar e permitam a sua correta aplicação nas juntas, assim como optar por janelas e portas que minimizem as trocas de energia entre o interior e o exterior.

Assim, uma estanquidade adequada pode melhorar significativamente o desempenho energético do edifício, prevenir a degradação dos elementos construtivos do mesmo, melhorar a qualidade

do ar interior, evitando humidades e gases poluentes, sendo que também promove o seu desempenho acústico [41].

O método mais corrente para avaliação da estanquidade ao ar num edifício é o Blower Door Test (BDT), que consiste na instalação de uma lona integrada com um ventilador numa abertura do edifício, pressurizando o edifício (até 50 Pa). Todas as aberturas para o exterior são fechadas e as portas interiores são deixadas abertas (Figura 3.9). Os fluxos de ar são localizados através da medição da velocidade do ar que atravessa a envolvente, por meio de um medidor de fluxo ou através de uma câmara infravermelhos para as áreas de difícil acesso [56].



Figura 3.9 – Blower Door Test [57]

3.5.4 Ventilação natural e outros sistemas de arrefecimento passivos

São as estratégias que tenham por objetivo a dissipação de calor do interior dos edifícios que se designam por sistemas de arrefecimento passivos. A utilização destes sistemas permite reduzir significativamente as necessidades de climatização convencional, contribuindo assim na redução das necessidades energéticas de arrefecimento do edifício [40].

3.5.4.1 Ventilação natural

A ventilação natural é o sistema de arrefecimento de maior simplicidade de implantação, é através da promoção da instalação de grelhas e/ou tubagens em locais estratégicos, que permite renovar e, geralmente, arrefecer o ar interior. A circulação do ar no interior é possível devido à diferença entre as pressões do ar interior e exterior, criando um fluxo de ar que corre no sentido da zona de maior pressão para a zona de menor pressão. O ar é introduzido no interior através de grelhas,

pelas frinchas e aquando da abertura de vãos que liguem ao exterior. Para a extração pode ser adotada uma tubagem que ligue ao exterior e funcione como extrator [56].

A ventilação natural cruzada e a ventilação natural por efeito chaminé são duas estratégias distintas (Figura 3.10). A ventilação natural cruzada é realizada pelas grelhas de insuflação e pelas frinchas dos vãos e aquando da abertura dos mesmos, permitindo a circulação do ar de forma contínua devido aos gradientes de pressão.. Já a ventilação natural por efeito chaminé é possível através da instalação de aberturas zenitais, como clarabóias, que enquanto estiverem abertas simultaneamente com outros vãos situados em zonas mais inferiores do edifício, permitindo a entrada de ar frio pelos vãos inferiores e a saída do ar quente pelos superiores. Estas aberturas zenitais podem ser equipadas com dispositivos que permitem regular a ventilação e a radiação solar incidente [56].

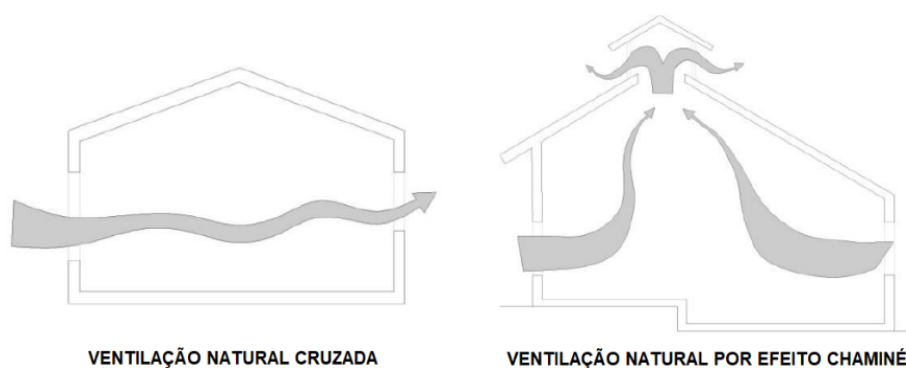


Figura 3.10 – Tipos de ventilação natural [50]

A adoção destas estratégias está intimamente ligada à análise dos ventos dominantes locais, assim como da topografia e do meio envolvente, funcionando como sistema de arrefecimento passivo e melhorando a qualidade do ar interior, o que permite uma redução dos consumos energéticos e uma melhoria na qualidade de vida dos utilizadores. Durante o Verão, a ventilação natural desempenha um papel fundamental no arrefecimento noturno dos edifícios [50].

Existem outros sistemas de arrefecimento passivos, de seguida serão apresentados os sistemas de arrefecimento através do solo, de arrefecimento evaporativo e de arrefecimento por cobertura jardinada.

3.5.4.2 Arrefecimento através do solo

Este sistema de arrefecimento aproveita a temperatura do solo para arrefecer o interior do edifício e pode ser aplicado de um modo direto ou indireto. No caso do arrefecimento através do solo por contacto direto, este constitui a própria extensão da envolvente do edifício (pavimento, paredes e eventualmente cobertura), sendo que o calor transmiti-se por condução entre os elementos do edifício ligados ao solo. É um método bastante eficaz em regiões de clima temperado [50, 56].

No método de arrefecimento através do solo por contacto indirecto, são instaladas condutas subterrâneas a uma profundidade de 1 a 3 metros que estão ligadas ao interior do edifício, funcionando como permutador de calor entre o solo e o interior (Figura 3.11). O desempenho destes sistemas depende da temperatura a que se encontra o solo, da temperatura e da velocidade do ar em circulação nas condutas e ainda das propriedades térmicas destas e do solo, logo, varia com a dimensão das condutas e com a profundidade a que estas são instaladas [56].

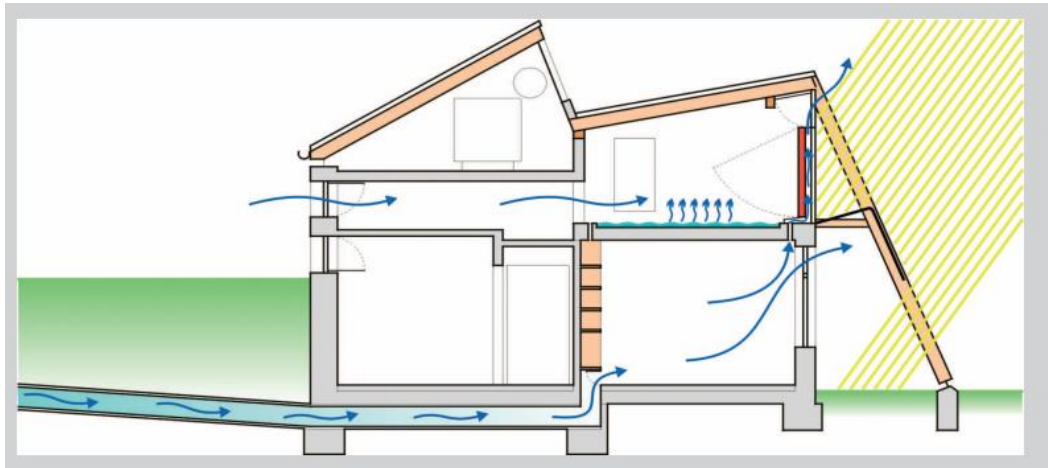


Figura 3.11 – Arrefecimento através do solo - método indirecto [56]

3.5.4.3 Arrefecimento evaporativo

Este sistema de arrefecimento é caracterizado pela diminuição da temperatura associada à mudança de fase da água no estado líquido para o estado gasoso (Figura 3.12). Esta diminuição de temperatura do ar exterior é acompanhada de um aumento do conteúdo de vapor de água, e depois utilizado para arrefecer o interior do edifício, verificando-se um arrefecimento evaporativo directo. Existem várias estratégias passivas como é o caso da implantação de fontes, piscinas, espelhos de água e até mesmo de vegetação, promovendo a evapotranspiração. Existe ainda outro método directo que se baseia na pulverização de gotas de água no ar exterior, diminuindo a temperatura do mesmo que, por sua vez, irá entrar e arrefecer o interior do edifício [50, 56].

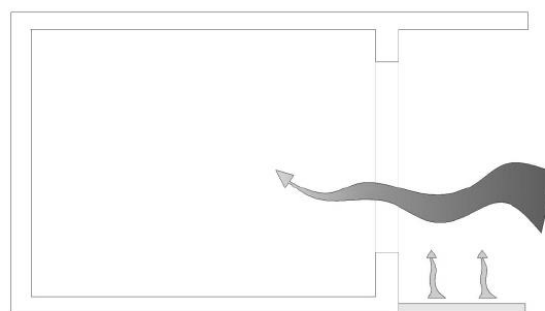


Figura 3.12 – Arrefecimento evaporativo através de espelhos de água [50]

3.5.4.4 Arrefecimento radiativo

Os elementos da envolvente exterior de um edifício emitem radiação que pode ser utilizada como sistema de arrefecimento. As perdas por radiação são processos contínuos e podem ocorrer durante o dia, no entanto é durante a noite que os seus efeitos se evidenciam. A estratégia passiva mais comum é a utilização da cobertura como elemento radiativo, devido à sua maior exposição à radiação solar. Assim, as coberturas horizontais são os elementos privilegiados em relação ao arrefecimento radiativo, sendo que é comum a aplicação de isolamento térmico, este poderá diminuir o potencial de arrefecimento radiativo noturno, podendo ser adotado um sistema de isolamento móvel que permita otimizar as perdas por radiação [50, 56].

3.5.4.5 Coberturas verdes

Nos sistemas de arrefecimento por cobertura verde, a seleção dos materiais a utilizar é fundamental, são as suas propriedades térmicas que vão permitir o controlo da temperatura superficial da cobertura (Figura 3.13). Funciona como sistema de arrefecimento passivo durante o Verão e, funciona também sistema de retenção de calor. A terra atua como camada de massa térmica e as plantas realizam a evapotranspiração, minimizando os fluxos energéticos entre o interior e o exterior. Embora esta cobertura funcione como isolante devido à sua baixa condutividade térmica, é recomendável a aplicação de isolamento térmico de forma a garantir a continuidade e a eficácia do isolamento do edifício. É essencial a colocação de uma camada de drenagem que permita escoar a água supérflua e armazenar a necessária para a camada vegetal [41, 50].



Figura 3.13 – Constituição da cobertura verde [58]

3.5.5 Vãos envidraçados e outros sistemas de aquecimento passivos

Os sistemas de aquecimento passivos correspondem a dispositivos construtivos integrados nos edifícios, que têm por objetivo o seu aquecimento natural durante as estações frias, maximizando a captação da radiação solar durante o Inverno [41].

A correta orientação e dimensionamento dos vãos envidraçados é o sistema de aquecimento passivo mais comum e de grande facilidade de implantação, sendo que os ganhos térmicos são obtidos de forma direta. Os ganhos solares podem ser obtidos de três diferentes formas [56]:

- Modo direto – vãos envidraçados;
- Modo indireto – parede de trombe, parede massiva e colunas de água;
- Modo isolado – estufa ou coletor de ar.

3.5.5.1 Vãos envidraçados e sistemas de sombreamento

Na fase de dimensionamento dos vãos envidraçados é necessário analisar o seu rendimento em termos de transferência de calor, iluminação natural e conforto térmico. Deve-se promover a minimização de transferências de calor com o exterior, sendo que os métodos mais eficazes e comuns são a utilização de vidro duplo ou triplo e a aplicação de um revestimento de baixa emissividade sobre o lado interno do vidro exterior, diminuindo assim o valor do coeficiente de transmissão térmica (U)[41] [56].

Quanto ao seu desempenho como sistema de aquecimento passivo, as propriedades térmicas dos envidraçados devem ser otimizadas com a sua orientação e área, tendo em consideração as condições climáticas locais. Nas regiões mais frias pretende-se maximizar os ganhos térmicos, sendo que nas regiões mais quentes, terão que ser analisadas as necessidades energéticas do edifício [56].

A caixilharia do vão envidraçado é o seu ponto fraco, bloqueando parte da radiação solar incidente no vão. Existem várias opções de materiais para estas caixilharias, sendo comum a adoção de estruturas em madeira maciça, PVC ou alumínio, esta última deve estar munida de um perfil com corte térmico (Figura 3.14) [54].

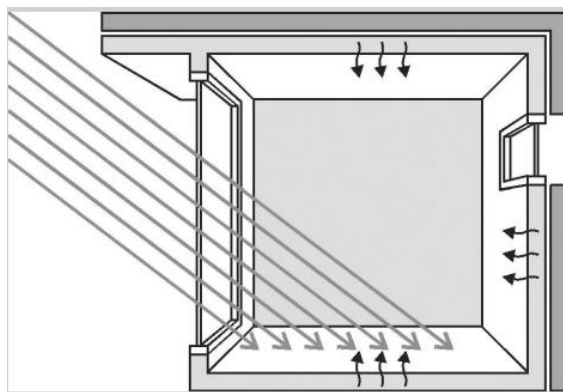


Figura 3.14 – Sistema de aquecimento passivo de ganho direto [56]

Em Portugal, a orientação dos vãos envidraçados a Sul revela-se uma medida que funciona como sistema de aquecimento passivo. Nas regiões mais quentes, devem ser adotados sistemas de sobreamento que permitem controlar a radiação solar, sendo especialmente importante durante as estações quentes [56].

Alguns exemplos de sistemas de sobreamento são as palas horizontais, verticais ou mistas, estores internos ou externos, vidros com proteção que permite refletir a radiação solar, estes são sistemas implantados na envolvente do edifício e podem ser fixos ou reguláveis. Podem também ser adotadas outras medidas de sobreamento como a utilização de árvores de folha caduca para diminuir a radiação incidente durante o Verão, possibilitando na mesma a maximização dos ganhos solares durante o Inverno (Figura 3.15) [50].

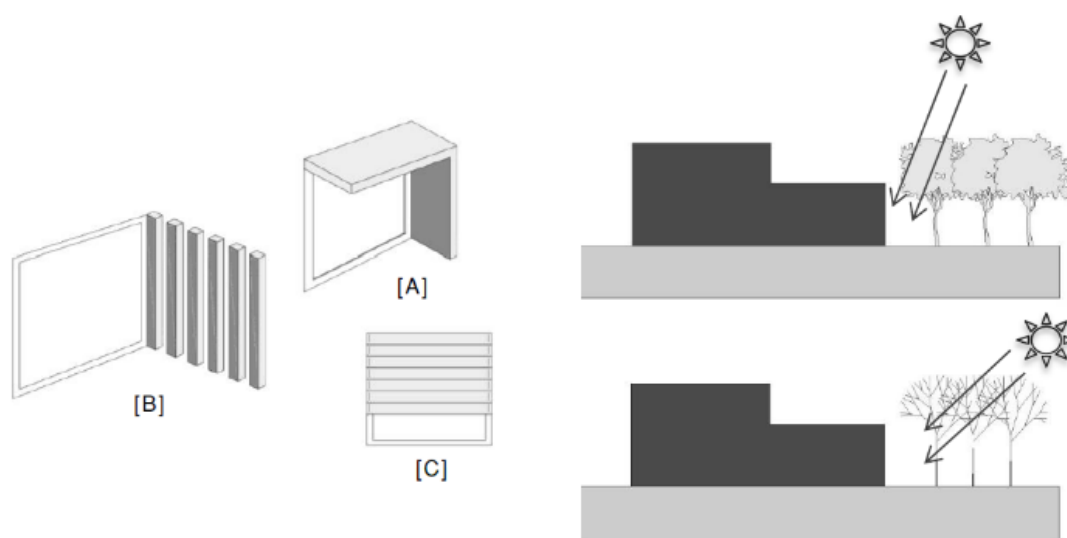


Figura 3.15 – Sistemas de sobreamento: pala mista contínua [A], lamelado vertical [B], estore exterior [C] e barreira vegetal de folha caduca (à direita) [50]

3.5.5.2 Sistemas de aquecimento passivos por ganhos indiretos

Os sistemas de aquecimento passivos por ganhos indiretos são caracterizados pela massa térmica dos elementos entre a superfície de ganho térmico e o espaço a aquecer. A transferência de energia pode ser efetuada de modo direto ou desfasada da onda de calor transmitida para o espaço e o ciclo de incidência solar no mesmo, permitindo a estes espaços absorver a energia até ao final da tarde ou início da noite. O controlo das transferências de calor pode ser realizado pelo próprio utilizador, através da utilização de sistemas de ventilação, como é o caso da parede de Trombe [50, 56].

A parede de Trombe trata-se de um sistema composto por um vão devidamente orientado, colocado na parte exterior de uma parede maciça de espessura variável. Esta parede possui elevada massa térmica, sendo comum pintar de cor escura a superfície exterior desta, resultando

num sistema que se comporta como uma estufa, atingindo elevadas temperaturas (Figura 3.16) [56].

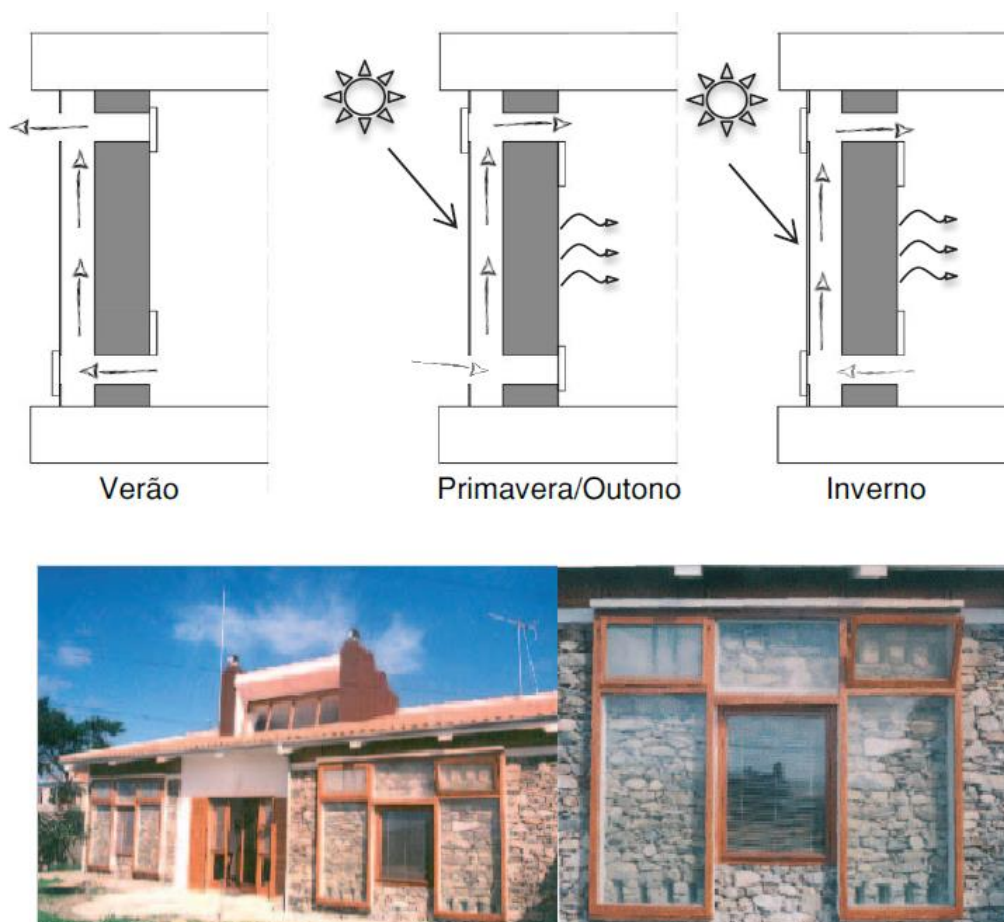


Figura 3.16 – Funcionamento da parede de Trombe durante as várias estações e exemplo de parede de Trombe com parede em pedra [50, 56]

A energia incidente neste sistema pode ser transferida de imediato para o interior do espaço através da ventilação natural, por intermédio de orifícios existentes, aquecendo o espaço interior por meio de uma corrente de convecção natural. Estes orifícios devem ser reguláveis de forma a permitir o armazenamento de energia e o controlo da utilização desta. É também possível optar-se por outra estratégia para além da ventilação natural, designa-se por parede de armazenamento, a transferência de calor dá-se por condução, e permite armazenar grandes quantidades de energia durante o dia que é utilizada para aquecimento durante a noite. Ambos estes sistemas devem ter instalados dispositivos de sombreamento reguláveis, de forma a controlar a temperatura no interior do edifício, evitando condições de sobreaquecimento [56].

As paredes e colunas de água são outra estratégia de aquecimento passivo por ganho indireto, tirando partido das potencialidades térmicas da água e da transparência da mesma, permitindo a iluminação do espaço interior. Neste sistema, o calor resultante da radiação solar incidente é

transmitido por convecção e radiação para o espaço interior. É uma metodologia idêntica à utilizada nas paredes de armazenamento. No entanto, em vez de ar num material construtivo, é, geralmente, água em contentores, sendo possível optar-se por outro líquido assim como outros tipos de reservatórios [56].

3.5.5.3 Sistemas de aquecimento passivos por ganhos isolados

Nestes sistemas, a captação e armazenamento da energia proveniente da radiação solar são realizados em áreas desocupadas do edifício, operando de forma independente. Estes sistemas conjugam os efeitos diretos e indiretos da radiação solar, sendo depois transmitida para os espaços adjacentes por condução através dos elementos construtivos, e também por convecção caso seja possível a circulação do ar (Figura 3.17) [50, 56].

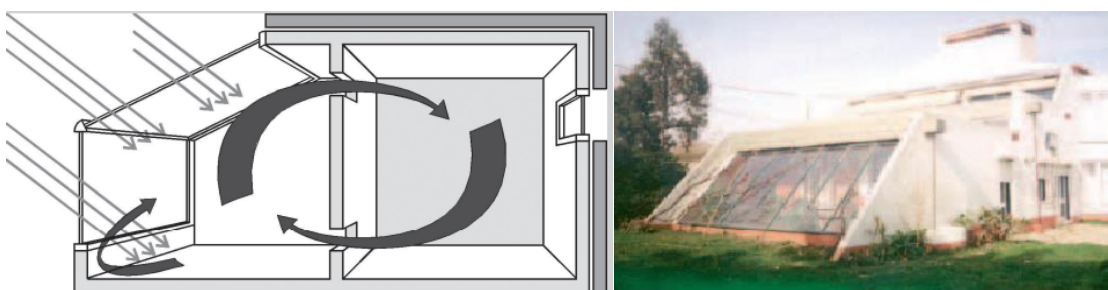


Figura 3.17 – Sistema de aquecimento por ganhos isolados (em cima) e exemplo de habitação com estufa incorporada (em baixo) [56]

Podem ainda ser utilizadas estratégias com recurso a coletores de ar, são constituídos por uma superfície absorvedora e outra de vidro e não possui capacidade de armazenamento térmico. Permite aquecer o ar exterior que será introduzido no edifício e também ventilar o interior os espaços interiores. É necessária a instalação de um dispositivo de captação solar que possibilite, a transmissão direta da radiação absorvida ao ar que irá ser insuflado durante o Inverno e a extração do ar interior durante o Verão, conforme demonstra a Figura 3.18 [56]:

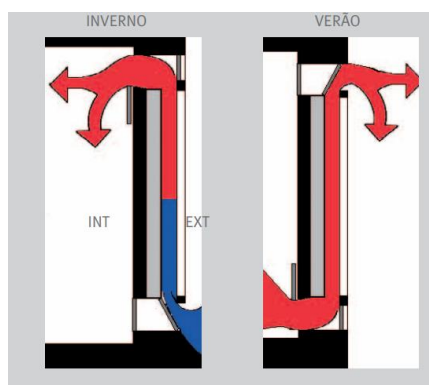


Figura 3.18 – Funcionamento dos coletores de ar durante as estações de Inverno e Verão [56]

3.6 SOLUÇÕES ATIVAS

Apesar de ambas terem como objetivo a otimização da eficiência energética e do desempenho do edifício, as soluções ativas e as soluções passivas são duas abordagens distintas e que podem ser combinadas durante as fases de projeto. As soluções ativas são estratégias com recurso a tecnologias e sistemas mecânicos que permitem a produção e armazenamento de energia elétrica, assim como a climatização e o aquecimento de águas sanitárias. Assim, após otimização das soluções passivas, podem ser integradas soluções ativas de forma a atingir-se um balanço energético nulo (ou praticamente nulo). Estas soluções ativas devem ser sustentáveis e alimentadas a energia proveniente de fontes renováveis [40].

Existem várias estratégias sendo que, inicialmente, serão apresentados os sistemas de produção e armazenamento de energia, seguido de das estratégias ativas de climatização e de ventilação mais relevantes.

3.6.1 Sistemas de produção de energia

São utilizadas fontes de energia renováveis uma vez que pretende-se que estas estratégias sejam o mais sustentáveis possíveis, sendo que a energia poderá ser produzida no próprio edifício (*onsite*) ou produzida noutro local e comprada (*offsite*). As energias renováveis disponíveis *onsite* são, geralmente, a solar e a eólica, no entanto, os métodos mais correntes são os painéis fotovoltaicos e os painéis solares térmicos. É possível o aproveitamento da energia eólica através de um aerogerador que transforma o movimento mecânico criado pelo vento em energia elétrica, no entanto este sistema ainda não tem o potencial necessário para satisfazer as exigências energéticas dos edifícios [41].

3.6.1.1 Painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são células fotovoltaicas ligadas em série, normalmente revestidas com vidro e uma caixilharia de metal, que servem como proteção. A produção de energia é realizada nestas células através do efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico é a conversão de radiação eletromagnética em energia elétrica. É a absorção de luz que permite a criação de portadores de carga (buracos e eletrões) que, devido à diferença de potencial, direcionam-se para eletrodos opostos criando um fluxo geral de cargas, ou seja, eletricidade [59, 60].

A energia produzida nestes painéis varia com a sua constituição, com a quantidade de energia solar incidente e com a temperatura a que consegue operar. Estes painéis podem ser aplicados ou integrados nos edifícios, isto é, podem ser instalados com recurso a uma estrutura adicional (fixa ou móvel) ou podem estar integrados na envolvente do edifício. Os sistemas aplicados não provocam nenhum efeito direto na estrutura do edifício, no entanto os sistemas integrados são parte constituinte da envolvente, melhorando o comportamento térmico do edifício, constituindo

uma melhor solução estética, económica e técnica. Estes módulos fotovoltaicos juntamente com um inversor e, nalguns casos, com uma bateria e com um controlador de carga, compõem o sistema fotovoltaico (Figura 3.19) [49, 59].



Figura 3.19 – Sistema fotovoltaico [61]

O inversor converte a corrente contínua em alternada, permitindo a alimentação dos aparelhos eletrónicos convencionais. O controlador de carga é instalado entre os painéis e as baterias, de forma a gerir o processo de carga, garantindo que esta não é sobrecarregada, nem completamente descarregada. As baterias são utilizadas para armazenar o excesso de energia produzida, que é depois utilizada durante as alturas de menor produção, como durante a noite. Para além de ser armazenada em baterias, a energia produzida, após ser convertida em corrente alternada, pode ser introduzida na rede através de uma unidade de condicionamento de energia. Estes sistemas ligados à rede têm a grande vantagem de garantir sempre resposta às necessidades energéticas do edifício, mesmo nas alturas de menor produção, utilizando a energia da rede por meio da mesma unidade de condicionamento de energia [59].

Convencionalmente, os painéis fotovoltaicos são instalados de forma a otimizar a produção anual de energia e, as coberturas são o local de eleição. No entanto, à medida que os aglomerados urbanos se desenvolvem verticalmente, a área disponível para a instalação de painéis nas coberturas torna-se cada vez mais escassa. Assim, as fachadas verticais dos edifícios não devem ser desconsideradas e, apesar de não terem a inclinação ideal, permitem um pico de produção durante o início da manhã e o final da tarde, alturas em que são incididas de forma praticamente perpendicular pela radiação solar, propiciando aos painéis uma maior captação da radiação e, por consequência, maior produção de energia. No caso das instalações em coberturas inclinadas, o seu pico de produção de energia será por volta do meio-dia, quando o sol estiver próximo ao zénite (Figura 3.20) [59].

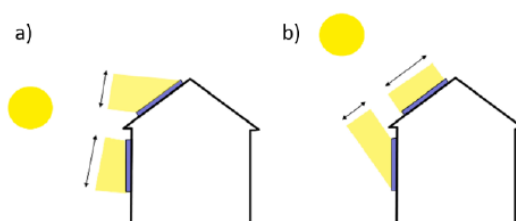


Figura 3.20 – Incidência da radiação solar nas fachadas verticais e coberturas inclinadas: início de manhã e final de tarde (a) e meio-dia (b) [59]

As claraboias fotovoltaicas (Figura 3.21) são um exemplo de sistema fotovoltaico integrado, que além de produzir energia elétrica, reduz as necessidades de aquecimento, arrefecimento e iluminação, reduzindo por consequência os custos energéticos da habitação. Por norma, são compostas por células fotovoltaicas semitransparentes de silício cristalino estanques com uma espuma vinílica acetinada, por uma camada de ar e por vidros nas extremidades, sendo possível a aplicação de um vidro refletor ou colorido [49].

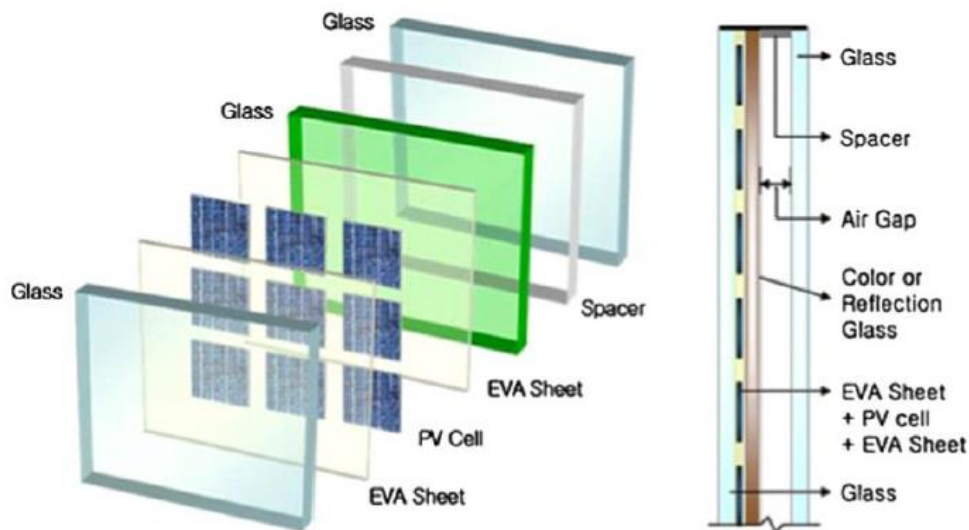


Figura 3.21 – Constituição da claraboia fotovoltaica [49]

Tendo as células fotovoltaicas uma determinada área fixa, apesar do aumento da área coberta por células resultar num aumento de produção de energia, resulta também num aumento da sombra formada pelas mesmas células, reduzindo os ganhos térmicos e a iluminação. Assim, é fundamental a análise de simulações que permitam obter o valor da razão da cobertura de célula fotovoltaica, que otimiza os ganhos térmicos e a iluminação com a produção de energia [49].

Através de um estudo desenvolvido em 2013, ficou comprovado que para garantir que não existe desconforto térmico, a distância entre o utilizador e a superfície do painel deve ser igual ou superior a dois metros [49].

3.6.1.2 Coletores solares térmicos

Os sistemas solares térmicos são constituídos por coletores, que captam a radiação solar e transformam-na em energia térmica, que por sua vez, é permutada e transferida para um fluido térmico que circula pela serpentina do reservatório, aquecendo a água, sendo posteriormente utilizada para satisfazer as necessidades de água quente da habitação. Por norma, os sistemas solares térmicos são apenas utilizados para aquecimento de águas sanitárias [59, 60].

Tal como os painéis fotovoltaicos, os coletores solares térmicos podem ser adaptados ao edifício ou integrados no mesmo, existindo dois tipos de sistemas solares térmicos para efeitos habitacionais disponíveis no mercado: o sistema de termossifão e o sistema de circulação forçada.

No sistema de termossifão, todos os componentes do sistema solar térmico estão colocados no exterior do edifício. O sistema e o reservatório são colocados a um nível superior ao do coletor. O termofluido é aquecido no coletor e, devido à sua menor densidade, desloca-se para o ponto mais alto do reservatório, onde transfere a energia para a água. Este movimento é contínuo e apenas é interrompido quando a radiação solar incidente é baixa ou nula. O reservatório recebe água da rede pública e possui saída para água de uso final aquecida (Figura 3.22) [59].

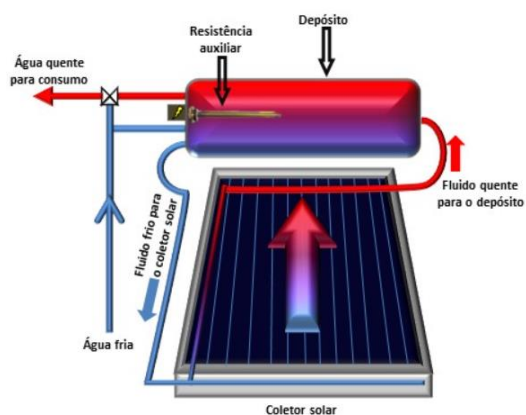


Figura 3.22 – Sistema de termossifão [62, 63]

Já o sistema de circulação forçada necessita de uma bomba de circulação para deslocar o termofluido do coletor para o reservatório, que neste caso está instalado no interior do edifício, protegido das condições exteriores. O sistema de controlo permite gerir a bomba de circulação e tem sensores de temperatura integrados. A bomba apenas funciona enquanto a temperatura do termofluido do coletor for superior à temperatura da água no reservatório. Este sistema pode ser interligado com o sistema de aquecimento central (Figura 3.23) [59].

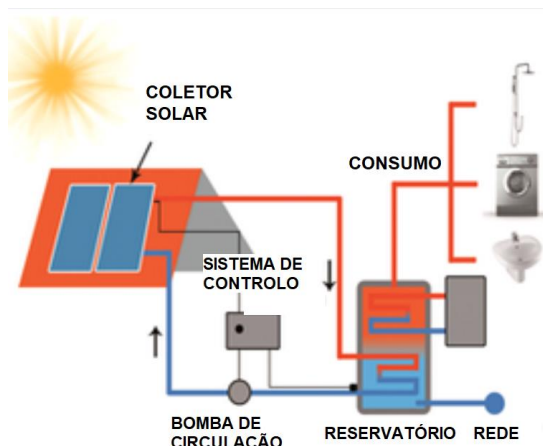


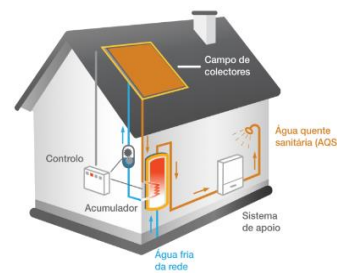
Figura 3.23 – Sistema de circulação forçada [62, 64]

O sistema de termossifão é uma solução mais económica e mais simples, isenta de peças móveis e controlos eletrónicos, mas menos eficiente energeticamente e sujeito a quebras devido ao vazamento de ar no reservatório. O sistema de circulação forçada é um sistema mais complexo e consome baixas quantidades de energia elétrica, sendo energeticamente mais eficiente e versátil (Figura 3.24).



SISTEMA DE TERMOSSIFÃO

- > Solução ideal para espaços mais reduzidos.
- > Constituído por 1 ou 2 painéis e um depósito de água no ponto mais alto do painel.
- > O seu funcionamento baseia-se na circulação natural do fluido térmico.
- > No inverno a eficiência pode ser mais reduzida, acontecendo o inverso no verão, em que o aquecimento é muito rápido.



SISTEMA DE CIRCULAÇÃO FORÇADA

- > Circulação do fluido térmico ocorre por ação de um sistema de bombagem.
- > O depósito pode ser acoplado a outra fonte de produção de água quente.
- > Depósito não está exposto às condições climáticas, evitando perdas de temperatura, sendo extremamente eficiente durante todo o ano.

Figura 3.24 – Sistema de termossifão vs. Sistema de circulação forçada [65]

Existem dois tipos de coletores solares: os não concentrados (ou estacionários) e os concentrados. Ao passo que um coletor estacionário tem a mesma área para interseção e absorver a radiação solar, um coletor concentrado possui superfícies refletoras côncavas que interseccionam e focam a radiação solar para uma área recetora menor, aumentando assim o fluxo de radiação [59].

Hoje em dia, já existem sistemas constituídos por colunas técnicas e um número variável de coletores solares, sendo que as colunas funcionam como sensores de orientação ativa. Estes sistemas inteligentes de orientação solar permitem obter uma maior eficiência energética, comparativamente com os sistemas fixos tradicionais [59].

3.6.1.3 Biomassa

A biomassa é originada a partir de matéria orgânica de origem vegetal ou animal e é outra alternativa aos combustíveis fósseis. A biomassa pode ser utilizada diretamente como combustível ou pode ser transformada para produção de energia elétrica. Os sistemas de aquecimento a biomassa são caracterizados, do ponto de vista energético, como uma opção bastante atraente e fiável para as necessidades de aquecimento e de água quente de uma habitação [41, 66].

A biomassa apresenta como desvantagens a sua baixa densidade energética e elevado índice de humidade, sendo que a expansão da sua utilização sob a forma de *pellets* impulsionou as tecnologias de aquecimento a biomassa. Os *pellets* são uma massa esférica ou cilíndrica resultantes da compressão de madeira proveniente das serrações e dos desperdícios produzidos nas florestas. Apresentam uma constituição homogénea uma densidade energética mais alta, maior poder calorífico e menor teor de humidade, em relação à biomassa não tratada. Ainda assim, os *pellets* retêm a natureza hircópica da madeira, mantendo assim a sua vulnerabilidade à água. Devido à sua elevada densidade energética, o armazenamento e o transporte são processos muito mais eficientes comparativamente com as outras formas de biomassa. É necessária atenção à possibilidade de degradação dos *pellets* pois pode resultar em complicações de armazenamento [59].

Tabela 3.7 – Propriedades dos combustíveis: lascas de madeira, *pellets* de madeira, biomassa torreficada, *pellets* de biomassa torreficada (TPBs) e carvão betuminoso [59]

	Wood chips	Wood pellets	Torrefied biomass	TBP's	Bituminous coal
Moisture content (%wt)	30-60	7-10	3	1-5	5-10
Mass density (Kg.m ⁻³)	250-400	600-650	230	750-850	800-1000
LHV (MJ.Kg ⁻¹)	6-13	16,2	19,9	19-22	425
Calorific value (MJ.Kg ⁻¹)	1,7-3,6	4,5	5,5	5,2-6,2	7
Energy density (MWh.m ⁻³)	0,7-0,9	3	1,3	4,2-5	5,6-7
Hygroscopic nature	Hygroscopic	Hygroscopic	Hydrophobic	Hydrophobic	Hydrophobic
Biological degradation	Yes	Yes	No	No	No

A torrefação é um método de conversão térmica da biomassa à temperatura de 200/300 °C, sob condições atmosféricas controladas e na ausência de oxigénio, o que permite uma redução do volume em cerca de 30% enquanto mantém cerca de 90% da sua energia. Este processo de tratamento aumenta significativamente o poder calorífico volúmico da biomassa e altera a sua natureza higroscópica para hidrofóbica. Assim, o efeito da humidade deixa de ser relevante para a decomposição da biomassa, uma vez que a biomassa passa a ter uma capacidade de absorção de água muito limitada (Figura 3.25).

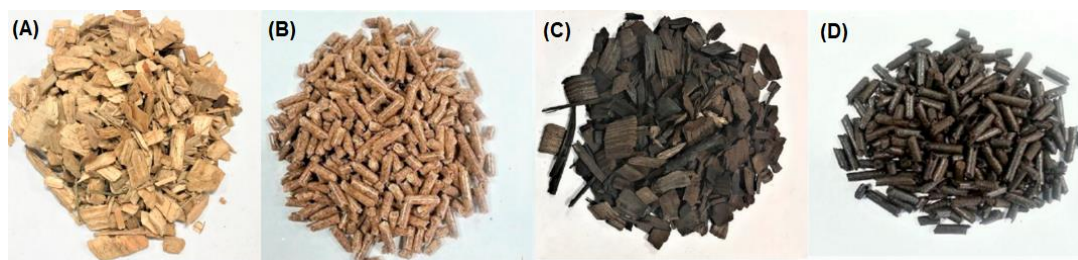


Figura 3.25 – Lascas de madeira (A), *pellets* de madeira (B), lascas de madeira torreficadas (C) e *pellets* de madeira torreficados (D) [59]

A combinação da peletização com a torrefação resulta nos *pellets* de biomassa torreficada (TPB's), um combustível de biomassa sólido com elevada densidade energética, com elevado poder calorífico e com natureza hidrofóbica, bastante semelhantes às propriedades do carvão [66].

3.6.2 Sistemas de armazenamento de energia

Com a produção e fornecimento contínuo de energia a partir de fontes renováveis, torna-se necessário a adoção de um sistema de armazenamento de eletricidade que seja económico e fiável, permitindo assim ultrapassar as variações na produção a partir de fontes renováveis.

Sendo que os painéis fotovoltaicos apresentam uma produção nula durante a noite e atingem o seu pico de produção a meio do dia, a integração de um sistema de armazenamento funciona como estabilizador da energia fotovoltaica produzida e permite a redução das necessidades de rede elétrica, evitando a compra de grandes quantidades de energia durante as estações frias e a entrada de grandes quantidades de eletricidade durante as estações quentes [49].

As baterias de lítio e chumbo-ácido são as soluções de armazenamento de energia eletroquímica mais comuns no mercado, mas apresentam limitações, como por exemplo, não são capazes de suportar ciclos de carga-descarga profundos devido à corrosão do eletrodo [49, 60].

Os principais requisitos no processo de seleção de uma bateria são a segurança e a fiabilidade. As “*vanadium redox flow batteries*” apresentam mais de quarenta anos de vida útil do eletrólito, não é explosiva, tem capacidade de descarga profunda a 100% e não tem autodescarga, apresenta baixa necessidade de manutenção e é reparável. Para além destas vantagens associadas, esta é a opção que otimiza o equilíbrio entre a eficiência do sistema, o seu ciclo de vida e o custo de produção de energia, conforme é possível verificar na Tabela 3.8 [59]:

Tabela 3.8 – Principais indicadores das soluções de baterias mais frequentes no mercado [59]

ECES technology	Gravimetric Energy Density (Wh.Kg ⁻¹)	Round-trip efficiency (%)	Cycle life (cycles)	Energy cost (2016) (€/kWh)	Energy cost (2030 prediction) (€/kWh)
Lead acid	25-50	75-85	3000	147	74
Lithium ion	100-200	95	4000-8000	352	147
NaS	120-150	85-90	4300-6000	368	162
Vanadium RFB	10-50	80	»13 000	347	119

Os sistemas de armazenamento de vanádio são constituídos por dois tanques, sendo que um contém um eletrólito positivo e o outro um negativo. O vanádio encontra-se dissolvido em ácido sulfúrico nos dois eletrólitos, no entanto em estados de oxidação diferente, o que possibilita uma redução de perda de eficiência por fenómenos de *crossover* [49].

A energia proveniente do módulo fotovoltaico é fornecida aos elétrodos das células, provocando um movimento de eletrões do sentido positivo para o negativo que, após o líquido ser bombeado de novo para o tanque, carrega a bateria. O processo de descarga é análogo e inverso (Figura 3.26) [49].

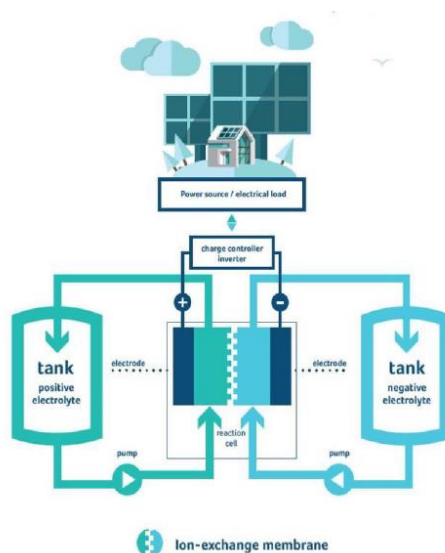


Figura 3.26 – Funcionamento das baterias de vanádio [49]

O custo de instalação destes sistemas de armazenamento de vanádio é a sua maior limitação mas, com o desenvolvimento tecnológico, está prevista uma redução próxima dos 66% até 2030 [49].

3.6.3 Bombas de calor

As bombas de calor são utilizadas como sistema de climatização e de aquecimento de água nas habitações. Caracterizadas por um equipamento de refrigeração que transmite, por trabalho, o calor no sentido inverso do escoamento normal, isto é, da região mais fria para a mais quente [49, 67].

Nas habitações, as bombas de calor mais comuns são as que utilizam o ciclo de compressão de vapor, sendo que estas também se podem basear no ciclo de absorção. Nas de ciclo de compressão de vapor, existem dois permutadores de calor integrados que permitem a utilização do calor latente que resulta da mudança de fase de uma dada substância. Um dos permutadores funciona como evaporador e outro como condensador, sendo que no primeiro a pressão do fluido é reduzida até provocar a sua evaporação e necessidade energética, que resulta num arrefecimento das zonas próximas circundantes. No condensador ocorre o processo inverso, o fluido passa de vapor a alta pressão ao estado líquido, traduzindo-se num excesso de energia que é transferida para as proximidades. O compressor transmite o trabalho necessário para o funcionamento do sistema através das variações de pressão, permitindo que o vapor a alta pressão circule para o condensador (Figura 3.27) [49, 67].

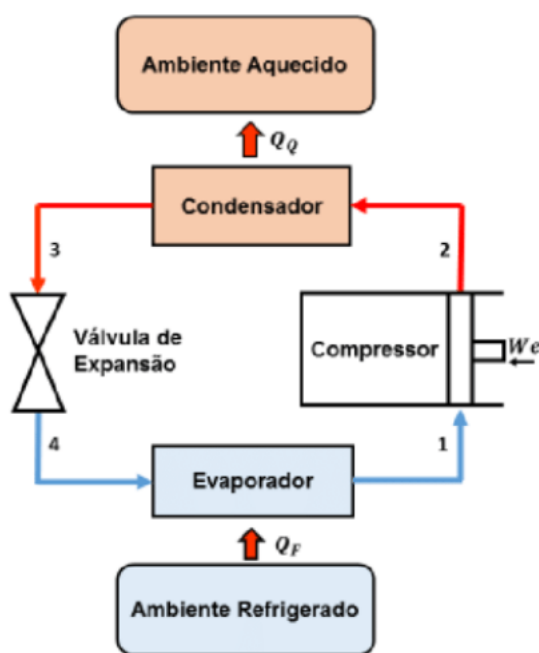


Figura 3.27 – Funcionamento do ciclo de compressão de vapor [68]

Existem quatro tipos diferentes de sistemas para as bombas de calor: ar-ar, ar-água, água-ar e água-água. O sistema mais utilizado é o ar-ar e apresenta grande dependência da temperatura exterior, sendo muitas vezes crucial a integração de uma resistência elétrica de forma a captar a energia necessária. O sistema ar-água é já uma solução comum em edifícios de grandes dimensões, utilizada para recuperação de calor e aquecimento de água. O sistema água-ar utiliza a água como fonte de aquecimento e arrefecimento, sendo uma opção interessante devido à sua temperatura natural elevada e constante [49].

3.6.4 Piso Radiante

A gestão climática interior é possível através do piso radiante, que funciona como sistema de aquecimento e arrefecimento central. Este sistema é aplicado a um nível imediatamente inferior ao do pavimento e transmite a energia por condução, convecção e radiação [56].

O aquecimento por piso radiante apresenta a vantagem de utilizar água a baixa temperatura, o que exige um menor consumo energético. É também possível o aproveitamento de poços no local de construção e instalação de bombas, resultando numa melhoria significativa da eficiência do processo de arrefecimento por piso radiante. É adaptável aos sistemas de produção de água quente como coletores térmicos e bombas de calor, e pode ser aplicado com vários tipos de configuração (Figura 3.28) [49, 56].

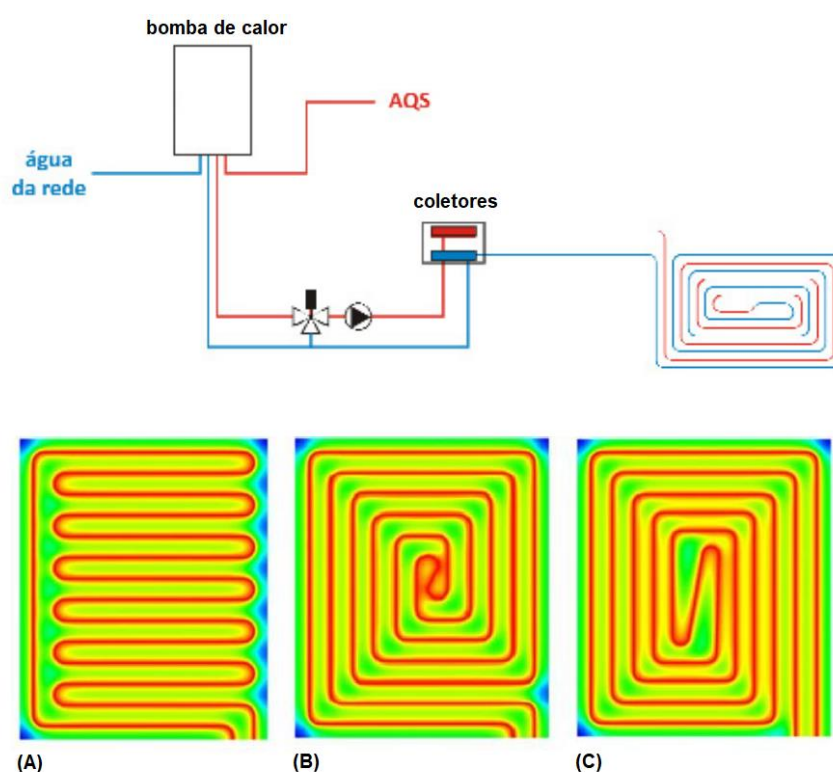


Figura 3.28 – Funcionamento do piso radiante (em cima) e configurações mais comuns: serpentina (A), espiral em contracorrente (B) e espiral modular (C) [49, 69]

3.6.5 Ventilação mecânica controlada (VMC)

A ventilação mecânica controlada (VMC) é um elemento ativo muito importante nas habitações modulares em madeira, uma vez que permite a renovação do ar no interior da habitação sem perdas de energia significativas, e é essencial para a preservação e manutenção das estruturas e elementos em madeira. A VMC é um sistema de ventilação para habitações que promove a renovação do ar dentro de um espaço fechado, graças a diferentes mecanismos (Figura 3.29) [56].

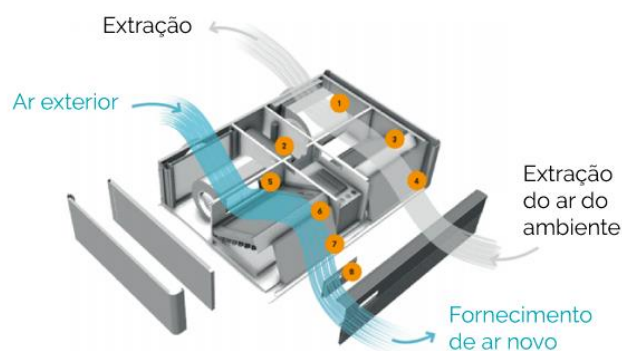


Figura 3.29 – Ventilação Mecânica Controlada (VMC) [70]

É uma excelente solução para habitações em zonas mais húmidas, pois evita a acumulação de humidade e odores mais intensos, apresentando uma série de vantagens associadas a todo o tipo de habitações:

- Promove a ventilação da casa, removendo o ar poluído e renovando o ar no interior da habitação, reduzindo assim o risco de doenças respiratórias e alergias;
- Contribui para a eficiência energética da habitação, evitando a necessidade de abrir as janelas e/ou portas para ventilação natural, o que iria implicar perdas de energia significativas e um aumento dos custos de climatização. Assim, promove o conforto térmico e a redução dos custos associados;
- Promove o controle de humidade, ou seja, remove o excesso de humidade e evita condensações. Ajuda na prevenção de bolores, que é prejudicial para a saúde;
- Promove a conservação dos materiais utilizados na construção da habitação (com destaque especial para a madeira);
- Facilidade de instalação sendo indicado para construções onde não é possível a passagem de tubos, sendo portanto uma boa solução para renovações.

Em geral, a ventilação mecânica controlada é uma solução eficaz e eficiente para a melhoria da qualidade do ar interior das habitações e para o aumento da eficiência energética das mesmas. Existem dois tipos de sistema de ventilação mecânica controlada: o sistema de fluxo simples e o sistema de fluxo duplo, sendo que este último pode ser instalado com um dispositivo de recuperação de calor [41].

3.6.5.1 Sistema de fluxo simples

Os sistemas de VMC de fluxo simples extraem o ar mecanicamente do ambiente confinado e canalizam-no para o exterior. Esta é a solução de VMC mais simples, económica e que permite que as entradas de ar fresco sejam de controlo autorregulável ou com sensor, adaptando-se ao

nível de humidade no interior da habitação. Existem várias soluções de instalação baseadas no tipo de ventilador de extração: unidades centralizadas ou descentralizadas [71].

A unidade centralizada é, por norma, colocada numa posição remota para maior conforto acústico. A entrada de ar fresco é feita através de grelhas especiais localizadas nas paredes perimétricas ou mediante caixilhos de portas e janelas [71].

Nas unidades habitacionais, o ar é geralmente extraído das divisões que contêm maiores índices de humidade (como cozinhas, casas de banho ou lavandarias) e, por outro lado, o ar fresco é introduzido nas divisões que são utilizadas durante períodos de tempo mais longos (como quartos e salas de estar).

Nos edifícios de serviços, a extração é realizada nos corredores, através da colocação de grelhas especiais no teto ligadas às condutas de extração, enquanto que a entrada de ar fresco é feita nos escritórios e divisões com maior taxa de ocupação por metro quadrado (Figura 3.30).



Figura 3.30 – Sistema de fluxo simples [72]

3.6.5.2 Sistema de fluxo duplo

Os sistemas de VMC de fluxo duplo garantem o controlo e a eficácia na renovação do ar no interior dos edifícios. O ar fresco é introduzido no ambiente interior por meio de um circuito separado do circuito de extração e consiste num ventilador, condutas e difusores de ambiente dedicados [71].

Através de um sistema de controlo, é possível coordenar a entrada de ar fresco e o fluxo de ar extraído. Os sistemas de fluxo duplo podem ainda diminuir as perdas de energia com a instalação de recuperadores de calor, que realizam trocas térmicas entre o ar de exaustão e o ar exterior do sistema de ventilação, contribuindo assim para a eficiência energética do edifício. Para além disto,

estes sistemas podem tratar o ar de insuflação antes de canalizá-lo para o interior do edifício: pode ser filtrado, humificado ou desumidificado, aquecido ou arrefecido. Em relação ao sistema de fluxo simples, permite um melhor controlo da ventilação e evita a entrada de poeiras ou poluição sonora do exterior (Figura 3.31) [71].

O recuperador de calor é um dispositivo integrado nestes sistemas de fluxo duplo que permite o aproveitamento da energia do ar extraído. Através do permutador, ocorre transferência de calor entre ambos os fluxos no interior da máquina, sendo que o fluxo mais quente transfere energia térmica para o fluxo mais frio. Permite um aproveitamento até 95% da energia do ar extraído, assim como refrigerar a casa durante uma noite quente. O ar é filtrado na unidade central para garantir uma maior qualidade do ar no interior do edifício [71].

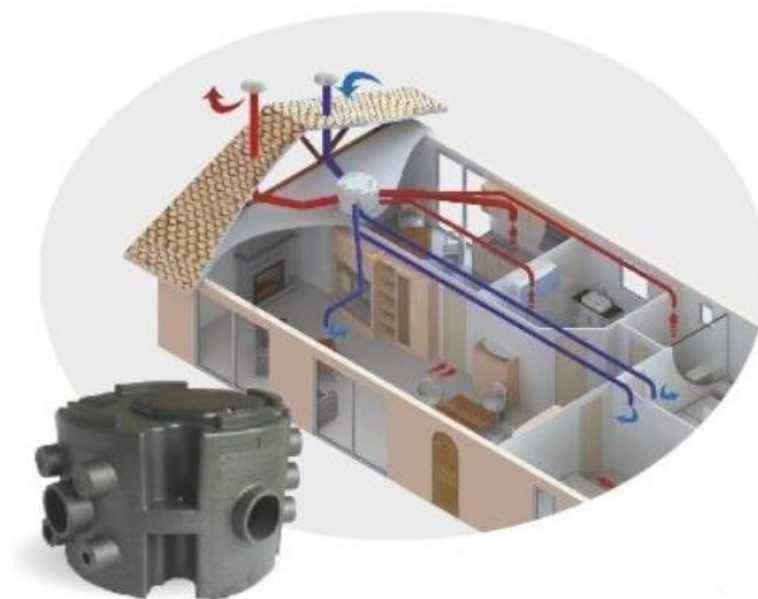


Figura 3.31 – Sistema de fluxo duplo [72]

Os sistemas de VMC de fluxo duplo são geralmente instalados em edifícios com necessidades energéticas muito baixas ou inexistentes, e à sua configuração básica deve ser integrado um recuperador de calor que funciona como sistema de aquecimento e/ou ar condicionado [71].

4

CASO DE ESTUDO

4.1 HABITAÇÃO UNIFAMILIAR

No âmbito do projeto “BlueWoodenHouse” e inserida no conceito de estruturas pré-fabricadas (baixo grau de modularidade) está em fase de construção uma casa protótipo. Trata-se de uma habitação unifamiliar localizada em Fão, Esposende, para a acomodação de 4 pessoas, cujo objetivo prende-se com a construção de uma habitação pré-fabricada, autónoma, isto é, sem necessidade de rede elétrica e de gás. Este local é caracterizado por um clima quente e temperado, com muito mais pluviosidade durante o Inverno em relação ao Verão. Em Fão, a temperatura média anual é de 14,9 °C e a pluviosidade média anual de 1417 mm (Figura 4.1) [73].

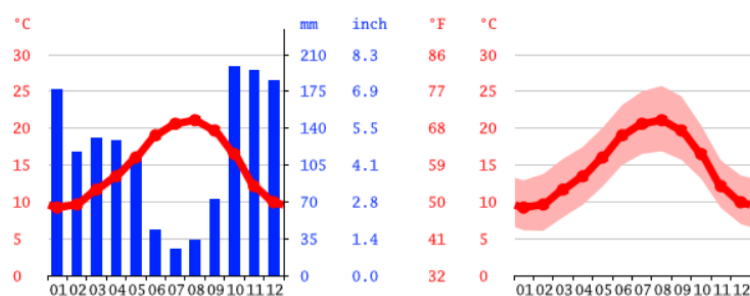


Figura 4.1 – Variações da temperatura média e pluviosidade média ao longo do ano, em Fão [73]

A localização geográfica da residência é 41.51° N e 8.58° W a uma altitude de 21 m em relação ao nível do mar. De seguida é apresentado um esquema tridimensional da habitação e algumas fotografias dos trabalhos executados em estaleiro e da produção dos elementos em fábrica (ver Figura 4.2):



Figura 4 2 – Esquema 3D da Casa Protótipo, estruturas em construção em estaleiro e obras no terreno

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1 Parede Exterior

As paredes exteriores são formadas por uma estrutura de perfis de madeira, com placas de OSB, criando uma composição capaz de resistir a cargas verticais e perpendiculares, transmitindo-as à fundação. Nas paredes são utilizadas placas de 12 mm de OSB.

Existem dois tipos de sistemas. Na parede externa tipo A entre as estruturas de madeira são aplicados os demais materiais: na face externa, poliestireno expandido como acabamento externo, seguida de uma membrana de proteção UV, OSB 12 mm, lã de rocha como isolamento térmico e acústico, uma membrana impermeável e gesso cartonado como acabamento interno (ver Figura 4.3a). Na parede exterior tipo B, a estrutura de madeira está localizada após a membrana impermeável (ver Figura 4.3b):

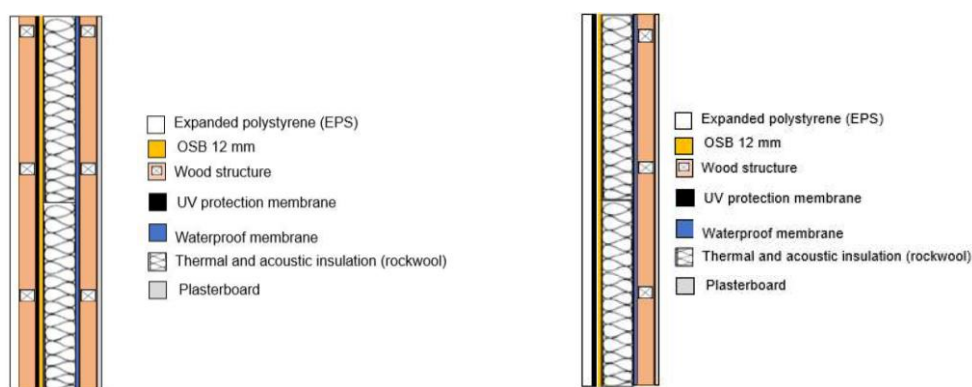


Figura 4.3 – (a) Composição da parede (sistema A) e (b) composição da parede (sistema B)

Relativamente ao OSB (aglomerado de partículas longas e orientadas), de 12 e 22 mm, utilizado este é uma placa de derivado de madeira definida na EN 300 como uma placa composta de várias camadas constituídas por partículas de madeira longas, de determinado formato e espessura, e por cola. As partículas longas de madeira das camadas exteriores encontram-se alinhadas e dispostas paralelamente ao comprimento ou à largura da placa. As partículas da ou das camadas interiores podem encontrar-se dispostas aleatoriamente ou alinhadas, neste caso geralmente na direção perpendicular à das partículas de madeira longas das camadas exteriores.

4.2.2 Piso

O piso está em contato com o solo e é composto por uma base de betão envolvida numa manga plástica, seguido de madeira CL4 (classe de risco 4), lã de rocha, OSB, uma manta de aquecimento (piso radiante) e soalho flutuante (ver Figura 4.4):

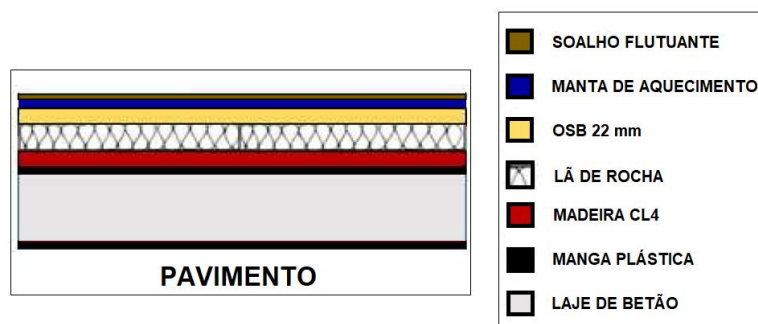


Figura 4.4 – Composição do pavimento

4.2.3 Cobertura

A cobertura é plana e não acessível. Na sua constituição existem os painéis fotovoltaicos apoiados numa estrutura de suporte, seguidos de uma camada de PVC impermeável, OSB de 22 mm, zona de ventilação, proteção respirável, OSB de 12 mm, lã de rocha, uma barreira de vapor, e como acabamento interior um sistema de teto falso. Além do mencionado, a cobertura também possui uma platibanda (ver Figura 4.5).

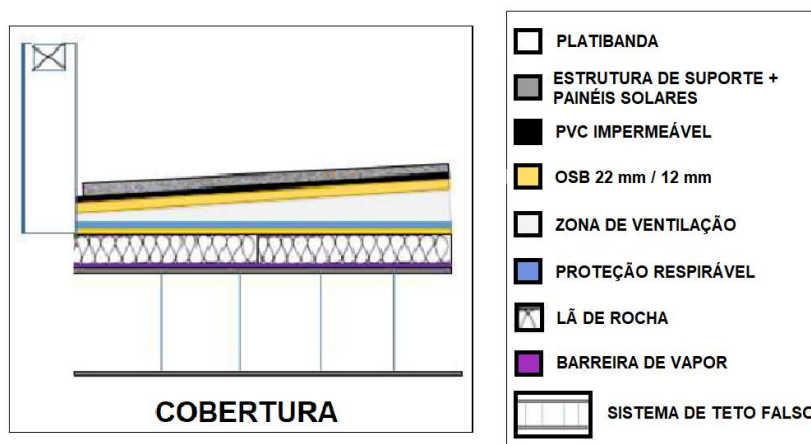


Figura 4.5 – Composição da cobertura

4.2.4 Pormenores das ligações entre elementos

Na ligação entre a parede e o pavimento é utilizado o sistema em plataforma, e tal como na ligação entre a parede e a cobertura, o isolamento térmico de lã de rocha deve ser contínuo, sendo que na cobertura são aplicadas três camadas de isolamento (ver Figura 4.6 e 4.7):

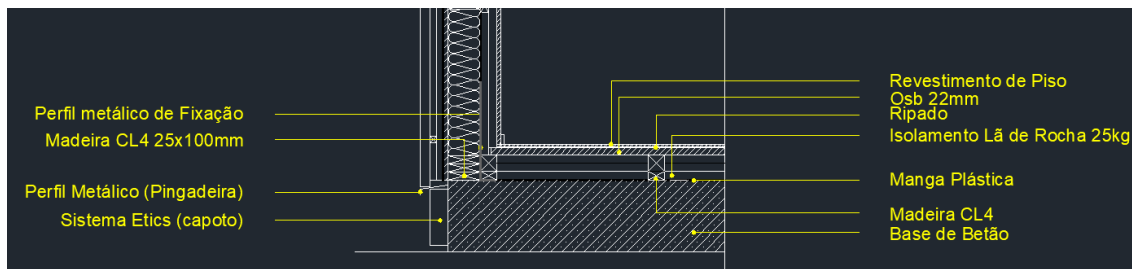


Figura 4.6 – Pormenor da ligação entre a parede e o pavimento

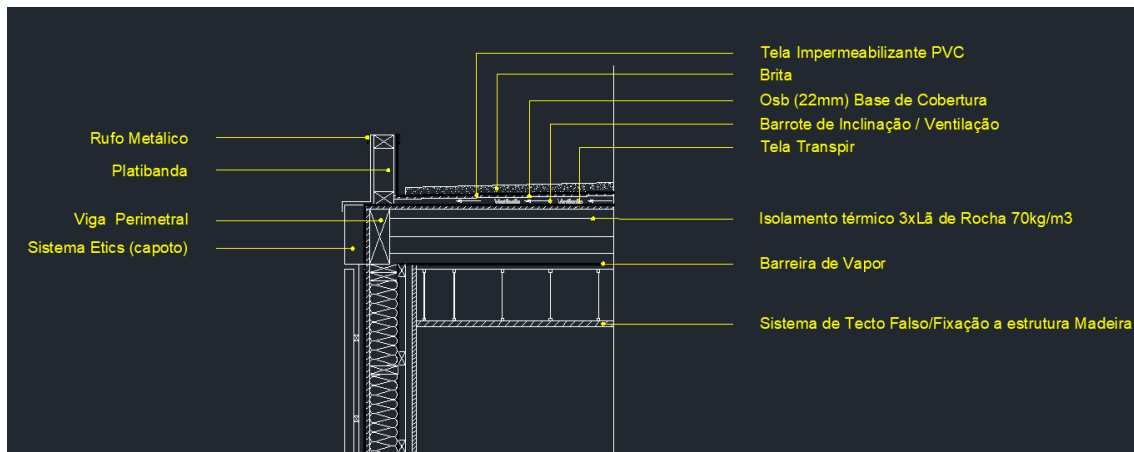


Figura 4.7 – Pormenor da ligação entre a parede e a cobertura

4.3 ENSAIOS AOS MATERIAIS UTILIZADOS

Para além da importância da seleção dos materiais a empregar, é também igualmente importante analisar a conformidade desses mesmos materiais, de forma que a sua aplicação e utilização sejam de acordo com o previsto. De seguida, serão descritos os materiais escolhidos nesta habitação, assim como os ensaios utilizados e previstos nas normas.

4.3.1 OSB

No caso do OSB e de outros dos derivados de madeira utilizados na casa protótipo, foram realizados os ensaios previstos na norma EN 13986+A1 (derivados de madeira para a construção):

- a) Corte dos provetes e condicionamento dos provetes a 20 °C e 65 % de humidade relativa;
- b) Caracterização físico-mecânica que inclui os seguintes ensaios:
 - Determinação da massa volúmica (MV): NP EN 323: 2002;
 - Determinação do teor em água (TA): NP EN 322: 2002;

- Determinação da resistência à tração perpendicular às faces da placa (RI): NP EN 319: 2002 (Figura 4.8);

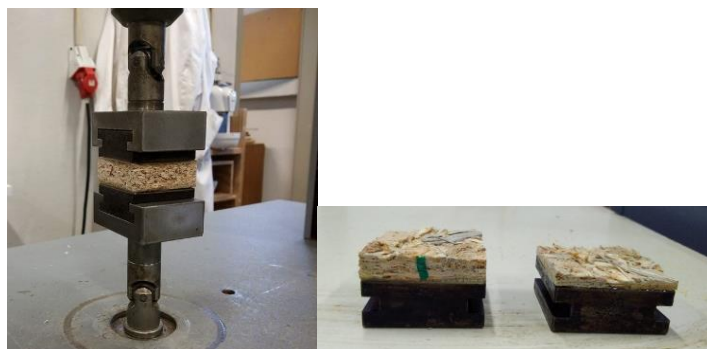


Figura 4.8 – Ensaio de determinação da resistência à tração perpendicular às faces da placa

- Determinação do inchamento em espessura (IE): NP EN 317: 2002 (Figura 4.9);



Figura 4.9 – Ensaio de determinação do inchamento em espessura após imersão em água

- Determinação do módulo de elasticidade em flexão e da resistência à flexão (MOE e RF): NP EN 310: 2002 (Figura 4.10);



Figura 4.10 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade em flexão e da resistência à flexão

- Determinação da resistência à humidade através de ensaios cíclicos (NP EN 321)

4.3.2 Thermowood (32 mm)

A madeira modificada Thermowood® é obtida por tratamento térmico por ação do calor e humidade sem adição de produtos químicos. Trata-se do processo mais conhecido de modificação térmica da madeira e com maior sucesso comercial que teve início na Finlândia em 1993, tendo sido licenciado através da ThermoWood Association (Sandberg et al., 2017). As condições de processamento são as seguintes: teor de água de 10% até ao estado verde, temperaturas de 130/185-215/80-90 °C, duração total de 30 a 70 horas, pressão atmosférica e escoamento em contínuo de vapor para remoção dos produtos voláteis provenientes da degradação da madeira. As espécies mais tratadas são a Casquinha (*Pinus sylvestris*) e a Espruce (*Picea abies*) para utilização em ambiente exterior em varandas, vedações, mobiliário de jardim, portas e janelas e o Choupo (*Populus trembles*) e Bétula (*Betula pendula*) para utilização em ambiente interior, como mobiliário de cozinha, peças de mobiliário, parquet e painéis (Esteves e Pereira, 2009).

Uma das limitações da madeira termo-tratada é a diminuição das propriedades mecânicas. O fator principal da perda de resistência mecânica foi atribuído à degradação das hemiceluloses, que afeta sobretudo a resistência à tração e à flexão, mas também à cristalização da celulose amorfa. Assim, madeira modificada Thermowood® foi caracterizada através dos seguintes ensaios:

- Determinação da resistência à flexão e módulo de elasticidade (NP EN 408:2010+A1) (Figura 4.11);



Figura 4.11 – Ensaio de flexão a 3 pontos de Thermowood®

- Determinação da resistência à tração paralela ao fio (NP EN 408:2010+A1)
- Determinação da resistência à compressão paralela ao fio (NP EN 408:2010+A1)
- Determinação da resistência à tração e compressão perpendiculares ao fio (NP EN 408:2010+A1) (Figura 4.12);

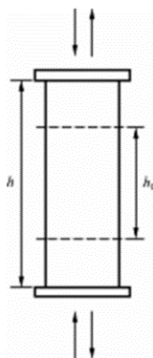


Figura 4.12 – Princípio do ensaio de compressão ou tração perpendicular ao fio

4.3.3 Wood CL4 (28 mm)

A madeira CL4 pode ser usada nas condições de classe de risco 4 (situação na qual a madeira está em contacto direto com o solo e/ou água doce) de acordo com a norma NP EN 335-1: 2011. Para além dos ensaios mecânicos já descritos, serão realizados ensaios de massa volúmica, teor de água e retração.

As propriedades físicas da madeira são determinadas mediante ensaios laboratoriais normalizados realizados sobre provetes de pequenas dimensões. Os provetes devem ser isentos de defeitos (nós, desvios do fio, fendas, etc.), devem ser cuidadosamente orientados, ou seja, com faces correspondentes aos três planos fundamentais - radial, tangencial e transversal; devem possuir o mesmo teor em água. Assim, a Wood CL4 foi caracterizada através dos seguintes ensaios:

- Determinação da massa volúmica (NP EN 408)
- Determinação do teor de água (NP EN 408)
- Determinação da retração (NP 615) (Figura 4.13);

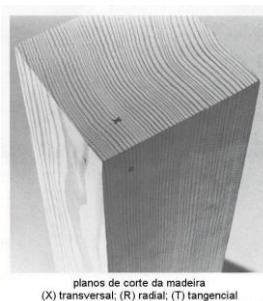


Figura 4.13 – Exemplo de provete para determinação da retração

4.3.4 Floating floor (7 mm)

Uma vez que é utilizado MDF revestido a termolaminado decorativo de alta pressão ou laminado de baixa pressão, são utilizados os mesmos ensaios já descritos para derivados de madeira como o OSB.

4.3.5 Lã de Rocha (100 mm) e EPS (30 e 40 mm)

Como materiais de isolamento térmico e acústico na casa de referência utiliza-se a lã de rocha (Rockwool) (espessura de 100 mm) e poliestireno expandido (EPS), com espessuras de 30 e 40 mm (Figura 4.14).



Figura 4.14 – Materiais de isolamento: Rockwool e EPS

No caso da caracterização dos materiais de isolamento como a Lã de Rocha (100 mm) e EPS (30 e 40 mm) foram realizados os seguintes ensaios:

- Determinação do comportamento em compressão (EN 826:2013)
- Determinação da massa volúmica aparente (EN 1602:2013)
- Determinação da resistência à tração perpendicular ao plano (EN 1607:2013)
- Determinação da resistência à tração paralela (EN 1608:2013)
- Determinação do comportamento em flexão (EN 12089)

4.3.6 Gesso cartonado (32 mm)

As propriedades do gesso cartonado serão avaliadas através da norma EN 14190 (Gypsum board products from reprocessing - Definitions, requirements and test methods). Todos os materiais isolantes foram submetidos ao ensaio de condutividade térmica de acordo com a norma NP EN 12667:2012 – Desempenho térmico de materiais e produtos da construção – Determinação da resistência térmica pelos métodos da placa quente e de fluxometria de calor – Produtos de resistência térmica elevada e média.

- Determinação da Condutividade térmica (NP EN 12667) (Figura 4.15);

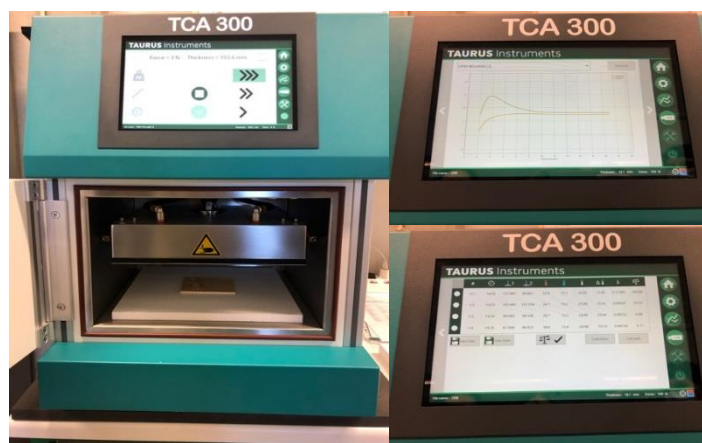


Figura 4.15 – Equipamento para determinação da condutividade térmica onde foi colocada uma amostra de OSB

- Determinação do comportamento de juntas coladas usando o ABES

No caso em que estejam envolvidas juntas adesivas entre diferentes materiais (Figura 4.16) nomeadamente na integração dos painéis fotovoltaicos, será testada a adesão recorrendo ao equipamento ABES (Automated Bonding Evaluation System, Adhesive Evaluation System Inc., Corvallis, OR, U.S.A.).

No equipamento ABES geralmente utiliza-se como substrato duas folhas de madeira (20x117x0.5 mm), de características homogêneas como a faia, unidas por uma linha de cola (adesivo a estudar)

que são fixadas nas extremidades por dois mordentes, que fazem parte da máquina de ensaios. A parte sobreposta com uma área de 100 mm² das duas folhas é prensada a pressão e temperaturas definidas e durante um determinado tempo. No fim do tempo de prensagem estipulado, o conjunto é submetido a uma carga de tração a uma determinada velocidade até à rotura, sendo determinada no final a tensão de rotura, ou seja, a resistência ao corte da junta de cola. Poderão ser utilizados outros substratos para se estudar o comportamento de juntas coladas (Figura 4.17).



Figura 4.16 – ABES (Automated Bonding Evaluation System)

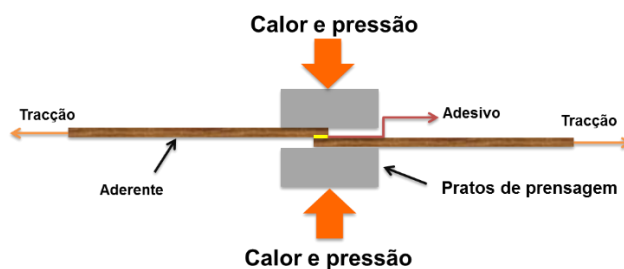


Figura 4.17 – Princípio de funcionamento do ABES (Automated Bonding Evaluation System)

4.4 OUTROS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.4.1 Determinação das emissões de formaldeído e COVs

O ar interior de habitações é frequentemente afetado pela presença de poluentes. Exemplo disso é a emissão de formaldeído pelos derivados de madeira, devido maioritariamente à utilização de resinas à base de formaldeído. Em 2006 foi publicada uma recomendação da “International Agency for Research on Cancer”, referindo que “o formaldeído é carcinogénico para humanos”. Os seus efeitos na saúde são normalmente referidos quanto à natureza aguda (irritação dos olhos, do nariz e da garganta; dores de cabeça, etc) ou crónica (danos no fígado, rim sistema nervoso central, etc). Assim, as entidades reguladoras dos diferentes países, e em algumas situações o próprio mercado, têm vindo a aumentar as restrições às emissões de COVs, e em particular de formaldeído destes produtos. A avaliação e classificação das emissões de formaldeído dos painéis derivados de madeira não são uniformes em todos os países. A Europa, EUA e Japão foram

pioneiros no desenvolvimento de métodos de ensaio e definiram as suas próprias normas e métodos de ensaio para determinar as emissões de formaldeído utilizando diferentes princípios e equipamentos.

A madeira e as placas de derivados de madeira, não libertam somente formaldeído, mas também quantidades detetáveis de outros Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). A utilização de placas de derivados de madeira como material de construção contribui para as emissões de COVs, principalmente terpenos e aldeídos, no seu interior prejudicando assim a qualidade do ar interior. Com o aumento da utilização de madeira e derivados de madeira, impõe-se o desafio de como desenvolver de forma sustentável produtos que atendam às necessidades do consumidor, garantindo sua segurança e respeitando as legislações cada vez mais rígidas impostas por autoridades nacionais e internacionais. Conforme previsto pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (Agenda 2030), a investigação futura nesta área deve-se concentrar na promoção de padrões de produção e industrialização sustentáveis, gestão sustentável de florestas e redução do número de mortes e doenças causadas por produtos químicos perigosos no ar. Assim, e dado que o objetivo é promover a qualidade do ar interior na casa, é importante a medição das emissões de COVs dos produtos utilizados na casa, em particular dos derivados de madeira.

A determinação do formaldeído libertado de placas de derivados de madeira é realizada recorrendo a métodos complexos e morosos. O método de referência europeu - método da câmara (EN 717-1:2004) - determina a emissão de formaldeído libertado por uma amostra, numa câmara fechada e sob condições controladas (23 °C, 45 % HR), em que a duração mínima do ensaio é de 10 dias e a máxima de 28 dias. O método do perforador (NP EN ISO 12460-5:2017), determina o teor de formaldeído da amostra recorrendo a uma extração com tolueno a elevadas temperaturas.

O método da câmara é assim um método demorado, dispendioso, em que apenas se consegue efetuar a determinação sob condições de temperatura e humidade controladas. O método do perforador é rápido e de baixo custo, mas tem o inconveniente de utilizar grandes quantidades de tolueno e por isso ser um método pouco sustentável.

A determinação de COVs é realizada segundo a norma ISO 16000-9 numa câmara de condições controladas. As madeiras de resinosas emitem quantidades substanciais de COVs, principalmente terpenos e aldeídos; enquanto que as madeiras de folhosas libertam principalmente ácido acético e fórmico e menos terpenos. Os terpenos e ácidos são fortemente dependentes das espécies de madeira, enquanto o formaldeído está relacionado com o adesivo. Os COVs como α -pineno, β -pineno, pentanal, hexanal e os Compostos Orgânicos Voláteis Totais (COVsT) são analisados de acordo com o procedimento da norma ISO 16000-6:2011. Os aldeídos como o formaldeído, acetaldeído, pentanal, hexanal são determinados especificamente de acordo com a norma ISO 16000-3:2011.

Para a determinação do teor de formaldeído foram utilizados os seguintes métodos:

- Determinação do teor de formaldeído usando o método do perforador (NP EN 12460-5) (Figura 4.18);



Figura 4.18 – Perforadores utilizados para a determinação do teor de formaldeído

- Determinação da emissão de formaldeído usando o método da análise de gás (NP EN 12460-3).
- Método de análise de gás (NP EN ISO 12460-3) (Figura 4.19);



Figura 4.19 – Câmaras e frascos de recolha utilizados no método da análise do gás

- Determinação do teor de compostos orgânicos voláteis

A determinação da emissão e análise de COVs de placas de derivados de madeiras contempla duas fases: a primeira etapa relativa à colocação dos provetes na câmara e posterior amostragem; e a segunda fase referente à determinação do valor de concentração de formaldeído e Compostos Orgânicos Voláteis Totais (COVsT) (Figura 4.20).

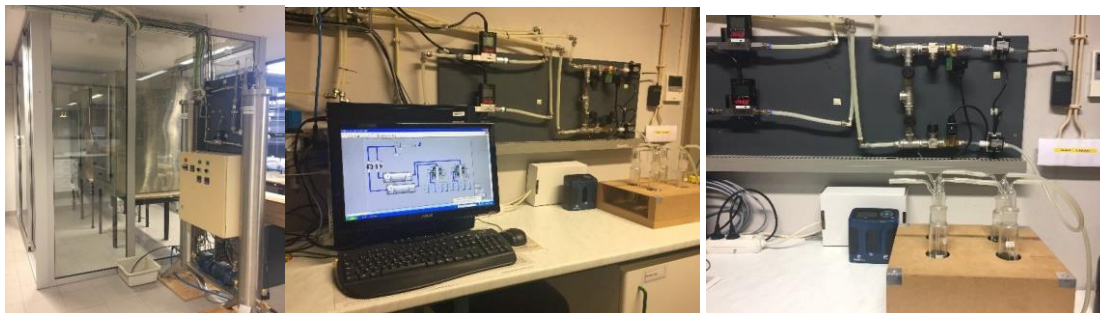


Figura 4.20 – Câmara de emissão de formaldeído e tubos de tenax para recolha dos gases

4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Após ensaiados os materiais, procede-se agora descrição dos resultados obtidos. A realização destes ensaios foi promovida pela empresa responsável pela execução da casa protótipo no âmbito do projeto “BlueWoodenHouse”, e foram fornecidos os dados resultantes para sua análise.

Os resultados aos diferentes isolamentos térmicos, e materiais de construção para aplicação no interior e exterior da habitação, permitindo avaliar o desempenho energético futuro da habitação, que permita minimizar os indicadores de impacto ambiental (indicadores de sustentabilidade). Na Tabela 4.1 apresentam-se os resultados de alguns materiais diferentes usados na construção, interior/exterior da habitação. Apresentam-se as seguintes propriedades para o OSB e para o HDF revestido (Flooring): teor de água (TA), Massa volúmica (MV), inchamento em espessura (IE), resistência à tração perpendicular ao plano ou resistência interna (RI) e resistência à flexão (RF) determinadas de acordo com os procedimentos normativos descritos. No caso da madeira termomodificada Thermowood, foram comparados os resultados com as especificações do produto comercial Lunawood. Compararam-se os resultados com as especificações das normas para cada produto (Figuras 4.21 e 4.22). Em geral o desempenho físico-mecânico é superior considerando as especificações da norma para a mesma classe e espessura.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas de diferentes materiais de construção para aplicação interior/exterior

Produto	Ref. Produto	Ref. Provete	Espessura Provetes (mm)	TA (%)	MV (kg/m ³)	IE (%) 24 hr	RI (N/mm ²)	RF (N/mm ²)
OSB	A - 12 mm	A.01	11.94	7.6	672	9.5	0.66	35.45
		A.02	11.99	7.3	646	12.9	0.69	28.71
		A.03	11.98	7.3	613	13.9	0.78	29.75
		Média	11.97	7.4	644	12.1	0.71	27.10
NP EN 300: 2000 (Placa Tipo OSB/3)			>10<18	>2<10		15	0.32	20 (Long) 10 (Transv)
NP EN 300 2000: (Placa tipo OSB/4)			>10<18	>2<10		12	0.45	28 (Long) 15 (Transv)
Flooring (HDF Rev.)	B - 7 mm	B.01	6.96	6.3	959	0.6	1.70	51.86
		B.02	6.97	6.1	964	0.1	1.66	53.13
		B.03	6.97	6.1	976	0.1	1.74	54.04
		Média	6.97	6.2	966	0.3	1.70	53.01
EN 622-5:2009 (type MDF.HLS)			>6<9			12	0.8	32
Thermowood		C.01	26.8	7.9	552	1.24		52.2
		C.02		8.5	555	1.43		
		C.03	26.9	7.2	559	1.47		43.6
		C.04		8.2	579	1.16		
		Média	26.85	8.0	561	1.3		47.9
Lunawood				7.3	408	1.3		49.1



Figura 4.21 – Amostras de materiais de construção para aplicação no interior/exterior; esquerda – OSB, direita – Pavimento flutuante



Figura 4.22 – Amostra de Thermowood, madeira modificada submetida a ensaio.

Tabela 4.2 – Resistência à flexão do OSB na direção longitudinal e transversal em relação à orientação do fio nas partículas

Produto	Ref. Produto	Ref. Provete	RF (N/mm ²)	Observações
OSB	A - 12 mm	A.L.01	35.45	Os provetes designados por (A.L) e (C.L), significam que o corte e o ensaio foram executados no sentido longitudinal das fibras. Os provetes designados por (A.T) e (C.T), significam que o corte e o ensaio foram executados no sentido transversal das fibras. Relativamente aos ensaios de flexão no OSB (A-12 mm), foram executados novos ensaios que podem ser comparados com o quadro em cima onde foram feitos ensaios só com um corte de forma aleatória.
		A.L.02	28.71	
		A.L.03	29.75	
		Média	31.30	
		A.T.01	18.51	
		A.T.02	17.79	
		A.T.03	20.85	
		Média	19.05	
OSB	C- 22 mm	C.L.01	34.11	
		C.L.02	32.61	
		C.L.03	24.04	
		Média	30.25	
		C.T.01	19.40	
		C.T.02	17.54	
		C.T.03	16.18	
		Média	17.71	

Na Tabela 4.3 está representado os resultados de formaldeído, determinado pelo método da análise de gás (EN ISO 12460-3) de um pavimento flutuante. Na Tabela 4.4 estão os resultados de formaldeído de amostras de OSB usadas pela empresa, usando o método do perfurador (EN ISO 12460-5).

Tabela 4.3 – Determinação do TF - Método da análise de gás (EN ISO 12460-3)

Referência / N° de ensaio	Câmara de ensaio	EF (EN ISO 12460-3) (mg/m ² h)	Classificação (EN ISO 12460-3)	Observações
Parket - Amostra 1 / ensaio 1	Câmara 1	0.64	E1	Análise realizada em 07-01-2022
Parket - Amostra 2 / ensaio 2	Câmara 1	0.58	E1	

Tabela 4.4 – Determinação do TF - Método do perfurador (EN ISO 12460-5)

Referência/Nº de ensaio	TA (%)	Nº Perforador	TF (EN ISO 12460-5) (mg/100g)		Observações
			Sem correção de TA	Com correção de TA	
OSB 12 mm/ensaio 1	7.4	1	0.7	0.6	Análise realizada em 06-01-2022
OSB 12 mm / ensaio 2		2	0.6	0.5	

Os materiais de isolamento usados na construção da habitação modelo, serão submetidos ao ensaio de condutividade térmica de acordo com a norma NP EN 12667:2012 – Desempenho térmico de materiais e produtos da construção – Determinação da resistência térmica pelos métodos da placa quente e de fluxometria de calor – Produtos de resistência térmica elevada e média. Nas Figuras 4.23 e 4.24 estão representados os resultados obtidos de dois materiais isolantes tais como placas de poliestireno (EPS) e placas de lã de rocha.

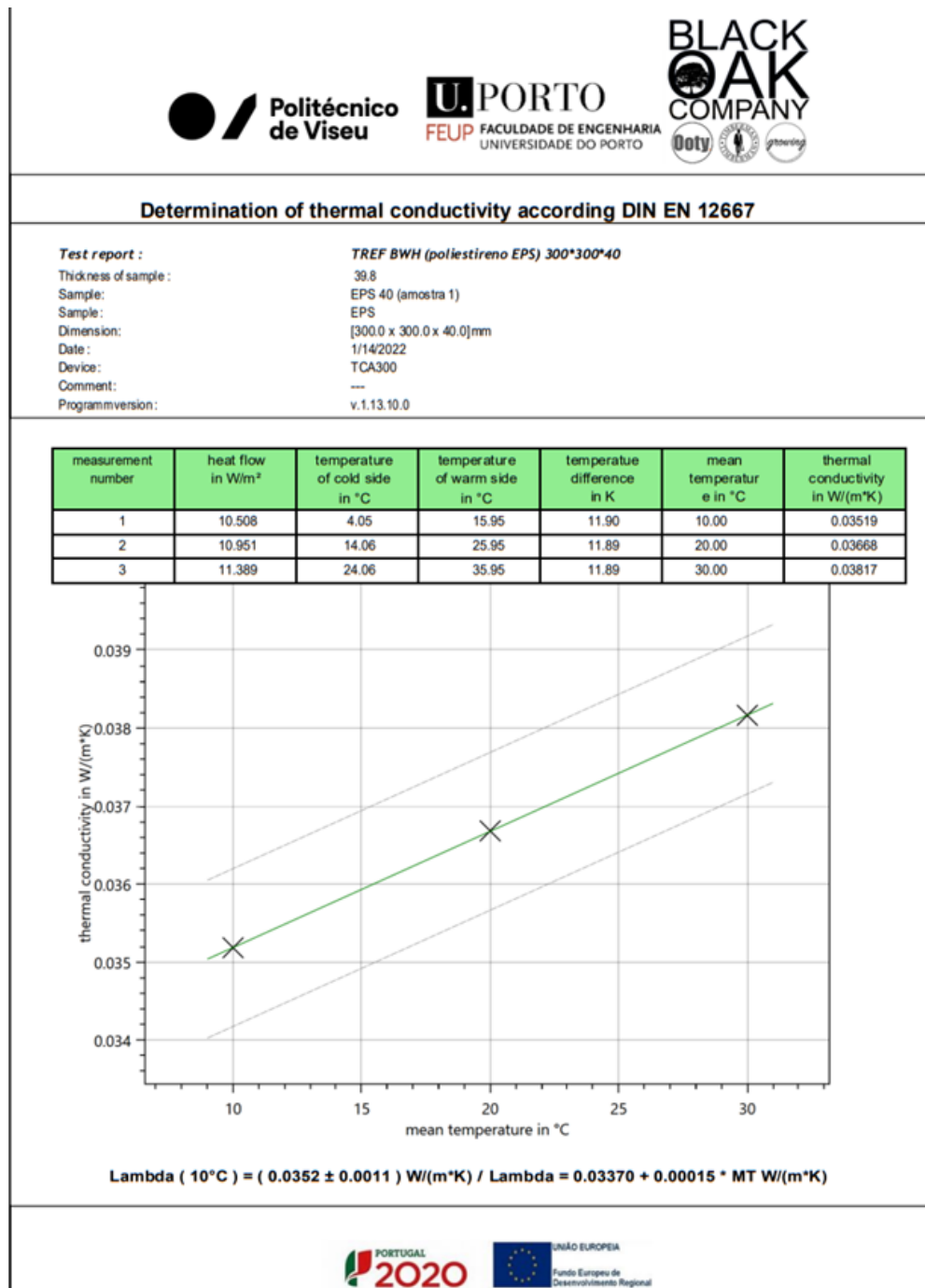


Figura 4.23 – Resultados de condutividade térmica de placas de poliestireno

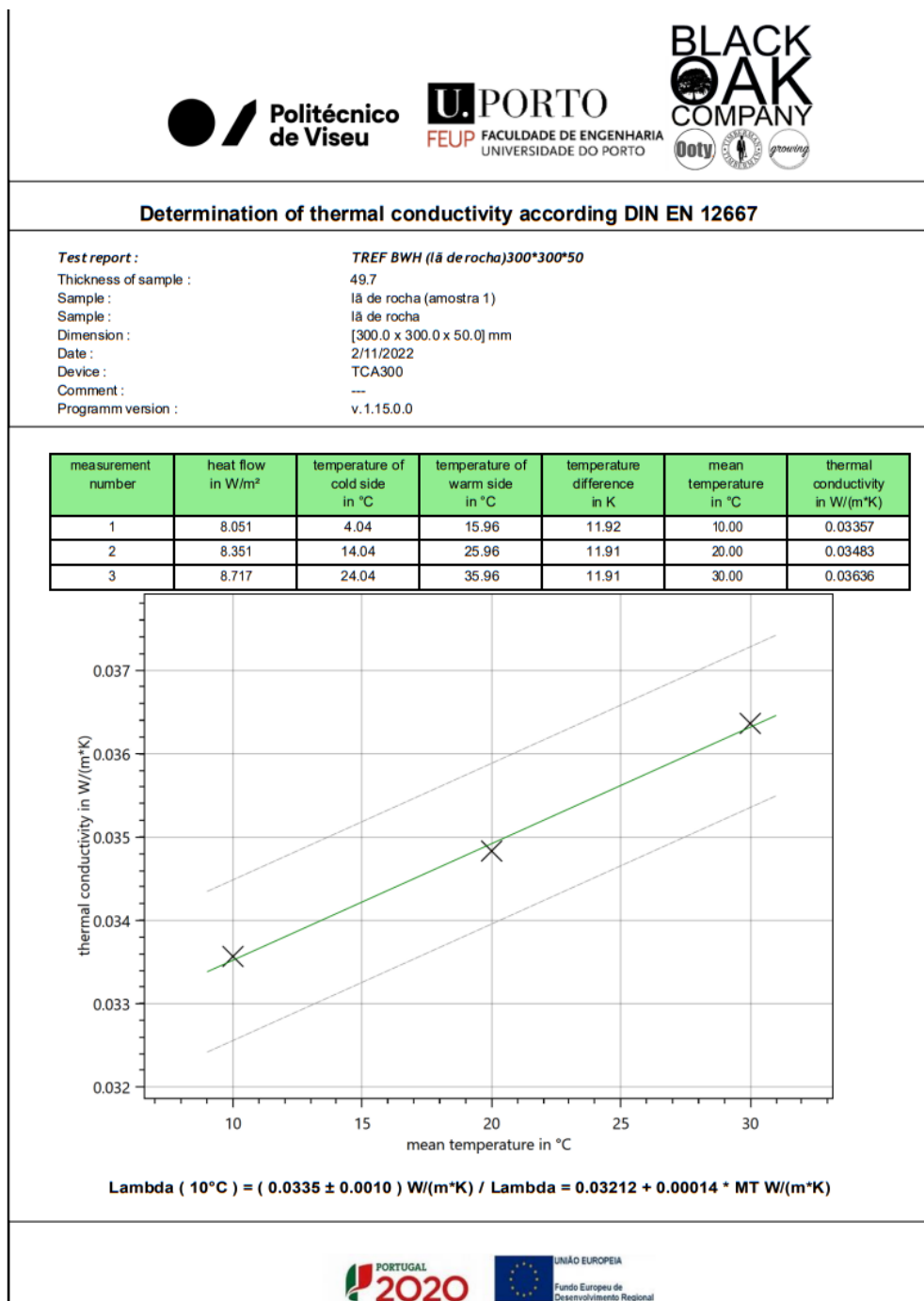


Figura 4.24 – Resultados de condutividade térmica de placas de lã de rocha

4.6 CONCLUSÕES

Ainda que estes ensaios não sejam de carácter obrigatório, visto todos os materiais utilizados estarem certificados, os seus resultados são sempre relevantes, nem que seja para confirmação dos valores expectáveis. A realização dos ensaios fornece uma maior segurança e controlo da qualidade dos materiais. Ainda que os materiais estejam certificados pode ocorrer algum erro de produção, transporte ou acondicionamento que origine materiais ou lotes de materiais com defeito ou cujas características estejam alteradas. Caso ensaiados os materiais, é possível detetar divergências comparando com os valores de referência, logo é mais fácil a deteção de materiais alterados. A aplicação de materiais alterados pode provocar grandes alterações nos prazos de execução e nos custos da obra, pelo que quanto maior o número de mecanismos de controlo de qualidade, melhor.

Estes ensaios podem também ser interessantes para as empresas que tenham por objetivo obter um certificado de sistema construtivo, neste caso “*timber-frame*”. Nesta certificação a empresa é alvo de uma série de avaliações incluindo os materiais utilizados, sendo os ensaios necessários neste sentido.

Relativamente a esta dissertação encontra-se ainda anexado um guia ilustrado para se atingir a eficiência energética e a sustentabilidade, o qual inclui várias das boas práticas aplicadas na execução desta habitação em madeira.

5

CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação e respetiva pesquisa teve como foco principal a construção modular sustentável em madeira, com o objetivo primordial de dar a conhecer e desmistificar esta temática. O objetivo final era, após uma análise sobre a construção modular e a sustentabilidade na construção, a elaboração de um manual ilustrado que explicitasse de forma clara as estratégias para a construção modular sustentável em madeira.

Dada a importância deste assunto e, tendo em vista que a procura da sustentabilidade é um tema cada vez mais abordado e de extrema preocupação por parte da sociedade, procurou-se investigar as características de um sistema de construção que poderá vir a vingar sobre o método de construção tradicional, que continua a ser o mais utilizado em Portugal, atualmente. Devido à problemática associada aos materiais de construção atuais (betão e aço) e à questão sobre quais os materiais mais eco-eficientes, a construção modular em madeira é uma solução construtiva com elevado nível de sustentabilidade nas suas três componentes e de grande eficiência graças à própria sustentabilidade e ecologia associada ao material.

Ao longo do trabalho foi possível compreender que este sistema apresenta diversas vantagens que o tornam num sistema de construção privilegiado, como o facto de este sistema ser adaptável, flexível e, em alguns casos, evolutivo. Este tipo de sistema possibilita que não só a casa obtida seja mais “amiga do ambiente” como também “mais amiga do seu utilizador”, a nível de conforto e de estabilidade.

Este sistema permite que a casa seja “desmontada” e reciclada em fim de vida, aumentada em caso de necessidade ou desejo por parte do utilizador ou transportada se extremamente necessário. Entende-se assim que este tipo de construção permite a adaptação da arquitetura às necessidades e ao estilo de vida do seu utilizador e, ao mesmo tempo, contribui para um planeta mais sustentável.

Por fim, pode-se concluir que apesar da visão sobre a construção modular sustentável em Portugal ainda estar um pouco atrás relativamente ao resto do mundo, atualmente a sociedade está cada vez mais aberta a estas novas opções preocupando-se cada vez mais com os impactes que a construção e as suas vivências têm sobre o planeta.

Em termos de experiência profissional, a elaboração deste trabalho foi extremamente enriquecedora uma vez que me possibilitou o acompanhamento de toda a fase de execução em obra e em fábrica de uma habitação em madeira de alta eficiência energética. Pude assim observar a aplicação de muitos dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso, assim como analisar a implementação de algumas das melhores práticas associadas a este tipo de construções.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação foi descoberto que, apesar da madeira ser uma das soluções mais eficientes e sustentáveis no mundo dos materiais, a maioria das madeiras utilizadas não é proveniente de florestas de madeira certificada portuguesa e as madeiras apesar de certificadas são importadas quando utilizadas. Um ponto importante para o crescimento futuro deste sector construtivo a nível da sustentabilidade seria criar políticas de incentivo à utilização de madeira certificada proveniente de florestas de gestão sustentável nacionais que permitisse a utilização de madeiras portuguesas na construção, tornando-a ainda mais sustentável do ponto de vista da redução da energia desperdiçada no transporte.

Na procura pela sustentabilidade e inserção de materiais reciclados na arquitetura, este tipo de construção permite que, futuramente, possa ser possível a incorporação de plásticos reciclados (provenientes do excesso de plástico existente nos oceanos) na sua constituição, sem prejudicar as condições do seu utilizador e propiciando uma utilização viável para estes materiais.

Por fim, no seguimento desta dissertação, propõe-se para futuros trabalhos a monitorização e análise dos índices energéticos associados à habitação protótipo em funcionamento. Com isto pretende-se uma comparação entre os valores previstos e os reais, sendo que, de forma a ser mais abrangente, este estudo deve ser efetuado para diferentes padrões de utilização

A monitorização da degradação dos vários elementos e componentes construtivos poderá também apresentar interesse no sentido de criar sistemas de manutenção mais eficazes para este tipo de construções.

Seria também interessante analisar as melhores práticas associadas à fase de desmontagem e reciclagem dos elementos e componentes de uma habitação modular em madeira. De forma a melhorar a eficácia dos processos de desmontagem e reaproveitamento destes componentes, o seu estudo e análise são fundamentais, sendo que a elaboração de um manual de boas práticas associadas a estas fases poderá vir a ter grande utilidade.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. L. a. J. R. e. [Core Writing Team, "Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," in "Climate Change 2023," IPCC, IPCC, Geneva, Switzerland, (in press), 2023.
- [2] U. N. E. Programme, "Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.," in "2022 Global Status Report for Buildings and Construction," 2022. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/41133>
- [3] M. C. U. Tenório, "Sistema construtivo em painéis modulares para edifícios coletivos com estrutura de madeira," Mestrado, Construção e Reabilitação Sustentáveis, Universidade do Minho, Universidade do Minho, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1822/81425>
- [4] M. B. Institute. "What is Modular Construction?" <https://www.modular.org/what-is-modular-construction/> (accessed 15 Março, 2023).
- [5] S. F. N. Bertram, J. Mischke, R. Palter, G. Strube, e J. Woetzel, "Modular construction: From projects to products," 2019. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/modular%20construction%20from%20projects%20to%20products%20new/modular-construction-from-projects-to-products-full-report-new.pdf>
- [6] S. Enso, *Building Systems by Stora Enso 3-8 Storey Modular Element Buildings*. 2016.
- [7] T. G. Limited. "Modular buildings UK: The rise to prominence." <https://thurstongroup.co.uk/history-of-modular-buildings/#:~:text=The%20history%20of%20modular%20buildings%20starts%20in%20the%20UK,1940s&context=modular-buildings> (accessed 15 de Março, 2023).
- [8] C. F. F. d. Sousa, "Construções em Madeira," 2006.
- [9] J. A. Faria, "Timber Constructions," 2021.
- [10] A. Caseiro, "O Sistema Construtivo Modular em Madeira como Contributo à Arquitetura Sustentável," Mestrado, Engenharia, Universidade da Beira Interior, 2013.

- [11] J. T. d. S. R. Leite, "Arquitetura em madeira no Arquipélago dos Açores: um estudo sobre desempenho ambiental," Mestrado, Técnico Lisboa, 2019.
- [12] N. A. N. M. d. Silva, "Conceção e desenvolvimento de um edifício modular," Mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Universidade de Aveiro, 2017. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10773/23590>
- [13] M. Nishi. "A MADEIRA ENGENHEIRADA." https://issuu.com/marcelonishi/docs/caderno_final_de_tfg_-_marcelo_nishi/s/10666504 (accessed 20 de Março, 2023).
- [14] V. De Araujo *et al.*, "Is Cross-Laminated Timber (CLT) a Wood Panel, a Building, or a Construction System? A Systematic Review on Its Functions, Characteristics, Performances, and Applications," *Forests*, Review vol. 14, no. 2, 2023, Art no. 264, doi: 10.3390/f14020264.
- [15] P. Santos, L. Sousa, L. Godinho, J. R. Correia, and A. M. P. G. Dias, "Acoustic and thermal behaviour of cross-insulated timber panels," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, p. 103309, 2021/12/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103309>.
- [16] Rusticasa. "O sistema ITS (Insulated Timber System)." <https://rusticasa.com/pt/its/> (accessed 9 de Abril, 2023).
- [17] T. Technology, "Case Study - Stadthaus, Murray Grove, London," 2009.
- [18] "Stadthaus Murray Grove." <https://ecosistemaurbano.org/castellano/torre-de-viviendas-de-madera-stadthaus-murray-grove/> (accessed 10 de Abril, 2023).
- [19] J. A. Faria, "Timber Constructions," 2021.
- [20] "Crane lifting a prefabricated wooden building module to its position in the structure." <https://www.istockphoto.com/pt/foto/crane-lifting-a-prefabricated-wooden-building-module-to-its-position-in-the-structure-gm1323310304-408999946> (accessed 10 de Abril, 2023).
- [21] MFCasasdemadeira. "Casas de madeira modulares." <https://mfcasasdemadeira.pt/casa-modular/> (accessed 10 de Abril, 2023).
- [22] BlackOakCompany. "OOTY." <https://www.ootype.com/home> (accessed 12 de Abril, 2023).
- [23] S. Bourne. "Toda mund, villages & Todas, Neilgherries." <https://www.bl.uk/onlinegallery/onlineex/apac/photocoll/t/019pho000015s10u00060000.html> (accessed 12 de Abril, 2023).
- [24] R. e. Brito. "LA MINERAL C/PAPEL 60MM." <https://rochaebrito.com/LAMINERALC-PAPEL60mmROLO144m2-1011104> (accessed 15 de Abril, 2023).
- [25] H. Soares. "Celulose." <http://www.isolamentospt.com/celulosa/> (accessed 15 de Abril, 2023).

- [26] L. Thermowood. "New Lunawood Thermowood® cladding panels for a rustic look." <https://lunawood.com/new-lunawood-thermowood-spruce-claddings-for-a-rustic-look/> (accessed 15 de Abril, 2023).
- [27] M. F. LDA. "Criptoméria dos Açores." <https://mbgouveia.pt/services/criptomeria-dos-acoress/> (accessed 15 de Abril, 2023).
- [28] J. A. Costa, "Construção Pré-fabricada – Análise da utilização da pré-fabricação nas várias etapas do processo construtivo," Mestrado, Engenharia, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [29] S. European Committee for, *Eurocode 5 : design of timber structure*. Brussels: BSI (in eng), 1994.
- [30] S. European Committee for, *Eurocode 0 : basis of structural design*. Brussels, 2002.
- [31] S. European Committee for, *Eurocode 1 : basis for design and actions on structures* (European prestandard). Brussels: Central Secretariat, CEN (in eng), 1994.
- [32] *CEN – EN 338:2016 - Structural timber - Strength classes*, 2016.
- [33] *CEN – EN 350:2016 - Durability of wood and wood-based products - Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials*, 2016.
- [34] *CEN – EN 408 - Timber Construction*, 1995.
- [35] *NP EN 460 - Durabilidade da madeira e de produtos derivados*, 1995.
- [36] *NP 4305 - Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas - classificação visual*, 1995.
- [37] *DL 101-D/2020, de 7 de dezembro*, 2020.
- [38] *DL 129/2022, de 11 de maio*, 2022.
- [39] *DL 132/2017, de 11 de outubro*, 2017.
- [40] S. Attia, "Chapter 2 - Evolution of Definitions and Approaches," in *Net Zero Energy Buildings (NZEB)*, S. Attia Ed.: Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 21-51.
- [41] R. M. M. Fonseca, "Desenvolvimento e aplicação do conceito nZEB em construções de habitação modular," Mestrado, Engenharia, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia UP, 2014.
- [42] *Diretiva (UE) 2018/844 relativa ao desempenho energético dos edifícios*, 2018.
- [43] *Portaria nº98/2019 de 2 de abril*, 2019.
- [44] *Portaria nº42/2019 de 30 de janeiro*, 2019.
- [45] *Nota Técnica - SCE-02*, 2022.

- [46] Diretiva (UE) 2019/944 relativa a regras comuns para o mercado interno da eletricidade, 2019.
- [47] I. Sartori, A. Napolitano, and K. Voss, "Net zero energy buildings: A consistent definition framework," *Energy and Buildings*, vol. 48, pp. 220-232, 2012/05/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>.
- [48] B. Singh, S. K. Sharma, and P. Syal, "Net Zero Energy Building (NZEB) Design," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, vol. 102, no. 1, pp. 237-247, 2021/03/01 2021, doi: 10.1007/s40030-020-00500-1.
- [49] R. J. d. S. Cerqueira, "Projeto de Construção de uma Casa Energeticamente Autónoma," Mestrado, Engenharia, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.
- [50] A. Rodrigues, "ECO-ARQUITECTURA," Mestrado, Arquitetura, FAULisboa, Lisboa, 2018.
- [51] J. H. M. Pessoa, "Análise da influência das pontes térmicas nos edifícios residenciais," Mestrado, Engenharia, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [52] SmarHousesPortugal. "Importância do isolamento térmico num edifício passivo." <https://www.ecopassivehouses.pt/isolamento-termico-de-uma-casa-passiva/> (accessed 15 de Abril, 2023).
- [53] R. F. P. Oliveira, "Construir segundo requisitos Passivhaus: modelação de pontes térmicas," Mestrado, Universidade de Aveiro, 2013. [Online]. Available: <https://ria.ua.pt/handle/10773/12904>
- [54] PassiveHouseInstitute. "The independent institute for outstanding energy efficiency in buildings." <https://passivehouse.com/> (accessed 15 de Abril, 2023).
- [55] A. M. G. Gonçalves, "Avaliação in situ do desempenho térmico de soluções construtivas," Mestrado, Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2015.
- [56] H. G. e. J. M. Graça, *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. 2004.
- [57] B. P. Institute. "Technically Speaking: What the Blower Door Test Tells You." <https://www.bpihomeowner.org/blog/technically-speaking-what-blower-door-test-tells-you> (accessed 15 de Abril, 2023).
- [58] PrudencioImpermiabilizações. "Porquê optar por Coberturas Ajardinadas?" <https://prudencio.pt/pt/porque-optimar-por-coberturas-ajardinadas/> (accessed).
- [59] A. M. M. d. Almeida, "Rehabilitation Project for an Energy Autonomous House," Mestrado, Engenharia, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.
- [60] C. d. C. Durán, "State of the art and economic viability of a photovoltaic system with energy storage in residential buildings," Mestrado, Engenharia, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2020.

- [61] L. Araújo, M. Soares, A. dos Santos Atherly Pedraça, C. Piedade, and J. Pedraça, "Proposta de Projeto e Estudo de Minigeração Distribuída de Energia Elétrica Fotovoltaica na Cidade de Manaus/AM - Brasil," *European Academic Research*, vol. III, p. 5534, 12/29 2020.
- [62] COPREL. "Climatização, Energias Renováveis e Aspiração Central." <http://www.coprel.pt/produtos-servicos/climatizacao-e-energias-renovaveis/> (accessed 15 de Abril, 2023).
- [63] EDP. "Painéis solares para aquecimento de água." <https://www.edp.pt/particulares/content-hub/paineis-solares-para-aquecimento-de-agua-qual-a-melhor-solucao/> (accessed 15 de Abril, 2023).
- [64] "Paineis Solares - Energia e Aquecimento." <https://paineissolares-energiaeaquecimento.blogs.sapo.pt/977.html> (accessed 15 de Abril, 2023).
- [65] SunEnergy. "ÁGUA QUENTE SOLAR - PAINÉIS SOLARES TÉRMICOS." <https://www.sunenergy.pt/particulares/paineis-solares-termicos/> (accessed 15 de Abril, 2023).
- [66] A. C. O. Ferreira, "Caracterização de vários tipos de biomassa para valorização energética," Mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Universidade de Aveiro, 2013.
- [67] N. Ramos, "Apontamentos de Instalações em Edifícios - AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO," Universidade do Porto, 2022.
- [68] E. Freitas and J. Rosa, *Performance Analysis of a Freezing Tunnel in a Food Sector Company* 2018.
- [69] SolarCondicionado. "Piso Radiante." <https://www.solarcondicionado.pt/piso-radiante-porto-povoavarzim.html> (accessed 16 de Abril, 2023).
- [70] O. Instalador. "Ventilação Mecânica Controlada." <https://oinstalador.com/Artigos/311507-Ventilacao-Mecanica-Controlada.html> (accessed 16 de Abril, 2023).
- [71] N. Ramos, "Apontamentos de Instalações em Edifícios - VENTILAÇÃO," 2022.
- [72] ENAT. "ventilação mecânica controlada." <https://www.enat.pt/artigo-vmc> (accessed 16 de Abril, 2023).
- [73] ClimateData. "Clima Fão (Portugal)." <https://pt.climate-data.org/europa/portugal/fao/fao-553898/> (accessed 16 de Abril, 2023).

ANEXO

Guia de boas práticas para habitações modulares em madeira

Manual ilustrado para se atingir a eficiência energética e a sustentabilidade

Manual ilustrado para se atingir a
eficiência energética e a
sustentabilidade

Guia de boas práticas para habitações modulares em madeira

André Teixeira Pedroso

Índice

1. SOBRE O MANUAL.....	2
2. INTRODUÇÃO	3
3. HABITAÇÃO DE REFERÊNCIA	5
4. FASE DE PROJETO	7
4.1 ORIENTAÇÃO ESPACIAL	8
4.2 ISOLAMENTO TÉRMICO.....	9
4.3 ESTANQUIDADE AO AR	11
4.4 VENTILAÇÃO NATURAL E SISTEMAS DE ARREFECIMENTO PASSIVOS	12
4.5 VÃOS ENVIDRAÇADOS E OUTROS SISTEMAS DE AQUECIMENTO PASSIVOS	13
4.6 SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ...	15
4.7 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	17
4.8 SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO ATIVOS	18
5. FASE DE EXECUÇÃO	21
5.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO EM FÁBRICA .	21
5.2 PROCESSO DE TRANSPORTE	23
5.3 PROCESSO DE ASSEMBLAGEM	24
6. FASE DE UTILIZAÇÃO.....	28
6.1 PROPOSTA DE PLANO DE MANUTENÇÃO.	32
7. FONTES E REFERÊNCIAS PARA CONSULTA	34

1. SOBRE O MANUAL

Este manual foi desenvolvido no âmbito da dissertação de mestrado, sobre “Manual de boas práticas na construção modular em madeira”.

Para facilidade de visualização, ao longo do manual irão aparecer várias listagens destacadas apresentando as boas práticas, com o seguinte formato:



Figura 1 – Formato das boas práticas

O manual é acompanhado de várias ilustrações alusivas.

○ A quem de destina este manual?

Este manual de boas práticas destina-se a todos aqueles que desejam projetar, construir ou utilizar uma habitação modular em madeira *nZEB*. É especialmente útil para engenheiros, arquitetos, construtores, proprietários e utilizadores deste tipo de habitações.

○ Qual o objetivo deste manual?

O objetivo deste manual é fornecer orientações e recomendações para garantir que as habitações modulares em madeira *nZEB* sejam projetadas, contruídas e habitadas de forma funcional e segura, dando especial destaque à sustentabilidade e à eficiência energética. Este manual é um guia ilustrado que apresenta práticas recomendadas que ajudarão a melhorar a qualidade de vida, reduzir os custos operacionais e reduzir o impacto ambiental da habitação.

○ Como utilizar este manual?

Este manual deve ser usado como um guia de referência para projetar, construir e manter uma habitação modular em madeira *nZEB* sustentável e com alta eficiência energética. É recomendado seguir as instruções e orientações contidas neste manual de forma cuidada e sistemática.

No entanto, é importante ressaltar que este manual não deve ser utilizado como substituto para a orientação e o aconselhamento de um profissional especializado. Em caso de dúvidas, contacte um especialista qualificado para obter orientação adicional.

2. INTRODUÇÃO

As habitações modulares em madeira *nZEB* (*Net Zero Energy Building*) são habitações com balanço energético nulo ou praticamente nulo, constituindo assim uma solução inovadora para a construção de habitações eficientes e de forma sustentável. A madeira é um material natural e renovável, tem a capacidade de armazenar carbono e grande versatilidade, podendo ser aplicada em várias vertentes (estruturas, paredes, revestimentos, entre outros). Assim, através da aplicação da madeira nas construções, é possível reduzir as emissões de CO₂ e promover o desenvolvimento sustentável.

Com os seus materiais renováveis e tecnologias de eficiência energética, as habitações modulares em madeira *nZEB* oferecem várias vantagens em relação às habitações tradicionais. No entanto, para garantir que estas habitações sejam concebidas e mantidas de forma sustentável e eficiente, é essencial seguir as boas práticas recomendadas em cada fase do processo.

Este manual de boas práticas inspira-se no caso prático de uma moradia unifamiliar pré-fabricada em madeira, localizada no litoral norte de Portugal. As soluções e técnicas utilizadas nesta habitação são parte integrante das boas práticas apresentadas. As estratégias aplicadas irão ser utilizadas como exemplos de referência ao longo deste manual.

Desta forma, entendeu-se ser vantajoso, para melhor compreensão do leitor, iniciar o manual com uma breve exposição de algumas características importantes desta habitação.

Entendeu-se também que a melhor estruturação seria dividir as boas práticas em três secções principais, duas correspondentes a fases específicas do processo construtivo e outra correspondente à fase de utilização:

- Fase de Projeto
- Fase de Execução
- Fase de Utilização



Figura 2 – Conceito *nZEB*

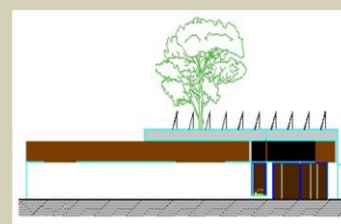


Figura 3 – Habitação de referência

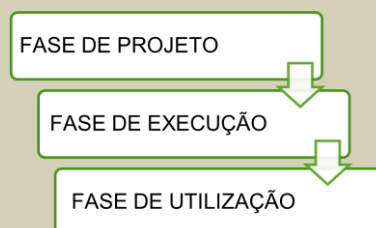


Figura 4 – Estrutura do manual

Estas boas práticas apresentadas de seguida incluem recomendações específicas de aplicação em Portugal, sendo que na fase de projeto irão ser apresentadas as melhores estratégias passivas e ativas e suas recomendações, acompanhadas dos respetivos exemplos de referência. Na fase de execução serão abordadas as boas práticas relativas ao processo de fabricação, de transporte e montagem. Por fim, serão apresentadas as recomendações de manutenção consideradas mais importantes, de forma a garantir que esta seja eficaz. É ainda proposto o desenvolvimento de um plano de manutenção, sendo que caso aplicado a módulos, poderá servir como plano de manutenção padrão para várias habitações.

Cada uma das fases contém boas práticas, acompanhadas de ilustrações alusivas, com o intuito de clarificar as orientações e os conceitos. Apesar de existirem inúmeras recomendações e estratégias que promovam a segurança, a sustentabilidade, a funcionalidade e a eficiência energética, este manual contém apenas as consideradas mais relevantes para as habitações modulares em madeira *nZEB*, dando especial destaque às estratégias de referência adotadas na habitação unifamiliar.

As soluções adotadas em projeto são determinantes para o desempenho energético do edifício, que é classificado através do pré-certificado e do certificado energético do Sistema de Certificação Energética (SCE). A classe energética é determinada com base na comparação do desempenho energético do edifício nas condições em que este se encontra, face ao desempenho que o mesmo teria com uma envolvente e sistemas técnicos de referência. Considera-se que os edifícios devem garantir as condições de conforto dos ocupantes, sendo que os consumos efetivos da habitação podem divergir dos consumos previstos, pois dependem da ocupação e padrões de comportamento dos utilizadores.

Tem-se verificado um aumento das exigências normativas relativas à eficiência energética dos edifícios nos últimos anos. Desde janeiro de 2021, todos os edifícios novos têm requisito mínimo de classe energética A segundo o SCE, o que significa que têm a obrigação de ter um desempenho energético 50% mais eficiente relativamente ao do edifício de referência.

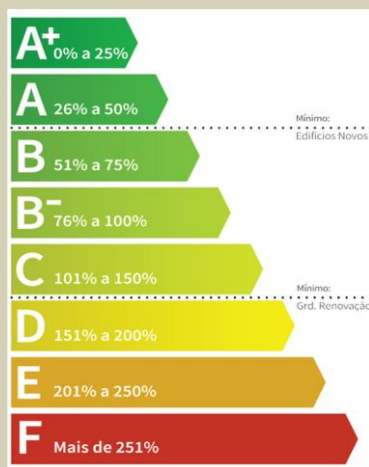


Figura 5 – Classes Energéticas

3. HABITAÇÃO DE REFERÊNCIA

Para este manual, foi adotada como habitação de referência uma moradia unifamiliar pré-fabricada em madeira. A empresa responsável pelo projeto e execução da obra forneceu uma série de dados relativa à mesma (materiais, soluções, ensaios, ...), tendo sido efetuado um acompanhamento da fase de execução.

Esta habitação localiza-se no concelho de Esposende (zona climática I1-V2), a uma altitude de 21m e a distância ao mar é inferior a 5km. É uma fração autónoma de tipologia T3 composta por um hall, uma cozinha, uma sala, três quartos, três instalações sanitárias, duas zonas técnicas e uma garagem. Estamos perante um edifício caracterizado por um sistema construtivo em “timber frame” assente sobre uma laje maciça de betão, tendo sido colocado lintel a todo o perímetro após ensoleiramento geral.

As fundações e a laje de betão não irão ser objeto de análise visto serem um procedimento corrente e comum na construção tradicional.

Dispõe de um pré-certificado energético A⁺. A otimização dos elementos passivos e a adoção de elementos ativos de forma a suprimir as necessidades energéticas previstas foram determinantes para a obtenção desta classificação. Estas medidas devem ser previstas durante a fase de projeto e, quando bem aplicadas, resultam num edifício com necessidades energéticas reduzidas ou mesmo nulas.

Relativamente aos elementos passivos, esta moradia unifamiliar possui vãos envidraçados com as orientações Sul e Oeste, não existe edifício envolvente que provoque sombreamentos e apresenta inércia térmica média. As paredes exteriores e cobertura são com isolamento térmico aplicado pelo exterior e o pavimento com o isolamento térmico pelo interior. Apresenta janelas simplistas compostas por caixilharia metálica com corte térmico, por vidro duplo e por proteção solar pelo interior.



Figura 6 – Modelo 3D da habitação

Descrição	Valor
Altitude	21 m
Graus-dia (18° C)	1282
Temperatura média exterior (I / V)	10,0 / 21,2 °C
Zona Climática de inverno	I1
Zona Climática de verão	V2
Duração da estação de aquecimento	6,6 meses
Duração da estação de arrefecimento	4,0 meses

Figura 7 – Dados climáticos



Figura 8 – Classe Energética A⁺



Figura 9 – Execução do ensoleiramento geral

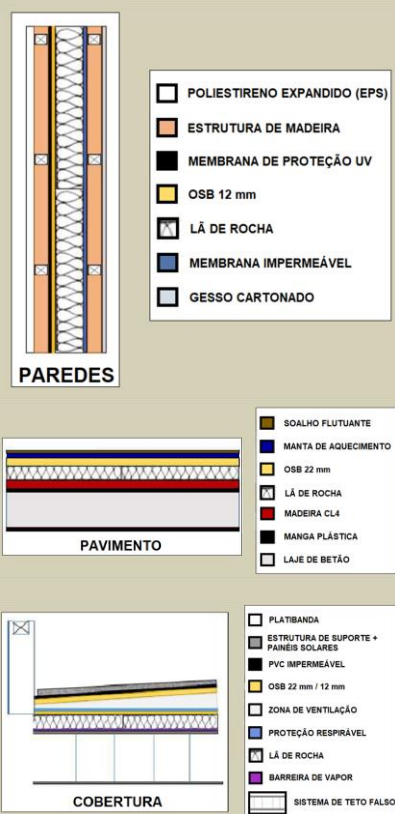


Figura 10 – Constituição das paredes, pavimento e cobertura

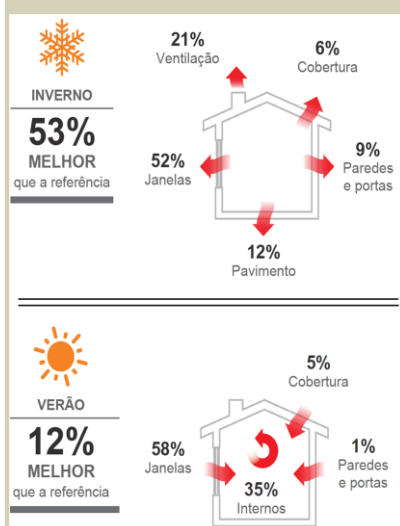


Figura 11 – Consumo energético dos elementos construtivos

As paredes são compostas por uma membrana de proteção UV, uma placa de OSB (12mm), uma camada de lã de rocha como isolamento termo-acústico e uma membrana impermeável, sendo que é utilizado poliestireno expandido como acabamento exterior e gesso cartonado como acabamento interior. O pavimento apresenta uma laje maciça de betão revestida por uma manga plástica, seguida de madeira CL4, uma camada de lã de rocha, uma placa de OSB (22mm), uma carpete de aquecimento e soalho flutuante. Já a cobertura é plana e não acessível, composta por uma tela de PVC impermeável, OSB (22mm), uma zona de ventilação, proteção respirável, OSB (12mm), lã de rocha, uma barreira de vapor e um sistema de teto falso como acabamento interior. Por cima da tela de PVC foram colocadas vigas de madeira CL4 protegidas com barreira de vapor para suporte dos painéis fotovoltaicos.

Os elementos construtivos contribuem para o consumo de energia associado à climatização e para o conforto da habitação, sendo elemento de avaliação do SCE. Para esta habitação, o contributo desses elementos nas perdas de calor (durante o Inverno) é 53% superior ao respetivo valor de referência, e nos ganhos de calor (durante o Verão) é 12% superior.

Após a otimização dos elementos passivos e de forma a suprimir as restantes necessidades energéticas da habitação, foram adotados sistemas ativos para produção e armazenamento de eletricidade e para a climatização e aquecimento de águas quentes sanitárias. A escolha dos equipamentos corretos permite otimizar os custos energéticos e de manutenção durante a vida útil do edifício.

Para produção e armazenamento de energia foram instalados painéis fotovoltaicos (na cobertura) e uma bateria de vanádio (numa zona técnica). Foi considerada uma bomba de calor para aquecimento do ar interior e de águas quentes sanitárias e a integração de piso radiante, que também contribui para efeitos de climatização. Foi ainda adotado um sistema de ventilação mecânica constituído por várias grelhas de admissão de ar e por um ventilador para extração do ar interior, situado numa zona técnica.

4. FASE DE PROJETO

A fase de projeto é uma etapa crucial do processo construtivo. Nesta fase são tomadas decisões que têm impactos diretos e significativos durante a fase de execução, com destaque para a eficiência energética, a segurança, a funcionalidade e a sustentabilidade da habitação.

Este capítulo apresenta uma série de boas práticas para a fase de projeto, desenvolvidas com base em pesquisas e na experiência de profissionais especializados em construções modulares em madeira.

As boas práticas recomendadas neste capítulo centram-se na adoção de medidas que facilitem e melhorem a fase de utilização, através das opções de estratégias e de materiais que, por via dos elementos passivos e ativos, permitem obter uma habitação com altos índices de eficiência energética, beneficiando o utilizador e contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável.

São inicialmente apresentadas as recomendações associadas aos elementos passivos: a orientação espacial, o isolamento térmico, a estanquidade ao ar, a ventilação natural e outros sistemas de arrefecimento passivos e, por fim, os vãos envidraçados e outros sistemas de aquecimento passivos. Ao longo deste capítulo pode-se verificar que todos os elementos passivos estão interligados entre si.

Seguidamente, apresentam-se as boas práticas relativas aos elementos ativos uma vez que, sem eles, não seria possível atingir um balanço energético nulo ou quase nulo. Entre eles: os sistemas de produção e armazenamento de energia elétrica, os sistemas de climatização e os sistemas de produção de águas quentes sanitárias.

4.1 ORIENTAÇÃO ESPACIAL

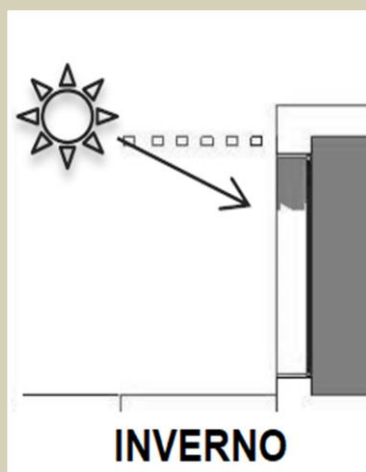


Figura 12 – Incidência solar durante o Inverno

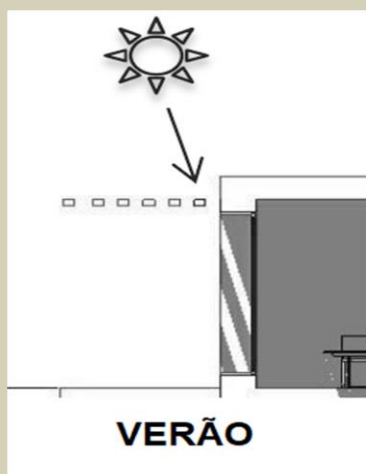


Figura 13 – Incidência solar durante o Verão

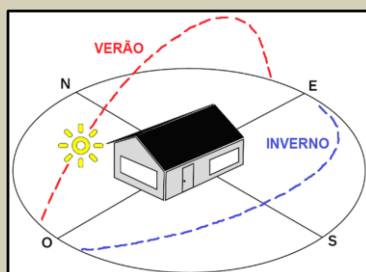


Figura 14 – Orientação da incidência solar

Sendo a radiação solar a única fonte de energia associada aos sistemas passivos, a orientação solar é um elemento crucial na determinação da orientação do edifício, que varia consoante o ambiente climático local e o local de implantação. A correta orientação do edifício permite maximizar os ganhos solares no Inverno e controlar a radiação durante o Verão, aumentando as quantidades de luz e calor recebidas pela habitação, e minimizando a dependência de soluções ativas e de excessiva iluminação artificial.

É uma estratégia que não introduz custos adicionais na fase de projeto e deve também basear-se no padrão dos ventos locais integrados na topografia e edificado envolvente. Estes ventos locais podem influenciar significativamente a ventilação natural, tanto para pior como para melhor, sendo que deve ser adotada uma orientação que optimize a ventilação. Deve também ser prevista a influência da construção nova no padrão de ventos locais, visto que estes não devem causar desconforto aos utilizadores da via pública. Assim, a orientação espacial deve ser escolhida tendo sempre em consideração as necessidades energéticas do edifício e as soluções adotadas.

Em Portugal (hemisfério Norte) é aceite que uma orientação a Sul promove os ganhos por radiação no Inverno, através de vãos envidraçados amplos e eficientes, limitando esses ganhos durante o Verão com estratégias de sombreamento (palas, estores, vegetação envolvente, ...).

Na habitação de referência, uma vez que esta não apresenta edificado envolvente que provoque sombreamento, foi adotada uma orientação a Sul para os vãos envidraçados da cozinha, de dois quartos e da sala, sendo que esta também possui um envidraçado que, assim como o quarto principal, está orientado a Oeste. Foi integrada uma pérgula assente em sapatas de betão e pilares de madeira como sistema de sombreamento para a área exterior de lazer (junto à piscina).

Ainda assim, o local de implantação pode ter uma influência decisiva na orientação do edifício (sombreamento a Sul provocado por edifícios envolventes, por exemplo), tendo de ser analisado caso a caso. Assim são propostas as seguintes medidas para otimizar a eficiência e o conforto térmico das habitações modulares em madeira nZEB:

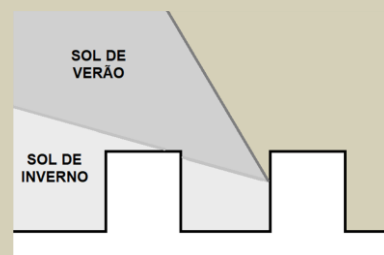


Figura 15 – Influência da urbanização na orientação

- *Aproveite a exposição solar: certifique-se que as principais áreas de estar estão voltadas para Sul (salas de estar, zonas de convívio e quarto principal), o que, através de outros elementos passivos (como por exemplo os vãos envidraçados), permite maximizar os ganhos solares;*
- *Deve haver um compromisso entre a orientação espacial da habitação e o padrão dos ventos locais caso a ventilação seja realizada de modo natural;*
- *Se possível, utilizar elementos envolventes (vegetação, topografia e edificado envolvente) como sistemas de sombreamento.*

4.2 ISOLAMENTO TÉRMICO

O isolamento térmico é um elemento passivo crítico para a eficiência energética do edifício uma vez que reduz significativamente as necessidades energéticas do mesmo, promovendo o conforto térmico e reduzindo os custos de aquecimento e arrefecimento da habitação.

O isolamento deve ser aplicado em todos os elementos da envolvente do edifício e, de forma a prevenir as pontes térmicas, é importante que a sua aplicação seja de modo contínuo.

Uma das vantagens da madeira relativamente aos materiais construtivos tradicionais é a sua baixa condutividade térmica. Assim, a aplicação de isolamento pelo exterior nas paredes exteriores e cobertura é, por norma, suficiente para garantir a sua eficácia. O isolamento do pavimento varia consoante

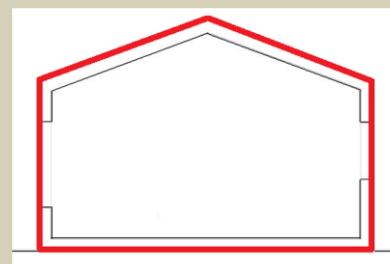


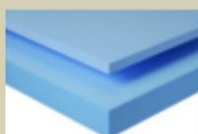
Figura 16 – Aplicação de isolamento térmico em toda a envolvente



MINERAIS



ORGÂNICOS



SINTÉTICOS

Figura 17 – Tipos de isolantes: minerais (lã de rocha), orgânicos (celulose) e sintéticos (XPS)

as soluções adotadas. Na habitação de referência, o pavimento apresenta isolamento pelo interior uma vez que a estrutura de madeira está assente numa laje maciça de betão.

O objetivo do isolamento térmico é minimizar as transferências de energia através da envolvente entre o interior e o exterior da habitação, sendo que podem ser utilizados diversos tipos de materiais para o efeito. Os isolantes podem ser de origem mineral, orgânica ou sintéticos. Os isolantes sintéticos são geralmente provenientes de recursos fósseis. Assim, de forma a contribuir para um desenvolvimento sustentável, deve-se promover a aplicação de isolamentos minerais e orgânicos. A escolha do material depende da sua eficiência térmica, da durabilidade, do custo e do seu impacte ambiental.

De forma a otimizar o isolamento deve-se ter em consideração as condições climáticas locais e possíveis condicionantes do local de implantação. Por exemplo, uma habitação localizada numa planície alentejana não terá tanta necessidade de isolamento térmico como a habitação de referência, localizada no litoral norte de Portugal. A análise destes fatores permite prever as necessidades de isolamento térmico e escolher a solução que melhor se adequa.

Assim, destacam-se as seguintes boas práticas:

- *O isolamento térmico deve ser otimizado para as condições climáticas locais e para as necessidades energéticas da habitação;*
- *Aplicar o isolamento térmico em toda a envolvente de modo contínuo, com especial atenção nas juntas entre os elementos e nos vãos (com destaque para as caixilharias). Caso a envolvente esteja em contacto apenas com o ar, aplicar sempre pelo exterior;*
- *Deve ser escolhido um material com baixa condutividade térmica, de qualidade e de origem mineral ou orgânica;*
- *Caso seja mesmo necessário perfurar o isolamento térmico, deve optar-se por materiais que apresentam a mínima condutividade térmica possível.*

4.3 ESTANQUIDADE AO AR

Tal como o isolamento térmico, a estanquidade ao ar é fundamental na otimização do desempenho energético dos edifícios. A redução das transferências de energia resultantes das trocas de ar e vapor de água entre o interior e o exterior de uma habitação, permitem minimizar as necessidades energéticas da mesma. Evita também a degradação dos elementos construtivos, a entrada de humidades e gases nocivos, o que melhora a qualidade do ar no interior da habitação e aumenta o seu desempenho acústico.

A envolvente da habitação deve ser estanque ao ar e por norma são utilizadas membranas impermeáveis para o efeito. Estas membranas devem ser aplicadas de modo contínuo e são, geralmente, ligadas com fitas adesivas próprias para tal que também são estanques ao ar.

Na moradia unifamiliar foi utilizada uma membrana impermeável nas paredes e uma barreira de vapor na cobertura. No pavimento, foram colocadas mangas plásticas por cima e por baixo da laje de betão, de forma a evitar humidades ascensionais provenientes do solo.

De forma a promover a estanquidade ao ar de uma habitação apresentam-se as seguintes recomendações:

- *Devem ser aplicadas membranas estanques ao ar e de modo contínuo em toda a envolvente da habitação;*
- *É necessário cuidado especial com a aplicação das membranas nas juntas e com as soluções adotadas para os vãos (portas e janelas);*
- *Antes da colocação das membranas é necessário verificar e garantir que a superfície está limpa, seca e livre de substâncias que possam comprometer a aderência.*

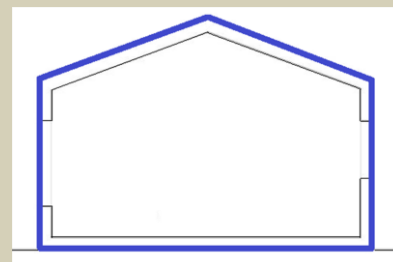


Figura 18 – Aplicação de membrana estanque ao ar em toda a envolvente

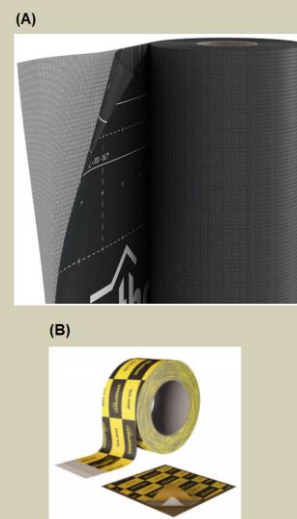


Figura 19 – Membrana impermeável (A) e fita adesiva especial (B)

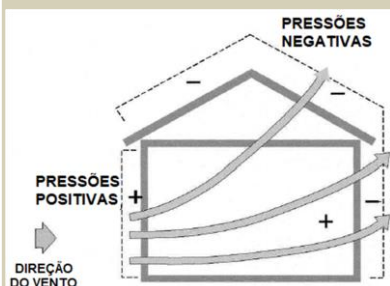


Figura 20 – Efeito do vento

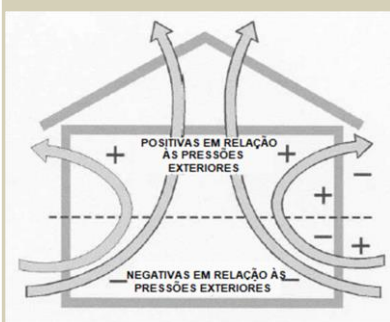


Figura 21 – Efeito chaminé

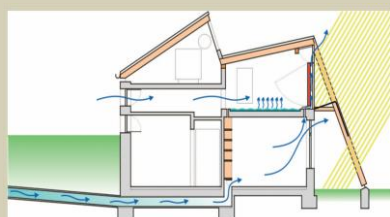


Figura 22 – Arrefecimento através do solo - método indireto

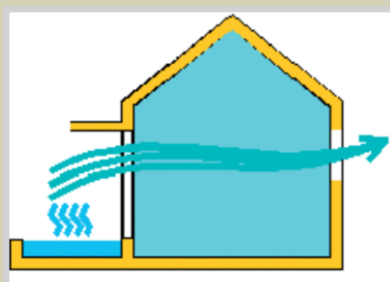


Figura 23 – Arrefecimento evaporativo

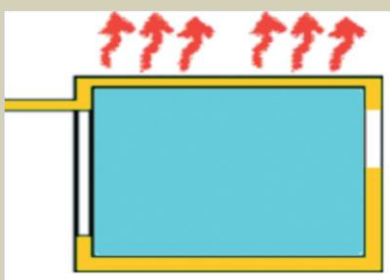


Figura 23 – Arrefecimento por radiação

4.4 VENTILAÇÃO NATURAL E SISTEMAS DE ARREFECIMENTO PASSIVOS

Existem vários sistemas de arrefecimento passivo, sendo a ventilação natural o mais simples de aplicar. As exigências de ventilação são quantificadas através de critérios de qualidade do ar interior e funcionamento de dispositivos a gás.

Na ventilação natural o ar é insuflado através de grelhas ou tubagens, pelos caixilhos dos vãos ligados ao exterior e aquando da abertura dos mesmos, sendo que a exaustão se processa também através dos caixilhos, das frinchas e dos vãos quando abertos, sendo possível integrar uma tubagem vertical ligada ao exterior pela cobertura de forma a extrair o ar. Estes processos ocorrem devido às diferenças de pressão do ar, entre os locais de entrada e saída, e devem-se ao efeito do vento e/ou ao efeito chaminé. Assim, a ventilação natural promove a qualidade do ar no interior e pode ser usada como sistema de arrefecimento, através da regulação das aberturas para entrada de ar.

O solo pode também ser utilizado em sistemas de arrefecimento. Não deve ser utilizado o método direto uma vez que estamos a analisar estruturas em madeira e estas não devem estar em contacto direto com o solo. Ainda assim, pode ser aplicado um sistema indireto que utiliza condutas subterrâneas ligadas ao interior que permitem a permutação de calor com o solo.

Os sistemas de arrefecimento evaporativo são outro exemplo de estratégias passivas de arrefecimento e são caracterizados pela mudança de fase da água do estado líquido para o gasoso, ou seja, a evaporação da água provoca um arrefecimento do ar exterior que por sua vez arrefece o interior da habitação. Existem várias técnicas possíveis como fontes, espelhos de água e mesmo vegetação (evapotranspiração). A habitação de referência apresenta uma piscina que poderá ser usada como tal.

Existem ainda sistemas de arrefecimento por radiação que facilitam as trocas de radiação da envolvente do edifício com o exterior. A aplicação de um isolamento térmico móvel na cobertura permite, às habitações do último piso, um arrefecimento passivo eficaz durante os períodos noturnos e é um exemplo deste tipo de sistemas.

A cobertura verde permite minimizar as trocas de energia entre o interior e o exterior pela cobertura, funcionando como sistema de arrefecimento passivo durante o Verão. Apesar da cobertura verde atuar como um isolamento térmico, recomenda-se a aplicação de uma camada de isolamento térmico entre a camada impermeável e a estrutura do edifício.



Figura 24 – Cobertura Verde

Assim, apresentam-se as seguintes orientações para a ventilação natural e sistemas de arrefecimento passivo:

- *Na ventilação natural, deve-se ter em conta o padrão dos ventos locais e colocar as grelhas estrategicamente, de forma a otimizar a taxa de renovação de ar do edifício;*
- *As grelhas usadas para insuflação de ar devem ter entrada regulável permitindo controlar o caudal de entrada; no entanto, não se deve obstruir totalmente as aberturas de ventilação;*
- *Evitar sistemas híbridos de ventilação natural e mecânica, uma vez que a depressão causada pela ventilação mecânica pode provocar a inversão da tiragem;*
- *Ter atenção à qualidade da água dos sistemas de arrefecimento evaporativo; não deve conter altas concentrações minerais, impurezas ou contaminantes;*
- *Em caso de aplicação de cobertura verde, de forma a melhorar a eficiência da cobertura, deve-se aplicar uma camada de isolamento térmico.*

4.5 VÃOS ENVIDRAÇADOS E OUTROS SISTEMAS DE AQUECIMENTO PASSIVOS

Os sistemas de aquecimento passivo maximizam os ganhos por radiação durante o Inverno. Estes ganhos podem ser obtidos de forma direta, indireta e isolada.

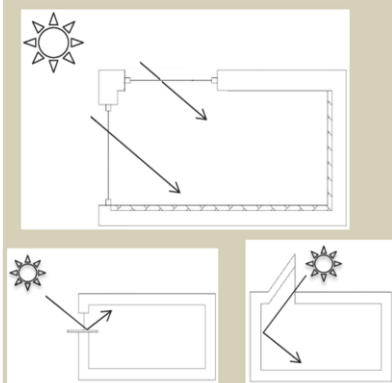


Figura 25 – Sistemas de aquecimento por ganhos diretos

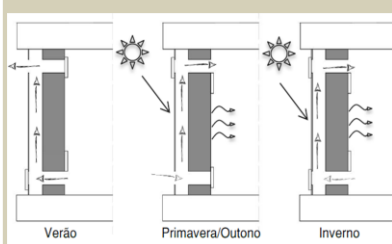


Figura 26 – Sistemas de aquecimento por ganhos indiretos

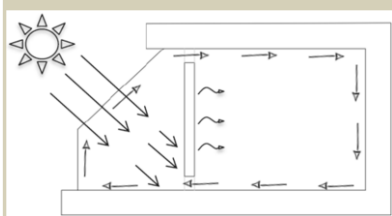


Figura 27 – Sistemas de aquecimento por ganhos isolados

Os sistemas por ganhos diretos correspondem a vãos envidraçados bem orientados e a estratégias de reflexão que permitam maximizar a incidência direta da radiação solar. Deve, no entanto, haver um compromisso entre as necessidades de Inverno e as de Verão, podendo ser adotados dispositivos de sombreamento que controlem a radiação solar incidente, tais como estores, palas, vegetação de folha caduca, entre outros.

Quanto aos sistemas por ganhos indiretos apresentam um elemento de elevada massa térmica que armazena e utiliza a energia da radiação solar para o aquecimento do edifício. Por exemplo, a parede de Trombe é caracterizada pelo efeito de estufa provocado pela colocação de um envidraçado na parte exterior de uma parede com elevada massa térmica. A energia solar é retida no sistema e transferida através de orifícios de ventilação. As colunas e paredes de água apresentam uma lógica semelhante às paredes de Trombe, embora utilizem um líquido (em contentores) em vez de ar. Para além de funcionar como sistema de aquecimento passivo, funciona também para iluminação natural, aproveitando as propriedades transparentes do líquido.

Já os sistemas de aquecimento por ganhos isolados correspondem a estufas ou compartimentos isolados em vidro que captam e armazenam a energia solar que depois é transferida para o edifício por condução e/ou convecção.

Em relação aos sistemas de aquecimento passivo, aconselham-se as seguintes medidas:

- *Orientar os vãos envidraçados a Sul de forma a maximizar os ganhos solares no Inverno;*
- *As caixilharias devem apresentar corte térmico, minimizando as transferências de calor através delas;*
- *A adoção destes sistemas deve prever as necessidades de aquecimento no Verão e, caso necessário, integrar dispositivos de sombreamento para controlo;*
- *A parede de Trombe e os sistemas de ganhos isolados devem apresentar orifícios reguláveis, permitindo o armazenamento de ar e o controlo do caudal de insuflação.*

Após a otimização das estratégias passivas e análise das necessidades energéticas resultantes, devem ser adotados sistemas ativos que permitam suprimir essas necessidades de forma rentável para o utilizador e sustentável para o ambiente.

Estes sistemas ativos correspondem a estratégias de produção de energia (através de recursos renováveis), de climatização e aquecimento de águas sanitárias, sendo também possível adotar estratégias para armazenamento da energia produzida.

4.6 SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

Nos sistemas ativos, a energia elétrica é produzida a partir de recursos renováveis, ou no próprio edifício (*onsite*), através da integração de dispositivos especiais na habitação, ou produzida noutro local e comprada (*offsite*). Os recursos renováveis disponíveis no local de implantação da habitação são, normalmente, a energia solar e a eólica, sendo que os dispositivos mais comuns são os painéis fotovoltaicos e os coletores solares térmicos.

Nos painéis fotovoltaicos a energia é produzida por efeito fotovoltaico através de células ligadas em série. Estes módulos podem ser apoiados em estruturas de suporte (móveis ou fixas) ou integrados na envolvente da habitação. Assim, o sistema fotovoltaico é constituído pelos painéis e por um inversor que transforma a corrente contínua em alternada para alimentação dos aparelhos elétricos comuns. Podem ainda ser integrados um controlador de carga e uma bateria para armazenamento da energia produzida em excesso e, esta energia pode ainda ser exportada para a rede de distribuição, devendo ser adotado um medidor bidirecional para controlo dos consumos e exportações.

Na habitação de referência foram adotados módulos fotovoltaicos na cobertura, cada um composto por 120 células monocristalinas. Os módulos apresentam potência máxima de 405W e eficiência de 21%, com tecnologia multi-barramento para que a captação da radiação seja mais eficiente e apresentam excelente desempenho em condições de baixa luminosidade. Estes módulos estão apoiados em suportes de alumínio com inclinação fixa de 30°.

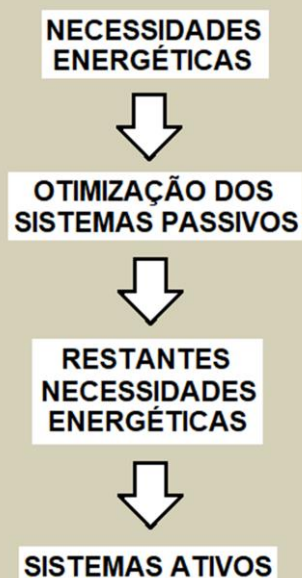


Figura 28 – Metodologia de aplicação dos sistemas ativos

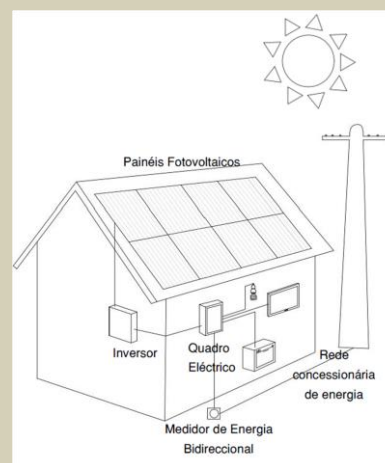


Figura 29 – Sistema fotovoltaico



Figura 29 – Módulo fotovoltaico e suporte de alumínio

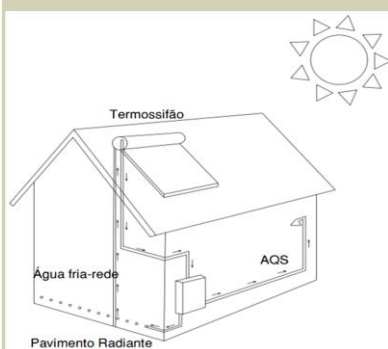


Figura 30 – Sistema termossifão

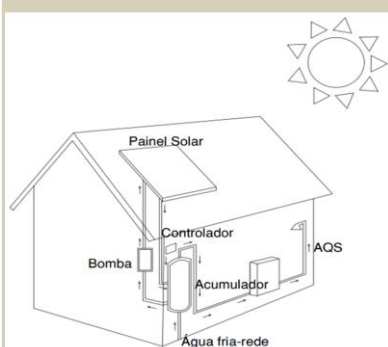


Figura 31 – Sistema de circulação forçada

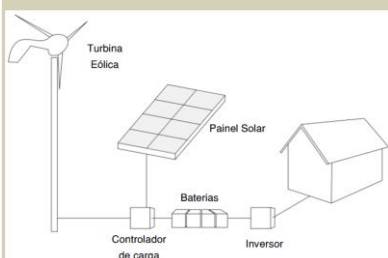


Figura 32 – Sistema híbrido



Figura 33 – Sistema de caldeira de gaseificação de biomassa

Nos coletores solares térmicos, o calor é absorvido por um termofluido presente nas tubagens do painel solar que, depois de aquecido, é transferido para um reservatório que alimenta as necessidades de água quente na habitação e, embora menos comum, de climatização. Existem dois tipos de sistemas de coletores solares: termossifão e circulação forçada. O sistema termossifão é composto pelo painel solar e um reservatório colocados no exterior da habitação, e um sistema auxiliar que garante o abastecimento de água quente com apoio de energia convencional. O termofluido é aquecido e circula para o reservatório devido à sua menor densidade, onde aquece a água que é utilizada nas necessidades da habitação. Podem ainda ser integrados sistemas de climatização ativos, como, por exemplo, o piso radiante. No sistema de circulação forçada, o reservatório é colocado verticalmente no interior da habitação ligado a uma bomba de circulação que desloca o termofluido do painel para o reservatório, e que é gerida por um sistema de controlo com sensores de temperatura integrados. Ao reservatório está associado o sistema auxiliar e podem ainda ser associados dispositivos de climatização.

A energia eólica transforma o movimento mecânico criado pelo vento em energia elétrica através de turbina eólicas. Este tipo de sistemas, por norma, não tem potencial suficiente para alimentar todas as necessidades energéticas de uma habitação. No entanto, poderá estar associado a sistemas fotovoltaicos, constituindo um sistema híbrido que produz energia elétrica a partir do vento e da radiação solar.

Outra estratégia é a adoção de uma caldeira de gaseificação a biomassa, que produz calor através da combustão da biomassa gaseificada. Esse calor é utilizado para aquecimento de águas, como alimentador de energia de pisos radiantes e para aquecimento central

Caso a energia elétrica não seja proveniente destes sistemas integrados na habitação, a energia elétrica comprada deve ser produzida através de fontes renováveis.

Assim, em relação aos sistemas de produção de energia elétrica apresentam-se as seguintes boas práticas:

- *Se possível, adotar sistemas inteligentes de orientação solar para aumento da eficiência do coletor solar;*
- *Nos coletores solares térmicos, deve-se associar o sistema de apoio em série, otimizando a sua eficiência;*
- *No caso (comum) dos painéis fotovoltaicos estarem instalados na cobertura, deve ser instalado um para-raios com dispositivo de ionização, de forma a evitar danos causados por descargas atmosféricas;*
- *A caldeira a biomassa deve ter associado um sistema de ventilação que permita a exaustão dos gases de combustão provenientes do processo de produção.*

4.7 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A energia após produzida pode ser utilizada diretamente nos sistemas de climatização e aquecimento de águas, pode ser exportada para a rede elétrica (através de uma unidade de condicionamento de energia) e pode ser armazenada em baterias. Os sistemas de armazenamento surgem com o intuito de evitar o desperdício da energia produzida em excesso e de reduzir as necessidades de rede elétrica, evitando grandes exportações no Verão e grandes compras no Inverno. Assim, a energia produzida em excesso é armazenada e utilizada nos períodos de produção nula ou baixa. As baterias devem ter um controlador de carga integrado que gere o carregamento das mesmas. Existem vários tipos de baterias, sendo que o seu processo de seleção deve ter em conta as necessidades energéticas e a capacidade de produção de energia elétrica da habitação. A bateria selecionada deve otimizar a relação entre a eficiência do sistema de armazenamento e o seu ciclo de vida com o custo de produção de energia elétrica.

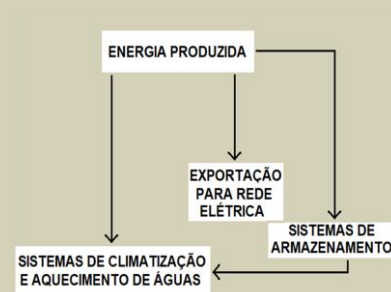


Figura 34 – Utilizações da energia elétrica produzida



Figura 35 – Sistema de armazenamento de vanádio

No caso da habitação de referência, foi integrado um sistema de armazenamento de vanádio que é constituído por dois tanques, um com um eletrólito positivo e outro com um negativo, e uma bateria. Este sistema está localizado numa zona técnica com boa ventilação e encontra-se apoiado num bloco de betão.

- *A utilização de sistemas de armazenamento de energia não dispensa a ligação da habitação à rede elétrica, sendo que esta deve ser efetuada com recurso a uma unidade de condicionamento de energia e a um medidor bidirecional, permitindo a exportação de energia para a rede elétrica e o seu controlo;*
- *O sistema de armazenamento deve estar localizado numa zona com boa ventilação, de forma a facilitar a dissipação do calor produzido durante o processo de carga e descarga;*
- *Estes sistemas devem estar montados em estruturas capazes de suportar o peso associado ao sistema e resistir a vibrações, choques e movimentos acidentais.*

4.8 SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO ATIVOS

Estes sistemas são caracterizados por máquinas térmicas e sistemas de emissão, sendo que as máquinas térmicas são responsáveis pela alimentação dos sistemas de emissão.

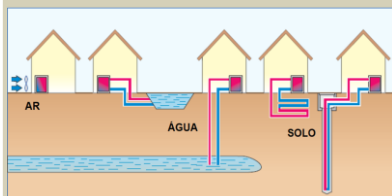


Figura 36 – Principais fontes de calor utilizadas nas bombas de calor

Os coletores solares térmicos e a caldeira de gaseificação de biomassa são exemplos de máquinas térmicas. Outro exemplo são as bombas de calor que, apesar de não produzirem energia elétrica, podem ser utilizadas para climatização central e aquecimento de águas na habitação. As bombas de calor transferem a energia térmica de uma fonte (ar, água ou solo) para o interior da habitação e as mais utilizadas em habitações funcionam à base do ciclo de compressão.

Os sistemas de emissão correspondem a dispositivos que estão associados a máquinas térmicas e que têm por objetivo satisfazer as necessidades de climatização.

Existem vários sistemas de emissão distintos, como por exemplo os radiadores que servem apenas para aquecimento. Este sistema, de forma a garantir a potência necessária, exige que o fluido esteja a elevada temperatura ($>60\text{ }^{\circ}\text{C}$). É possível a combinação de modelos de funcionamento a baixa temperatura com bombas de calor, caso o funcionamento seja contínuo.

Os ventiloconvectores são dispositivos utilizados para aquecimento e arrefecimento de espaços interiores. Estes integram um ventilador que acelera o fluxo de ar emitido pelo ventiloconvetor, aumentando assim a eficiência da troca de calor. A combinação com bombas de calor exige baixas temperaturas de funcionamento para aquecimento ($40\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$). A sua seleção deve ter em conta o nível de ruído produzido.

Outro exemplo é o pavimento radiante que também serve para efeitos de aquecimento e arrefecimento, e foi um dos sistemas ativos adotados na habitação de referência. Neste caso foi aplicada uma manta de aquecimento imediatamente abaixo do soalho flutuante. Este sistema é ideal para aquecimento em combinação com bombas de calor por serem eficazes a baixas temperaturas ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Tal como na habitação de referência, pode ser adotado um sistema de ventilação mecânica controlada, que contribui para o arrefecimento e para o aumento da taxa de renovação de ar da habitação. Neste caso o sistema utilizado foi de fluxo duplo, ou seja, o ar é insuflado mecanicamente através de um ventilador que também extrai o ar viciado. Este sistema deve estar associado a um recuperador de calor de forma a aproveitar a energia do ar extraído. Este sistema contribui significativamente para a melhoria da qualidade do ar na habitação.

Relativamente aos sistemas de climatização ativos, devem ser consideradas as seguintes recomendações:

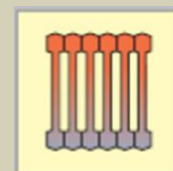


Figura 37 – Radiadores



Figura 38 – Ventiloconvectores



Figura 39 – Pavimento radiante

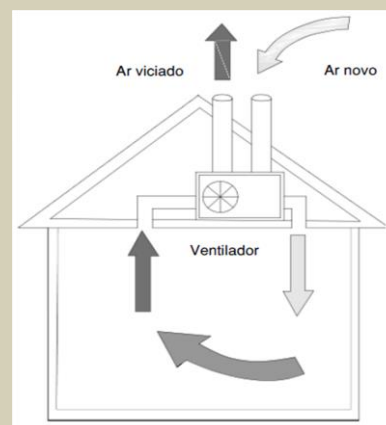


Figura 40 – Ventilação mecânica de fluxo duplo



Figura 40 – Ventilador da habitação referência

- *Uma vez que as bombas de calor ar-ar apresentam elevada dependência da temperatura exterior, deve ser integrada uma resistência elétrica de forma a captar a energia necessária;*
- *Se possível, aproveitar a água de poços presentes no local de implantação (com recurso a bombas elevatórias), de forma a melhorar o processo de arrefecimento do pavimento radiante;*
- *Para otimização do sistema de ventilação de fluxo duplo, deve ser instalado um recuperador de calor, o que permite um aproveitamento do calor presente no ar extraído que resulta numa redução do consumo energético.*

5. FASE DE EXECUÇÃO

Neste capítulo, o processo de execução está dividido na produção em fábrica de módulos e painéis, no seu transporte para o local de implantação e no seu processo de montagem. Esta etapa é fundamental para garantir a qualidade, segurança e eficiência do produto final. As recomendações que se seguem visam o sucesso destes processos, permitindo uma execução conforme a planeada durante a fase de projeto.

5.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO EM FÁBRICA

De forma a garantir a eficiência do processo de fabricação, este deve estar bem organizado através de um planeamento detalhado do processo de produção, incluindo a definição de metas de produção, cronogramas e faseamento detalhado das etapas de produção. Estas etapas de produção devem ser padronizadas ao máximo, de forma a garantir consistência e qualidade do produto. Para isso, recomenda-se a utilização de maquinaria própria para cada processo e formação especializada do pessoal que irá trabalhar com elas. Existem várias máquinas que podem ser adotadas numa fábrica de estruturas e módulos de madeira, como máquinas de corte de madeira, máquinas de prensagem e acabamentos, máquinas para insuflação de isolamento térmico, entre outras. Apesar destes sistemas contribuírem para a eficácia da produção, deve-se sempre ter atenção às medidas introduzidas antes de iniciar cada processo.

A fabricação de componentes, painéis ou módulos em fábricas permitem que a montagem das mesmas no local seja realizada de forma rápida e simples. No entanto, quando as edificações não são padronizadas, é necessário estabelecer as peças e respetivos métodos de ligação, o que pode ser moroso e trabalhoso. É também de extrema importância que as equipas integrantes do projeto estejam em consonância pois as decisões relativas à montagem são tomadas durante as fases iniciais e de planeamento do projeto.



Figura 41 – Organização das madeiras certificadas em fábrica



Figura 42 – Execução da estrutura em madeira



Figura 43 – Insuflação de celulose como isolamento térmico da estrutura



Figura 44 – Selagem da estrutura



Figura 45 – Acondicionamento dos painéis em berço

A fábrica que produziu os elementos da habitação referência utiliza já vários sistemas automatizados. No entanto, a camada impermeável é colocada e selada manualmente, o que exige um cuidado especial por parte do trabalhador para garantir a eficácia da solução, tal como todos os materiais e soluções cuja colocação seja manual. Os processos de produção devem adotar práticas sustentáveis na produção em série, como o uso de madeiras provenientes de fontes sustentáveis, a redução de desperdícios de materiais e a implementação de medidas que permitam minimizar o consumo de energia e água. Apenas devem ser utilizadas madeiras certificadas.

Após produção dos painéis ou módulos, estes devem ser dispostos em berço e protegidos com uma lona plástica, para depois serem transportados para o local de implantação.

Assim, apresentam-se as seguintes boas práticas:

- *Todo o processo de produção deve estar bem planeado e detalhado;*
- *Devem ser adotadas máquinas próprias para automatização dos processos;*
- *Todas as medidas inseridas nestas máquinas devem de ser verificadas cuidadosamente, de forma a evitar erros na produção;*
- *A colocação manual exigida por falta de maquinaria, deve ser efetuada com cuidado por trabalhadores com formação para tal;*
- *Deve ter-se em consideração as medidas máximas do sistema de transporte;*
- *Devem ser adotadas práticas sustentáveis no processo de produção.*

5.2 PROCESSO DE TRANSPORTE

O transporte é um dos fatores que mais influencia no design e nas características geométricas dos elementos. Para que o transporte seja exequível, os elementos são divididos, limitando o tamanho dos painéis, componentes ou módulos e alterando esteticamente a forma final. O transporte dos módulos ou painéis deve ser analisado do ponto de vista da sustentabilidade durante a fase de projeto, sendo que poderá ser uma solução ineficiente do ponto de vista energético caso a distância a percorrer seja demasiado grande.

O meio de transporte mais corrente é o terrestre por intermédio de camiões transportadores, sendo que também poderá ser efetuado por via aérea e marítima.

No caso dos camiões transportadores, deverá ser efetuada uma verificação da acessibilidade do percurso ao camião até ao local de implantação dos módulos e painéis. Estes devem estar bem fixos ao camião, não sendo permitido qualquer liberdade de movimento e protegidos com coberturas impermeáveis. Podem ser utilizados dispositivos de monitorização para controlo do transporte, minimizando os riscos associados e maximizando a segurança.

Os elementos pré-fabricados chegam ao local de obra prontos para serem colocados. A sua montagem é regida por etapas: elevação ou içamento, posicionamento, ajuste, conexão e montagem final. No processo de elevação é necessário garantir que os elementos são içados nos pontos de escolha, ou seja, pontos de levantamento previamente selecionados que coincidem com a distribuição de peso do elemento. Se não for assegurado um correto manuseamento dos elementos durante a fase de elevação estes podem sofrer danos aumentando o custo para a reposição da peça.

Assim, relativamente ao processo de transporte, aconselham-se as seguintes medidas:

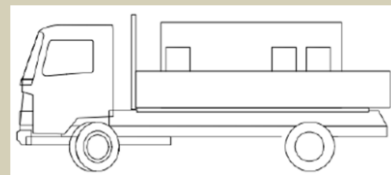


Figura 46 – Transporte de módulo via terrestre

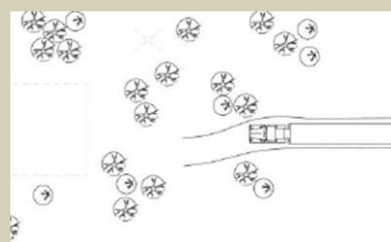


Figura 47 – Verificação da acessibilidade do percurso do camião até ao local de implantação

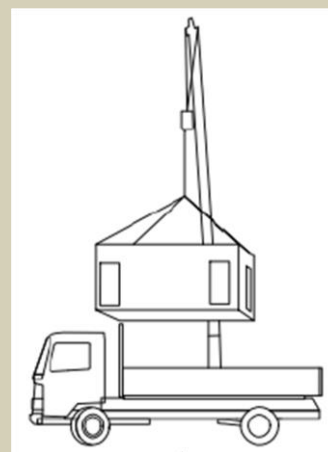


Figura 48 – Transporte com recurso a grua

- Os módulos e painéis não podem ter qualquer liberdade de movimento durante o transporte, sendo necessário uma fixação segura e cuidadosa;
- Devem também de estar protegidos contra os agentes naturais através de coberturas impermeáveis;
- Caso o transporte seja terrestre e efetuado com recurso a camião, deve ser feita uma verificação das condições de acessibilidade, identificando possíveis obstáculos e percursos alternativos;
- Se possível, integrar sistemas de monitorização no processo de transporte para controlo e segurança.

5.3 PROCESSO DE ASSEMBLAGEM

Para facilidade do processo de montagem, conforme referido, o terreno de implantação deverá estar preparado para permitir ao camião transportador acesso ao local de implantação. Caso este não tenha acesso ao local, os módulos terão de ser retirados do camião e colocados no respetivo local de implantação com recurso a guas.

A montagem deve ser efetuada com recurso ao manual de montagem do módulo, que deve definir as estratégias de colocação do módulo no terreno, elevação e montagem do mesmo. Este manual deve ser previamente elaborado pelos responsáveis pela produção do módulo.

Assim, é fundamental que todos os detalhes de montagem estejam anexados aos módulos com todas as informações escritas e/ou desenhadas de forma que não ocorram erros de interpretação que, geralmente, são motivadores de atrasos e custos acrescidos. Os módulos devem de ter pontos estratégicos para permitir a sua elevação através de guas, permitindo a sua colocação em pontos específicos.

De modo a tirar o máximo proveito dos benefícios da construção pré-fabricada deve ser realizado o máximo de trabalho de montagem em fábrica e apenas o necessário no local de obra. A redução do número de intervenções de montagem no local reduz

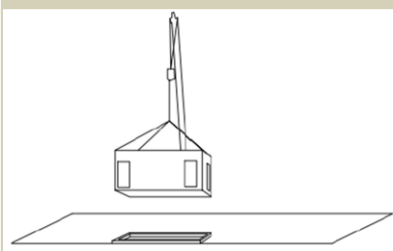


Figura 49 – Colocação do módulo com recurso a grua

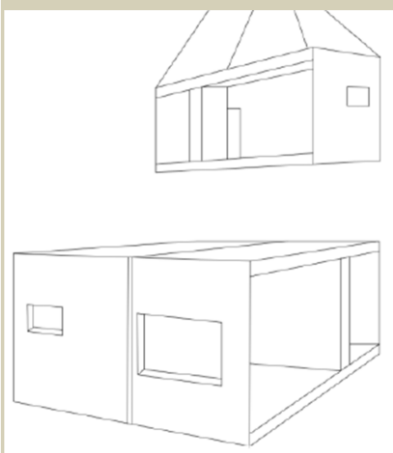


Figura 50 – Assemblagem vertical de módulos

o tempo e o custo de montagem e leva também a uma diminuição de potenciais falhas. Aquando do ato de assemblagem dos componentes é imprescindível o envolvimento das equipas de projeto, que devem conferir o trabalho dos fabricantes e trabalhadores.

Na assemblagem dos componentes é importante considerar diversos princípios logísticos, tais como a minimização dos elementos, o manuseamento e a deteção de quaisquer conflitos. A minimização dos elementos não se refere à dimensão dos mesmos, mas à limitação do número de elementos a serem enviados e montados no local de obra, reduzindo o trabalho de montagem e o número de juntas. Os elementos não devem ser fabricados com dimensões e peso que impeçam o transporte ou o içamento dos mesmos para a localização final.

De modo a evitar erros na fase inicial da fabricação devem ser realizadas simulações de sequenciamento de construção com recurso às ferramentas BIM. A realização de simulações de projeto com BIM antecipa potenciais conflitos que, na construção pré-fabricada, são geralmente entre os elementos pré-fabricados e elementos pré-existentes ou construídos no local de obra.

Embora a pré-fabricação permita que certa parte da assemblagem seja feita em fábrica, a ação dos agentes climáticos pode interferir e criar adversidades na assemblagem *in-situ*, como é o caso das estruturas de madeira laminada. Estas são fabricadas em condições climatizadas e depois enviadas para um local onde os níveis de temperatura e humidade variam dos da fábrica, podendo sofrer tensões que provocam folga entre os painéis ou módulos. O mapeamento da sequência de construção pode ser realizado através de ferramentas digitais como o BIM. No entanto deve haver sempre um certo nível de detalhamento na ordem em que os componentes serão montados.

Caso haja algum atraso não previsto ou outra situação que impeça a colocação dos módulos, estes devem ficar protegidos com as coberturas impermeáveis até ser efetuada a sua assemblagem.

Os módulos já colocados também devem estar protegidos até colocação da cobertura, sendo que devem estar previstos sistemas de escoamento de água nas coberturas temporárias.



Figura 51 – Assemblagem de painéis verticais

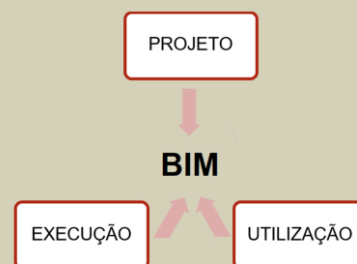


Figura 52 – Abrangência das ferramentas BIM

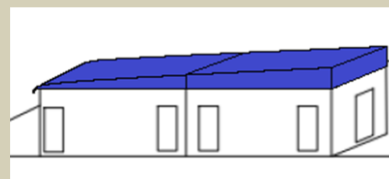


Figura 53 – Módulo de cobertura temporária

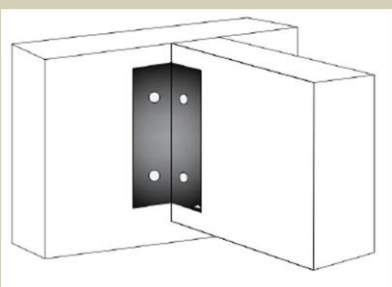


Figura 54 – Ligações metálicas

Geralmente, as ligações entre módulos são efetuadas com recurso a ligações metálicas, através do aparafusamento de chapas metálicas. Existem outros sistemas que não utilizam ligações metálicas, como é o caso das ligações por encaixes: com cola ou macho-fêmea.

As juntas resultam do encontro das sub-asmblagens e têm como função a proteção acústica e o controlo térmico e de humidade. Estas devem ser protegidas das intempéries através de selantes ou por sobreposição.

A utilização de selantes pode ser necessário para o controlo do teor de humidade. Ainda assim, devem ser estudados outros métodos de eliminação das juntas antes da aplicação de selantes químicos. As juntas podem ser reduzidas através de conexões aparafusadas, as quais permitem a desmontagem e posterior reciclagem.

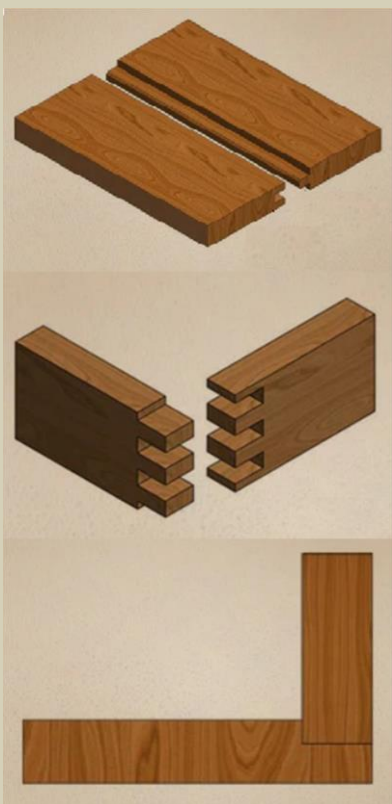


Figura 55 – Exemplos de juntas de elementos de madeira

A construção pré-fabricada permite a redução do número de juntas no sistema e por isso é menor a quantidade de trabalhos relativos a anexação e vedação, e conseqüentemente são menores os custos e o tempo de montagem no local. A eliminação das juntas pode ser realizada através de mecanismos como o encaixe ajustável, encaixe deslizante, junta de topo e junta de bordo.

No mecanismo do encaixe ajustável os elementos devem ser posicionados com precisão e por isso são projetados para que o alinhamento possa ser ajustado durante ou após montagem no local. Uma vez realizado o alinhamento é necessário protegê-lo através de conexões aparafusadas ou por solda.

No mecanismo de encaixe deslizante os elementos sobrepõem-se uns aos outros e são posicionados por deslizamento, acabando por preencher a lacuna.

A técnica da junta de topo é utilizada para unir elementos que se encontram em esquadria. A junta é uma sobreposição de dois elementos, colocados perpendicularmente.

Finalmente, o formato do bordo deve ser cuidadosamente considerado quando este se encontra exposto. Uma borda chanfrada, por exemplo, permite um maior desgaste enquanto uma borda afiada é suscetível a amassar. Assim, os cantos podem precisar de ser moldados e reforçados de maneira diferente dos outros elementos da assemblagem.

No caso da habitação de referência, as juntas são do tipo macho-fêmea e aparafusadas com chapas metálicas.

Uma vez que esta habitação se insere num ambiente climático bastante húmido e a pérgula é constituída em madeira, um dos pilares da pérgula possui um dispositivo elevatório que permite reajustar a altura do mesmo, caso ocorra alguma variação de volume.

Com isto, relativamente ao processo de assemblagem, apresentam-se as seguintes boas práticas:



Figura 56 – Sistema elevatório da pérgula

- *Preparação do terreno para acesso do camião transportador e implantação do módulo;*
- *Deve ser elaborado um manual de montagem detalhado que deve ser anexado ao módulo, não dando margem para erros na execução;*
- *Os módulos devem possuir locais estratégicos para serem elevados por guias;*
- *Até instalação do módulo que integra a cobertura, deve ser adotada uma cobertura temporária que proteja os módulos e escoe a água da chuva;*
- *As ligações devem estar bem apertadas, não podendo haver folgas.*

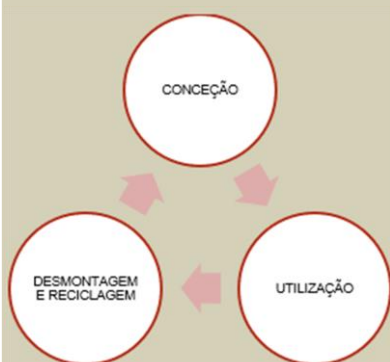


Figura 57 – Ciclo de vida de uma habitação modular em madeira



Figura 58 – Esquema de procedimentos durante a fase de utilização

6. FASE DE UTILIZAÇÃO

O ciclo de vida de um edifício vai desde a sua conceção (projeto e execução), a sua utilização até, por fim, a sua desmontagem e reciclagem, sendo que, por norma, a fase de utilização é a mais longa.

A fase de utilização é de extrema importância para o prolongamento da vida útil da habitação. A correta utilização da habitação combinada com a aplicação de medidas de manutenção preventivas e ativas, permitem um prolongamento da durabilidade da habitação, mantendo o nível de funcionalidade, segurança e eficiência energética.

A manutenção ativa refere-se às ações corretivas que são realizadas para resolver problemas imediatos, como substituição de componentes danificados. Embora a manutenção ativa seja inevitável em certas situações, deve-se adotar uma abordagem proativa de forma a diminuir a sua necessidade. Surge assim a manutenção preventiva, que são as estratégias proativas que têm por objetivo evitar problemas e minimizar a degradação da habitação ao longo do tempo. É através da realização de inspeções regulares, limpeza e ajustes preventivos que é possível identificar e corrigir pequenos problemas antes que se tornem grandes e onerosos. As medidas preventivas contribuem para prolongar a vida útil dos materiais de construção e sistemas construtivos, garantindo o desempenho contínuo da habitação.

Uma característica importante da madeira é o seu acentuado comportamento higroscópico, com constantes trocas de água com o meio envolvente em busca do equilíbrio. Na sua aplicação em obra procura-se que esta apresente um teor de água próximo do equilíbrio com as condições ambientais envolventes. Contudo, durante a vida útil da construção existirão sempre trocas de humidade entre a madeira e o ambiente. As implicações destas trocas são função dos gradientes higrotérmicos, da qualidade da madeira e dos pormenores construtivos. Neste sentido, é importante salientar a relevância da manutenção das estruturas de madeira, com o intuito de manter as características para o qual foram projetadas, maximizando a sua durabilidade.

Seguem-se algumas boas práticas de caráter preventivo para as habitações modulares em madeira:

- *As condições ambientais envolventes aos elementos de madeira devem ser monitorizadas, nomeadamente a humidade relativa e a temperatura do ar;*
- *Devem ser implementadas todas as medidas ou ações que promovam uma adequada ventilação dos elementos de madeira, com especial atenção, no contacto destes com fontes de humidade como são o betão, pedra, etc.;*
- *Toda a fonte de humidade ou infiltração que facilite o contacto da água com os elementos de madeira deve ser eliminada;*
- *Devem ser tomadas medidas para que quando exista água em contacto com a madeira, esta seja evacuada o mais rápido possível;*
- *Quando a durabilidade natural dos elementos de madeira se verificar insuficiente para a classe de risco em questão, dever-se-á definir a aplicação de um tratamento preservador;*
- *Se for necessário um tratamento de preservação deve ter-se em conta os agentes biológicos contra os quais a proteção é necessária.*

Os alertas para a prevenção da degradação da madeira (em uso), as anomalias suscetíveis de ocorrerem em edifícios de madeira e as recomendações gerais de atuação face aos problemas registados são aqui resumidamente apresentados, sendo que deve ser elaborado um plano de manutenção que sensibilize o cliente a uma manutenção preventiva contínua e ao apoio de pessoal qualificado.

Ainda que sejam aplicados tratamentos preventivos durante a construção da habitação, os mesmos não devem ser encarados como definitivos pelo que, e face à degradação de origem biológica e não biológica, as estruturas de madeira devem ser avaliadas e monitorizadas periodicamente, por

profissionais com formação adequada e reconhecida competência. Estas práticas possibilitam que sejam inspecionados os pontos essenciais e mais sensíveis da estrutura permitindo intervir atempadamente na resolução de eventuais problemas.

Apresenta-se de seguida os principais agentes de degradação que incidem sobre a madeira bem como os respetivos efeitos:

<i>AGENTE</i>	<i>EFEITO</i>
Insetos	Diminuição da capacidade resistente; galerias no interior dos elementos; orifícios nas faces exteriores dos elementos.
Fungos	Gera aparecimento de insetos; perda de densidade e resistência da madeira; perda de coloração e aumento do teor de humidade.
Raios ultravioletas	Retração superficial (perda de humidade); descoloração.
Raios infravermelhos	Retração.
Chuva	Humidade; degradação pelo ácido carbónico.
Variação térmica e de humidade do ar	Fendilhação superficial; empenamento e aprofundamento das fendas; colapso.

Ainda que seja efetuada uma manutenção preventiva, existe uma série de situações passíveis de serem identificadas aquando da utilização da habitação:

<i>ATIVIDADE PASSÍVEL DE SER OBSERVADA</i>	<i>ESTAÇÕES DO ANO</i>			
	<i>INVERNO</i>	<i>PRIMAVERA</i>	<i>VERÃO</i>	<i>OUTONO</i>
Entradas de água	X			X
Condensações	X			
Aplicação de produtos de proteção		X	X	
Aperto de parafusos			X	
Delaminações de linhas de cola			X	
Fendas e empenos da madeira			X	
Ataque ativo por insetos		X	X	
Podridão	X	X		

Juntamente com as considerações específicas da madeira, sugerem-se as seguintes boas práticas aos utilizadores deste tipo de habitações:

- *As casas que se encontrem em zonas florestais deverão ter ao seu redor todos os matos limpos (numa distância adequada);*
- *Deverá ser evitado o contacto da estrutura da casa com elementos como terra, lenha de queima ou vegetação;*
- *Em situações de ambiente corrosivo para metais, as ferragens metálicas devem ser cuidadosamente pintadas e tratadas pelo utilizador todos os anos;*
- *Lavar as paredes externas da casa uma vez por ano;*
- *As juntas deverão ser regularmente revistas e repostas, caso necessário;*
- *Recomenda-se a lubrificação periódica (anual) das dobradiças, fechaduras e cremonas das caixilharias, utilizando um spray lubrificante adequado.*

Sugerem-se também algumas medidas de monitorização especializada em relação aos elementos de madeira e às ligações, devendo estas serem efetuadas por pessoal especializado:

- ❖ *Rotura ou escorregamento das ligações;*
- ❖ *Aperto de parafusos e ajustamento de outros elementos de ligação;*
- ❖ *Corrosão de ligadores ou de outros elementos metálicos (chapa, cabos, ...);*
- ❖ *Ligadores em falta (parafusos, anilhas, ...);*
- ❖ *Falha do eventual esquema de pintura aplicado para proteção superficial;*
- ❖ *Falha de eventuais esquemas de proteção ignífuga (de elementos e de ligadores);*
- ❖ *Estado de conservação das canalizações, caleiras e algerozes, bem como dos elementos de remate de singularidades da envolvente (por exemplo, claraboias ou equipamento de ventilação) que poderão a dada altura permitir a entrada de água, de forma discreta, mas perigosa, e a deterioração de elementos de madeira.*

- ❖ *Deformação dos elementos resistentes (à vista desarmada);*
- ❖ *Fratura da madeira provocada por esforços excessivos;*
- ❖ *Fendas de secagem profundas da madeira especialmente se recentes, em evolução ou afetando ligações;*
- ❖ *Delaminação (abertura de juntas coladas), em elementos de madeira lamelada colada;*
- ❖ *Absorção de água a partir dos topos da madeira ou de fendas;*
- ❖ *Ataque por fungos;*
- ❖ *Infestações por insetos (carunchos ou térmitas);*
- ❖ *Deterioração de elementos sujeitos à abrasão;*



Figura 59 – Elaboração de um plano de manutenção

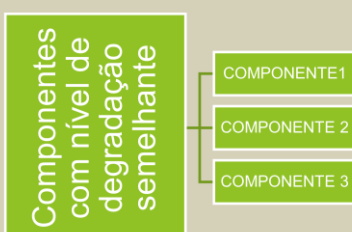


Figura 60 – Agrupamento de componentes com níveis de degradação semelhantes

6.1 PROPOSTA DE PLANO DE MANUTENÇÃO

A elaboração de um plano de manutenção é uma ferramenta fundamental para garantir a preservação e o bom desempenho da habitação. A elaboração do plano de manutenção deve ser efetuada pelas entidades produtoras do(s) módulo(s) e das estruturas em madeira, tendo sempre em consideração as soluções adotadas em projeto.

Ao desenvolver um esquema de manutenção adequado, podemos otimizar os recursos disponíveis, identificar e priorizar as necessidades de manutenção e estabelecer um cronograma eficiente para a realização das atividades de manutenção.

Uma abordagem eficaz para o desenvolvimento do plano de manutenção é a agregação de elementos e componentes da habitação que possuam um nível de degradação semelhante ao longo do tempo. Isso envolve agrupar os componentes com base em características como material de construção, exposição ao ambiente, ou tipo de manutenção necessária, entre outros.

Recomenda-se a elaboração de uma tabela que liste todos os componentes da habitação, incluindo elementos estruturais, revestimentos, sistemas

hidráulicos, elétricos, entre outros (esta lista deve ser o mais detalhada possível). Para cada componente, a tabela deve conter os registos da data da última manutenção realizada e a data estimada da próxima manutenção.

Esta abordagem, que estima tempos de manutenção para os vários componentes, permite planejar as atividades de manutenção de forma mais eficiente. A criar grupos de componentes com necessidades de manutenção semelhantes, é possível realizar inspeções, limpezas ou reparos em conjunto, economizando tempo e recursos. Além disso, estabelecer um cronograma detalhado é uma medida que promove a manutenção preventiva, evitando a deterioração acelerada de elementos devido à falta de manutenção.

Com recurso a ferramentas BIM, a eficiência desta abordagem pode ser ainda maior, integrando todas as informações da fase de conceção e mantendo o histórico atualizado de todos os componentes da habitação.

A importância de um plano de manutenção adequado não pode ser subestimada, pois permite aos utilizadores e responsáveis pela manutenção que tenham uma visão clara das tarefas a serem realizadas, garantindo a integridade estrutural, a eficiência energética e o conforto e saúde dos utilizadores. Acrescenta-se ainda que a manutenção regular contribui para a valorização do imóvel e para a redução de custos a longo prazo.

Assim, aconselha-se vivamente a elaboração de um plano de manutenção abrangente e personalizado, o que na construção modular também é vantajoso pois o plano de manutenção poderá ser utilizado noutras habitações que sejam compostas pelas mesmas soluções modulares.

COMPONENTE/ ELEMENTO	DATA DA ÚLTIMA MANUTENÇÃO	DATA PREVISTA PARA A PRÓXIMA MANUTENÇÃO
• C1	• dd/mm/aaaa	• dd/mm/aaaa
• C2	• dd/mm/aaaa	• dd/mm/aaaa
• C3	• dd/mm/aaaa	• dd/mm/aaaa

Figura 61 – Exemplo de esquema de registo de manutenção

7. FONTES E REFERÊNCIAS PARA CONSULTA

- [1] S. Enso, *Building Systems by Stora Enso 3-8 Storey Modular Element Buildings*. 2016.
- [2] B. Singh, S. K. Sharma, and P. Syal, "Net Zero Energy Building (NZEB) Design," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, vol. 102, no. 1, pp. 237-247, 2021/03/01 2021, doi: 10.1007/s40030-020-00500-1.
- [3] A. Rodrigues, "ECO-ARQUITECTURA," Mestrado, Arquitetura, FAULisboa, Lisboa, 2018.
- [4] S. Attia, "Chapter 2 - Evolution of Definitions and Approaches," in *Net Zero Energy Buildings (NZEB)*, S. Attia Ed.: Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 21-51.
- [5] H. G. e. J. M. Graça, *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. 2004.
- [6] R. M. M. Fonseca, "Desenvolvimento e aplicação do conceito nZEB em construções de habitação modular," Mestrado, Engenharia, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia UP, 2014.
- [7] T. A. Santos, G. d. c. d. C. M. d. Palmela, Ed. *Manual da Construção Sustentável*. Câmara Municipal de Palmela, 2021.
- [8] A. M. M. d. Almeida, "Rehabilitation Project for an Energy Autonomous House," Mestrado, Engenharia, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.
- [9] M. C. U. Tenório, "Sistema construtivo em painéis modulares para edifícios coletivos com estrutura de madeira," Mestrado, Construção e Reabilitação Sustentáveis, Universidade do Minho, Universidade do Minho, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1822/81425>