



# Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

## Sustentabilidade dos materiais de construção

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Cidades  
Sustentáveis e Inteligentes

Autor

**Rodolfo José Girão Trindade**

Orientador

**Professor Rui Ferreira**

Co-Orientador

**Professor João Silva**



INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA  
DE COIMBRA

Coimbra, dezembro de 2025



## **RESUMO**

A construção sustentável não é apenas uma tendência, mas uma necessidade urgente diante dos desafios ambientais, sociais e econômicos do nosso tempo. Esta dissertação explora como a adoção de materiais e sistemas construtivos sustentáveis pode transformar o setor, tornando-o mais eficiente, menos dependente de mão de obra especializada e mais amigo do ambiente. Através de casos de estudo e análises detalhadas, demonstra-se que soluções como o Light Steel Framing, painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente e isolamentos em cortiça não só reduzem o impacto ambiental, mas também aceleram o processo de obra e melhoram o conforto dos ocupantes. Este trabalho é um convite a repensar a construção, apostando em inovação, eficiência e sustentabilidade para um futuro mais resiliente.

## **ABSTRACT**

Sustainable construction is not just a trend, but an urgent necessity in the face of the environmental, social, and economic challenges of our time. This dissertation explores how the adoption of sustainable building materials and systems can transform the sector, making it more efficient, less dependent on skilled labor, and more environmentally friendly. Through case studies and analyses, we demonstrate that solutions such as Light Steel Framing, eco-efficient precast concrete panels, and cork insulation not only mitigate environmental impact but also accelerate the construction process and improve occupant comfort. This work is an invitation to rethink construction, investing in innovation, efficiency, and sustainability for a more resilient future.

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu bisavô, exemplo de trabalho, humildade e perseverança, cuja memória acompanhou cada etapa deste caminho.

À minha namorada, pelo apoio incondicional, paciência e compreensão nos momentos mais desafiantes desta jornada académica.

Aos meus pais e ao meu irmão, pelo amor, apoio incondicional e por nunca deixarem que desistisse dos meus objetivos.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização desta dissertação foi um percurso que, mais do que um trabalho acadêmico, representou uma jornada pessoal marcada por desafios, dúvidas e momentos de superação. Ao longo deste caminho, houve pessoas que me apoiaram de forma incondicional, e a quem gostaria de dedicar estas palavras de gratidão.

Ao meu orientador, Professor Rui Ferreira, agradeço pela orientação exigente, pela disponibilidade e pelos conselhos que me guiaram em cada etapa. Ao Professor João Silva, coorientador, o meu sincero agradecimento pelo acompanhamento atento e pelas sugestões que enriqueceram este trabalho. Às minhas professoras e professores, o reconhecimento pelo conhecimento transmitido e pela inspiração que me motivaram a ir mais longe.

Aos meus pais, aos meus irmãos e à minha família, dedico um agradecimento especial. Foram vocês que, com amor, paciência e incentivo, me ensinaram o valor do esforço e da persistência. Foram vocês que, mesmo nos dias mais difíceis, me lembraram que nunca estava sozinho. Cada palavra de apoio, cada gesto de carinho, foi fundamental para que eu conseguisse continuar, mesmo quando o caminho parecia mais difícil.

À minha namorada, dedico um agradecimento do coração. O teu amor, a tua paciência e a tua presença foram o meu refúgio em todos os momentos de incerteza e cansaço. Foste o meu porto seguro, aquele que me ajudou a levantar a cabeça quando precisei, e que me fez acreditar que valia a pena continuar. Obrigado por estares sempre ao meu lado, por me compreender e por me fazer sentir capaz.

Aos meus amigos e colegas, pela partilha de momentos, pelas palavras de encorajamento e pelo apoio mútuo ao longo de todo o percurso. Aos docentes e à instituição, o meu agradecimento pela oportunidade de crescer, aprender e transformar ideias em realidade.

Este trabalho é também de todos vocês, e espero que, ao lê-lo, sintam que fizeram parte desta conquista.

# ÍNDICE

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	I
DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS.....	II
ÍNDICE.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE QUADROS.....	VII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	VIII
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	11
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	11
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>12</b>
2.1 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	12
2.2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL COM A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV / LCA).....	13
2.3 NORMAS E CERTIFICAÇÕES AMBIENTAIS.....	18
<b>3 MATERIAIS USADOS NA CONSTRUÇÃO TRADICIONAL.....</b>	<b>23</b>
3.1 CONTEXTO HISTÓRICO E CULTURAL DA CONSTRUÇÃO TRADICIONAL.....	23
3.2 CONCEÇÃO BIOCLIMÁTICA.....	30
3.3 CONSTRUÇÃO EM PEDRA.....	34
3.3.1 <i>Granito</i> .....	35
3.3.2 <i>Xisto</i> .....	36
3.4 CONSTRUÇÃO EM ADOBE.....	36
3.5 CONSTRUÇÃO EM BLOCO DE TERRA COMPRIMIDO (BTC).....	42
3.6 CONSTRUÇÃO EM TAIPA.....	46
3.7 CONSTRUÇÃO EM MADEIRA.....	49
3.8 CARATERIZAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DOS MATERIAIS TRADICIONAIS.....	63
3.8.1 <i>Análise ambiental</i> .....	72
3.8.2 <i>Análise social e cultural</i> .....	73
3.8.3 <i>Comparação com materiais modernos</i> .....	74
3.9 IMPACTOS SOCIAIS E CULTURAIS AO UTILIZAR CONSTRUÇÃO TÍPICA DE CADA REGIÃO.....	75
<b>4 SUSTENTABILIDADE DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....</b>	<b>77</b>
4.1 INOVAÇÃO E TECNOLOGIA DOS MATERIAIS SUSTENTÁVEIS.....	77
4.1.1 <i>Painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente</i> .....	79
4.1.2 <i>Sistema construtivo com Cortiça</i> .....	85
4.1.3 <i>Sistema construtivo com Leca</i> .....	89
4.1.4 <i>Sistemas construtivos pré-fabricados sustentáveis: Thermochip, multicover, e M-tek</i> .....	91
4.1.5 <i>Sistema construtivo MultiZero</i> .....	97
4.1.6 <i>Sistema construtivo ICF</i> .....	99
4.1.7 <i>Sistema construtivo em "Light Steel Framing"</i> .....	101
4.2 IMPACTO SOCIAL E ECONÓMICO DA ESCOLHA DOS MATERIAIS SUSTENTÁVEIS.....	111
4.3 DESAFIOS E OPORTUNIDADE PARA O FUTURO.....	113

4.3.1	<i>Desafios regulatórios e de mercado</i> .....	113
4.3.2	<i>Desafios técnicos e de informação</i> .....	113
4.3.3	<i>Oportunidades económicas e de inovação</i> .....	114
4.3.4	<i>Síntese: de obrigação a oportunidades estratégias</i> .....	114
4.4	COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO: MATERIAIS TRADICIONAIS VS. SUSTENTÁVEIS.....	115
4.4.1	<i>Desempenho ambiental e ciclo de vida</i> .....	115
4.4.2	<i>Desempenho térmico</i> .....	116
4.4.3	<i>Desempenho acústico</i> .....	117
4.4.4	<i>Comportamento estrutural e durabilidade</i> .....	117
4.4.5	<i>Custos, manutenção e desempenho económico</i> .....	118
4.4.6	<i>Síntese comparativa</i> .....	118
4.5	CASOS DE ESTUDO DE PROJETOS SUSTENTÁVEIS.....	119
4.5.1	<i>Edifício com isolamento em cortiça</i> .....	119
4.5.2	<i>Edifício com sistema industrializada (LSF)</i> .....	121
4.5.3	<i>Reabilitação com materiais sustentáveis</i> .....	122
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>125</b>
5.1	SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS.....	125
5.2	DISCUSSÃO CRÍTICA.....	127
5.3	IMPLICAÇÕES PARA O PROJETO E PARA A PRÁTICA PROFISSIONAL.....	128
5.4	LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	129
5.5	TRABALHOS FUTUROS.....	129
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>130</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>132</b>

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 - Dimensão ambiental, social e económico do desenvolvimento sustentável (Marques, L. M. da S. (2017).....	6
Figura 2 - Zonas climáticas de inverno de Portugal Continental (Portugal. Ministério do Ambiente, 2015).....	20
Figura 3 - Zonas climáticas de verão de Portugal Continental (Portugal. Ministério do Ambiente, 2015).....	20
Figura 4 - Técnica de enxaimel (Fonte: Google Imagens) .....	24
Figura 5 - Edifícios nos alpes suíços .....	25
Figura 6 - Arquitetura Vernacular Portuguesa .....	26
Figura 7 - Arquitetura Vernacular da Malásia .....	26
Figura 8 - Arquitetura Vernacular do Pólo Norte.....	26
Figura 9 - Arquitetura Vernacular Africana.....	26
Figura 10 - Carta Geológica de Portugal.....	28
Figura 11 - Exemplos de construções em adobe existentes no distrito de Aveiro (Varum, Costa, Silveira, Oliveira, & Figueiredo, 2010) .....	38
Figura 12 - Molde do bloco de adobe (Fonte: Google Imagens) .....	39
Figura 13 - Alvenaria de adobe (Fonte: Google Imagens).....	40
Figura 14 - Equipamentos e material utilizado na produção: a) Pulverizador mecânico de pás; b) Peneiro com 4mm de abertura; c) Terra após pulverização e peneiração (Silva, 2015) .....	44
Figura 15 - A) e B) Dosagem dos materiais; C) Mistura dos materiais utilizando uma betoneira elétrica. (Silva, 2015).....	45
Figura 16 - A) Dosagem da mistura; B) Colocação da mistura na prensa; C) Moldagem do bloco. (Silva, 2015).....	45
Figura 17 - Cura dos blocos: blocos tapados com lona plástica após rega com água (Silva, 2015) .....	46
Figura 18 - Novo edifício da empresa Ricola, Suíça (2012) (Silva, 2015) .....	47
Figura 19 - Paredes de taipa (Fonte: Google Imagens) .....	47
Figura 20 - Taipa e pilão tradicional (Silva, 2015) .....	48
Figura 21 - Compactação mecânica da taipa (Silva, 2015) .....	48
Figura 22 - Construções em Madeira, no Alpes Suíços (Fonte: Autor).....	52
Figura 23 - Representação do tronco de uma árvore (Torres, 2021) .....	59

Figura 24 - Direções ou eixos principais (Torres, 2021) .....	61
Figura 25 - Peças de madeira maciça (Fonte: Google imagens).....	63
Figura 26 - Eco-sandwich Project (Fonte: Google Imagens).....	81
Figura 27 - Sistema de Fachadas com cortiça (SECIL, s.d.).....	86
Figura 28 - Pavimento executado com Leca (Fonte: Google imagens).....	89
Figura 29 - Painel Thermochip com placa de gesso cartonado (Obras360, s.d.) ....	92
Figura 30 - Placa TKH (Thermochip, s.d.).....	93
Figura 31 - Painel multicover (Multipanel, s.d.).....	94
Figura 32 - Revestimento de fachada com painel M-Tek (fonte: Google imagens)	96
Figura 33 - Sistema construtivo MultiZero (Fonte: Google Imagens).....	98
Figura 34 - Sistema construtivo ICF (Termobox, n.d.).....	100
Figura 35 - Métodos construtivos em LSF: (a) construção por perfis " <i>stick-build</i> "; (b) construção por painéis; (c) construção modular.....	103
Figura 36 - Protótipo de construção modular. (Fonte: Autor).....	106
Figura 37 - Caso de estudo de moradia com revestimento em cortiça. (Amorim cork solutions, junho 2025.).....	121

## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1 - Critérios para a determinação da zona climática de inverno.....	21
Tabela 2 - Critérios para a determinação da zona climática de verão .....	22
Tabela 3 - Peso volúmico da neve e do gelo .....	25
Tabela 4 - Estratégias bioclimáticas, clima I1-V2 (Gonçalves & Nunes, 2004) .....	32
Tabela 5 - Energia incorporada em materiais de construção. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010) .....	57
Tabela 6 - Indicadores de sustentabilidade dos edifícios (Castanhas, 2020) .....	67
Tabela 7 - Princípios de sustentabilidade presentes na construção vernacular (Castanhas, 2020).....	67
Tabela 8 - Síntese do sistema construtivo com cortiça.....	88
Tabela 9 - Síntese do sistema construtivo com cortiça.....	90
Tabela 10 - Classe de aços estruturais usados em LSF (Ferreira, 2014).....	107
Tabela 11 - Desempenho térmico do LSF .....	108

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ACV – Análise do Ciclo de Vida

DAP – Declaração Ambiental do produto

EPS – Poliestireno Expandido

ETICS – External Thermal Insulation Composite System

LCA – Life Cycle Assessment

LSF – Light Steel Framing

Leca – Lightweight Expanded Clay Aggregate

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

VV – Ventilação mecânica controlada

EN – European Norm

ISO – International Organization for Standardization

LEED – Leadership in Energy and Environmental Design

BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Metho

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Contextualização**

Antes de se avançar para a análise do papel que os materiais de construção podem assumir no âmbito de uma construção sustentável, torna-se fundamental esclarecer previamente os conceitos de “Desenvolvimento Sustentável” e “Construção Sustentável”. A compreensão destas noções é essencial, não apenas para delimitar o enquadramento teórico da investigação, mas também para evidenciar a forma como estes conceitos surgem, evoluem e se interligam entre si. Só através deste entendimento é possível reconhecer em que medida as práticas construtivas atuais se podem alinhar com os princípios mais amplos da sustentabilidade, estabelecendo uma ponte entre as necessidades ambientais, sociais e económicas da sociedade contemporânea e a materialização de soluções construtivas responsáveis e duradouras. (Marques, L. M. da S. (2017)

O século XX foi marcado por transformações profundas e aceleradas nos planos económico, tecnológico e social. Entre os acontecimentos mais determinantes destacam-se as duas grandes guerras mundiais, que alteraram drasticamente a organização das sociedades, bem como as sucessivas crises económicas, sendo a de 1929 – conhecida como a “Grande depressão” – um marco histórico pelo impacto global que provocou. Paralelamente, assistiu-se a um crescimento demográfico sem precedente, resultado direto das inovações tecnológicas aplicadas à produção agrícola, e sobretudo, dos avanços significativos no campo da medicina, que possibilitaram o controlo e a cura de diversas doenças até então fatais. A concentração industrial e o conseqüente aumento da produção e do consumo consolidaram um novo padrão de desenvolvimento, assente num crescimento económico intenso. Contudo, este processo implicou também uma exploração massiva e desregulada dos recursos naturais, situação que se agravou progressivamente ao longo do século e que acabou por criar as bases para a consciencialização, por parte da sociedade, relativamente às questões ambientais e à necessidade de repensar o modelo de desenvolvimento, abrindo caminho ao conceito de sustentabilidade. (Marques, L. M. da S. (2017)

O despertar para os impactos negativos decorrentes do modelo de crescimento seguido ao longo do século XX manifestou-se, sobretudo, a partir da segunda metade desse período. O consumo excessivo de recursos naturais e de energia, a degradação progressiva dos ecossistemas, a deterioração da qualidade do ar e o aumento gradual da temperatura média global tornaram-se evidências preocupantes, largamente documentadas pela comunidade científica. O número crescente de estudos publicados a partir dessa época não só confirmou a gravidade da situação, como também trouxe para a esfera pública e política um conjunto de questões até

então relegadas para o segundo plano. Os alertas lançados pelos investigadores foram determinantes para modificar a percepção de alguns decisores políticos, que, até esse momento, careciam de uma visão clara acerca da real dimensão do problema. (Marques, L. M. da S. (2017)

É precisamente neste contexto que o Ambiente se torna um tema central da agenda política internacional. Um marco importante nesta mudança foi a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo, em 1972, considerada o primeiro grande fórum global a reconhecer a necessidade de repensar a relação entre o desenvolvimento económico e preservação ambiental. A partir daí, sucederam-se outros momentos decisivos, como a publicação, em 1987, do Relatório *Our Common Future* pela Comissão de Brundtland, que popularizou o conceito de “Desenvolvimento Sustentável”, entendido como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades”. (World Commission on Environment and Development. (WCED), 1987)

Este conceito, surge, assim, como resposta à constatação de que o crescimento económico ilimitado não poderia continuar a ser perseguido à custa da exaustão de recursos naturais e da degradação do planeta. Ao propor uma nova forma de pensar o progresso, o Desenvolvimento Sustentável tornou-se paradigma de referência para enfrentar os desafios ambientais, sociais e económicos contemporâneos, influenciando políticas públicas, estratégias empresariais e, inevitavelmente, a forma de encarar a construção civil e os materiais nela utilizados. (Studio Nobel, 1994)

O despertar para as consequências negativas de fenómenos como o aumento do consumo de recursos naturais e energéticos, a degradação dos ecossistemas, a perda de biodiversidade, a diminuição da qualidade do ar e, de forma cada vez mais evidente, a subida gradual da temperatura global, ficou particularmente visível a partir da segunda metade do século XX. É neste período que se assiste a um crescimento significativo do número de estudos científicos que passam a documentar de forma sistemática a relação entre a atividade humana e o impacto ambiental daí decorrente. O alerta lançado pela comunidade científica desempenhou um papel decisivo na alteração da mentalidade de governantes e organismos internacionais, até então marcados por uma visão predominantemente economicista e produtivista, onde as questões ambientais ocupavam um lugar secundário. Assim, foi neste período da história que o tema ambiente passa ter um maior destaque, passando mesmo a fazer parte da agenda política internacional. (Marques, L. M. da S. (2017)

Como já foi referido, a reflexão em torno das questões ambientais, intensificada a partir da segunda metade do século XX, abriu caminho a novas linhas de estudo e investigação que procuravam responder a uma questão central: qual o modelo de desenvolvimento mais adequado para garantir simultaneamente o progresso económico, a justiça social e a preservação ambiental. Neste contexto, começaram a surgir, um pouco por todo o mundo, encontros e conferências internacionais que

tinham como objetivo debater, alertar e consciencializar os governos, as instituições e a sociedade civil para os riscos associados ao modelo de crescimento vigente. Foi neste percurso que, em 1987, a Comissão Mundial para o Ambiente e Desenvolvimento (WCED), sob a égide das Nações Unidas, publicou o célebre Relatório de Brundtland, intitulado *Our Common Future* (Nosso Futuro Comum na versão portuguesa). Este documento constituiu um marco histórico, ao propor uma agenda global para a mudança baseada na formulação de estratégias que promovessem um equilíbrio entre as necessidades atuais e a preservação dos recursos para as gerações futuras. (Marques, L. M. da S. (2017)

Embora a expressão “Desenvolvimento Sustentável” já tivesse sido utilizada anteriormente, nomeadamente em 1980 no âmbito da *World Conservation Strategy*, foi neste relatório que se fixou aquela que continua a ser, até aos dias de hoje, a definição mais amplamente aceite e citada. (Marques, L. M. da S. (2017)

*“Entende-se por desenvolvimento sustentável o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações do futuro satisfazerem as suas próprias necessidades.*

*A definição implica dois conceitos-chaves:*

- O conceito de necessidades, em particular as necessidades básicas das populações mais pobres, às quais se deve prestar especial atenção;*
- O conceito de limitações impostas pelo atual estado de desenvolvimento tecnológico e organização social na capacidade do ambiente em satisfazer as necessidades atuais e futuras.”*

A definição de “Desenvolvimento Sustentável”, consagrada pelo Relatório Brundtland, evidencia de forma clara a dupla dimensão de responsabilidade e compromisso entre gerações. Este conceito traduz não apenas uma preocupação ética, mas também uma estratégia prática: garantir que as gerações futuras herdem condições adequadas para satisfazerem as suas próprias necessidades e, conseqüentemente, possam dar continuidade ao mesmo princípio. Trata-se, assim, de um círculo virtuoso que depende da capacidade das sociedades atuais em gerir com equilíbrio os recursos de que dispõem. Contudo, importa referir que, à medida que o conceito se tornou mais conhecido e mediático, começou igualmente a ser alvo de interpretações erróneas e de utilizações abusivas, muitas vezes como simples instrumento retórico ou de “marketing verde”, sem que houvesse uma verdadeira mudança de práticas. (Marques, L. M. da S. (2017)

Na sequência deste relatório, foi ainda objeto de análise crítica o modelo de desenvolvimento até então seguido pelos países industrializados, sobretudo no que respeita ao consumo excessivo de recursos naturais e à quase inexistente consideração da capacidade de regeneração dos ecossistemas. O documento enfatiza, de forma inequívoca, a incompatibilidade entre o desenvolvimento sustentável e os padrões de produção e o consumo vigentes, sublinhando a

necessidade de estabelecer uma nova relação entre a atividade humana e o meio ambiente. (Marques, L. M. da S. (2017)

De modo a operacionalizar esta mudança de paradigma, o relatório recomenda a adoção de políticas e medidas concretas pelos governos, destacando-se entre elas: (Marques, L. M. da S. (2017)

- A necessidade de limitar o crescimento populacional, prevenindo pressões insustentáveis sobre os recursos disponíveis;
- A garantia de acesso a recursos básicos a longo prazo, nomeadamente água, energia e alimentos;
- A preservação da biodiversidade e dos ecossistemas, assegurando o equilíbrio natural do planeta;
- A redução do consumo energético e a promoção ativa de fontes renováveis, como a energia solar, eólica e geotérmica;
- O incentivo ao aumento da produção industrial nos países em desenvolvimento, mas assente em tecnologias ambientalmente adaptadas;
- O controlo da expansão urbana e o reforço da articulação entre cidades e zonas rurais, de modo a promover um território mais equilibrado;
- E, finalmente, a garantia de condições de vida dignas às populações, com destaque para o acesso à educação, à saúde e à habitação.

Este conjunto de recomendações, que abrange dimensões sociais, económicas e ambientais, constituiu a base para uma nova visão integrada do desenvolvimento, onde o crescimento económico deixou de poder ser visto de forma isolada, passando a estar intrinsecamente ligado à justiça social e à preservação ecológica. (Marques, L. M. da S. (2017)

Na origem desta lista de medidas encontra-se a procura de um modelo de desenvolvimento verdadeiramente sustentável e global. Contudo, verifica-se desde logo que o alcance destas medidas ultrapassa claramente a ideia restrita de mera proteção ambiental. O conceito de “Desenvolvimento Sustentável” revela-se, assim, como algo muito mais abrangente, que integra preocupações ligadas à qualidade de vida das populações, à justiça intergeracional, à igualdade social e à luta contra a pobreza. Ou seja, trata-se de um conceito multidimensional, em que a vertente ambiental se articula com a dimensão social, económica e até ética, formando uma visão integrada de progresso que procura equilibrar as necessidades presentes com a preservação de oportunidades para as gerações futuras. (Marques, L. M. da S. (2017)

Foi neste contexto que, em 1992, teve lugar no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente e Desenvolvimento, amplamente conhecida como Eco-92 ou Cimeira da Terra. Esta conferência, cuja realização já havia sido recomendada pelo Relatório de Brundtland, constitui um dos marcos mais relevantes no debate internacional sobre sustentabilidade. Durante os trabalhos, foram

discutidos temas de alcance global relacionados com a proteção ambiental, o desenvolvimento económico e a responsabilidade social. Entre os objetivos centrais encontrava-se a definição de mecanismos de financiamento capazes de apoiar os governos na implementação de medidas para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, a preservação da biodiversidade e a mitigação da desertificação e do desflorestamento, fenómenos particularmente preocupantes em diversas regiões do planeta. (Marques, L. M. da S. (2017)

A importância desta conferência ficou materializada no documento Agenda 21, que permanece até hoje com uma das mais abrangentes e ambiciosas tentativas de estabelecer uma estratégia global para o desenvolvimento sustentável. Este plano de ação destacou a necessidade de promover a sustentabilidade urbana e rural, a preservação dos recursos e minerais e a implementação de uma ética política comprometida com o planeamento responsável do futuro. A Agenda 21 sublinhou ainda que a sustentabilidade não poderia ser alcançada apenas pela via ambiental, devendo integrar igualmente as dimensões económica, social e cultural, numa perspetiva holística. (Marques, L. M. da S. (2017)

Assim, a verdadeira sustentabilidade assenta num triplo pilar de suporte: o ambiental, que assegura a preservação dos ecossistemas e dos recursos naturais; o social, que garante a justiça, a equidade e a qualidade de vida das comunidades; e o económico, que permite que o desenvolvimento seja sustentado por modelos produtivos eficiente, inovadores e equilibrados. Só através da articulação consistente entre estas três dimensões é possível construir sociedades resiliente, capazes de responder aos desafios atuais sem comprometer o futuro das próximas gerações. (Marques, L. M. da S. (2017)

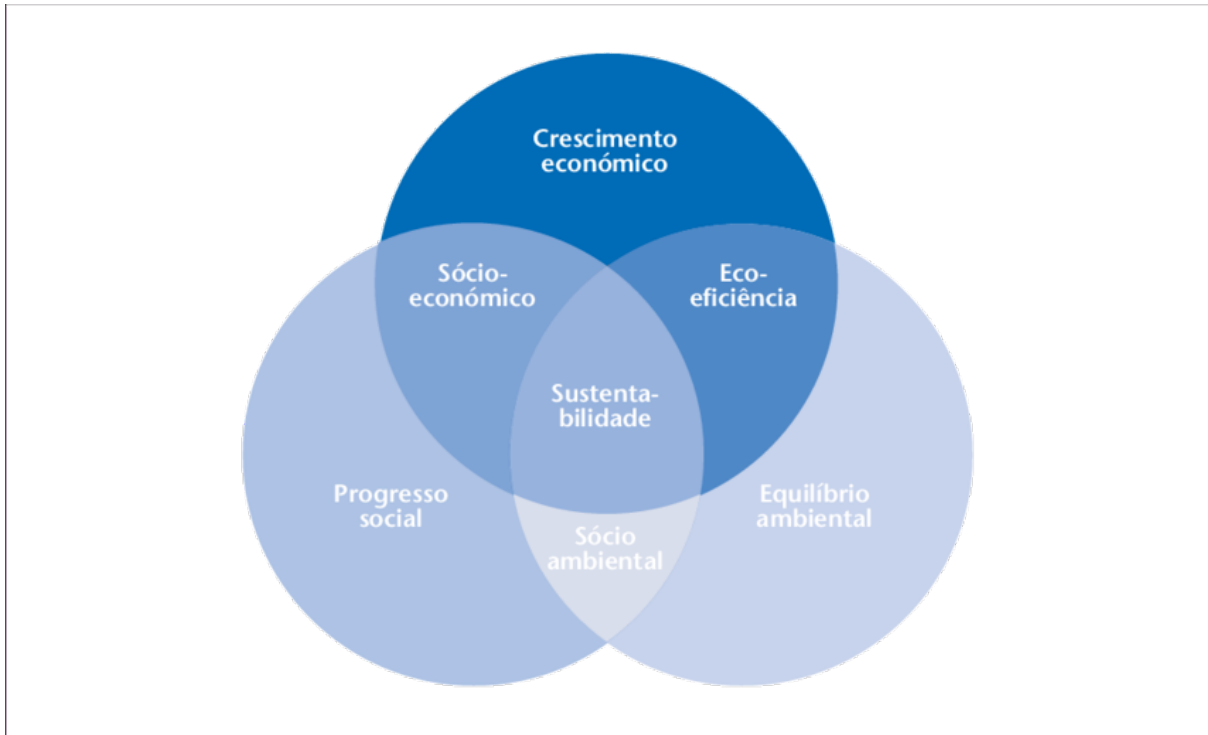


Figura 1 - Dimensão ambiental, social e económico do desenvolvimento sustentável (Marques, L. M. da S. (2017))

Os desafios lançados pelo ideal do desenvolvimento sustentável e a sua aplicação específica ao setor da construção deram origem a um novo conceito, hoje amplamente difundido: o de “Construção Sustentável”. Esta noção surge com a resposta à necessidade de conciliar o crescimento económico e a inovação tecnológica com a preservação ambiental e o bem-estar social. De facto, basta considerar o papel central que a construção desempenha na economia para compreender a urgência de definir um modelo sustentável para esta indústria. O setor da construção caracteriza-se por mobilizar elevados volumes de investimento, representando uma fatia significativa no Produto Interno Bruto (PIB) da maioria dos países. Para além disso, assume-se como um importante motor de criação de emprego, não apenas através de postos de trabalho diretamente ligados ao setor, mas também pelo seu efeito multiplicador sobre diversas outras áreas da economia, como a indústria de materiais, os transportes e os serviços especializados. (Marques, L. M. da S. (2017))

Contudo, este dinamismo económico contrasta com o seu enorme impacto ambiental. A construção é responsável pelo consumo de vastas quantidades de recursos naturais, incluindo matérias-primas não renováveis, grandes volumes de água potável e significativas parcelas de energia, tanto no processo construtivo como ao longo do ciclo de vida dos edifícios. Estima-se que este setor contribua de forma expressiva para a emissão de gases com efeito de estufa, para a produção de resíduos sólidos e para a degradação dos ecossistemas. Assim, torna-se evidente que a construção sustentável não é apenas uma opção desejável, mas sim uma necessidade

estratégica para assegurar a transição para sociedades mais equilibradas e resilientes. (Marques, L. M. da S. (2017)

Na prática, o conceito de construção sustentável traduz-se na procura por soluções construtivas que minimizem o impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida do edifício — desde a extração das matérias-primas até à sua eventual demolição ou reutilização. Este princípio envolve a seleção criteriosa de materiais, privilegiando aqueles que apresentam baixo impacto ambiental, sejam eles de origem natural, reciclada ou reciclável, com reduzida pegada energética e que garantam durabilidade e facilidade de manutenção. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

Outro aspeto fundamental é a eficiência energética, tanto durante o processo construtivo como na fase de utilização. Um edifício sustentável deve ser projetado de forma a reduzir ao mínimo as necessidades de energia para aquecimento, arrefecimento, iluminação e ventilação, apostando em soluções de isolamento térmico e acústico, em tecnologias passivas de climatização e na incorporação de fontes de energia renovável, como a solar, a eólica ou a geotérmica. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010) (Município de Palmela, 2021)

A gestão racional da água constitui igualmente um pilar essencial. Estratégias como a recolha de águas pluviais, a reutilização de águas cinzentas e a instalação de equipamentos de baixo consumo contribuem significativamente para a redução da pressão sobre os recursos hídricos. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010) (Município de Palmela, 2021)

Paralelamente, a construção sustentável promove uma abordagem integrada ao desenho urbano e ao bem-estar dos utilizadores, contemplando fatores como a qualidade do ar interior, a iluminação natural, o conforto térmico e a acessibilidade. Deste modo, os edifícios não apenas reduzem o seu impacto ambiental, como também se tornam espaços mais saudáveis e confortáveis para os seus ocupantes. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010) (Município de Palmela, 2021)

Por fim, destaca-se a relevância dos instrumentos de avaliação e certificação ambiental, como o LEED (*“Leadership in Energy and Environmental Design”*), o BREEAM (*“Building Research Establishment Environmental Assessment Method”*) ou o LiderA, desenvolvidos para o contexto português. Estas ferramentas permitem medir e validar o desempenho sustentável das construções, funcionando como referência para projetistas, construtores e utilizadores. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010) (Município de Palmela, 2021)

Estima-se que o setor da construção seja atualmente responsável por aproximadamente metade do consumo global de recursos naturais e por cerca de 40% da geração de resíduos sólidos em todo o mundo. Estes valores, por si só, revelam a enorme pressão que esta atividade exerce sobre os ecossistemas e justificam a crescente preocupação em torno da sua sustentabilidade. Para além do impacto direto na extração e transformação de matérias-primas, é ainda relevante considerar o consumo energético associado tanto ao processo construtivo como à

utilização e exploração dos edifícios, que em conjunto representam cerca de 40% do total de energia consumida a nível do planeta. (Marques, L. M. da S. (2017)

No caso português, a situação não é distinta. De acordo com dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), em 2015 o setor da construção representava aproximadamente 20% do consumo nacional de energia, absorvia 6,7% da água potável disponível e era responsável pela produção de cerca de 620 mil toneladas de resíduos setoriais. Estes números, quando analisados de forma integrada demonstram não apenas a relevância económica da construção, mas também o seu elevado peso ambiental. (Marques, L. M. da S. (2017)

Assim, torna-se evidente que a manutenção do atual modelo de desenvolvimento do setor é insustentável a médio e longo prazo. Os dados reforçam a urgência de implementar novas estratégias, políticas públicas e soluções construtivas inovadoras, capazes de reduzir a dependência de recursos não renováveis, de minimizar a produção de resíduos e de aumentar a eficiência energética dos edifícios. Em suma, está em causa não apenas a transformação da prática construtiva, mas a redefinição de um paradigma que permite conciliar o desenvolvimento económico com a responsabilidade ambiental. (Marques, L. M. da S. (2017)

Em 1994, o Professor Charles J. Kibert, investigador de referência no domínio da sustentabilidade aplicada ao setor da construção, apresentou uma definição que viria a marcar a evolução do conceito de construção sustentável. Segundo o autor, trata-se da “criação e manutenção responsáveis de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e em princípios ecológicos”. Esta formulação foi apresentada no âmbito do *CIB – International Council for Research and Innovation in Building and Construction*, e desde então permanece como uma das mais amplamente aceites a nível internacional. (Marques, L. M. da S. (2017)

Apesar da sua consagração em 1994, importa referir que o conceito de construção sustentável começou a ganhar visibilidade ainda antes, nomeadamente durante a Conferência Eco-92, realizada no Rio de Janeiro, já anteriormente referida. Esse evento representou um marco importante ao colocar as questões ambientais e a sustentabilidade na agenda global, servindo como catalisador para a formulação de definições mais precisas e de instrumentos práticos de orientação para o setor da construção. (Marques, L. M. da S. (2017)

No seguimento da definição de Kibert, o CIB elaborou uma lista de sete princípios fundamentais que devem orientar o desenvolvimento de uma construção sustentável. Estes princípios constituem uma verdadeira carta de orientação para projetistas, empreiteiros e decisores políticos, permitindo alinhar práticas construtivas com os objetivos ambientais e sociais do desenvolvimento sustentável. Assim, os sete princípios estabelecidos são: (Marques, L. M. da S. (2017)

- Reduzir: diminuir o consumo de recursos, minimizando o desperdício e otimizando a utilização de materiais;

- Reutilizar: promover a extensão do ciclo de vida dos recursos já existentes, através da sua reaplicação em novos contextos construtivos;
- Reciclar: privilegiar materiais recicláveis, incorporando-os no processo de construção e evitando a acumulação de resíduos;
- Proteger a natureza: assegurar a preservação dos ecossistemas e da biodiversidade, reduzindo os impactos ambientais diretos da atividade construtiva;
- Eliminar os resíduos tóxicos: evitar a utilização de substâncias nocivas, garantindo a saúde dos utilizadores e a proteção do meio ambiente;
- Analisar os custos de ciclo de vida: avaliar economicamente os edifícios considerando não apenas os custos iniciais, mas também os custos de operação, manutenção e fim de vida útil;
- Assegurar a qualidade: garantir elevados padrões de desempenho e durabilidade, promovendo edifícios confortáveis, seguros e eficientes.

Estes princípios, que resultam da síntese entre ecologia, economia e qualidade de vida, continuam a construir a base conceptual para a construção sustentável, mantendo-se atuais e indispensáveis no enquadramento teórico e prático do setor. (Marques, L. M. da S. (2017)

De modo geral, os princípios definidos pela CIB continuam a ser reconhecidos como verdadeiros pilares da Construção Sustentável, constituindo-se como orientadores de todas as fases do ciclo de vida de um edifício – desde a conceção e construção, passando pela sua utilização, até ao momento da demolição ou reconstrução. A adoção destes princípios implica uma análise criteriosa das decisões tomadas em cada etapa, dado que todas elas acarretam impactos significativos, sobretudo quando relacionados com a exploração de recursos naturais. Assim, torna-se essencial avaliar aspetos como a seleção de materiais construtivos, a quantidade de energia e água consumidas ao longo da vida útil do edifício, o local de implantação e a sua relação com o ecossistema envolvente, bem como as consequências futuras dessas escolhas. Só através desta abordagem integrada e consciente é possível promover um edificado que seja simultaneamente funcional, eficiente, saudável para os seus utilizadores e harmonioso com o meio ambiente. (Marques, L. M. da S. (2017)

À semelhança do que sucede com o conceito de “Desenvolvimento Sustentável”, também no setor da construção se coloca a exigência de responder às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades. Neste sentido, a Construção Sustentável pode ser entendida como a tradução prática, no domínio da edificação, dos princípios e desafios colocados pelo desenvolvimento sustentável. Representa, portanto, uma resposta direta do setor da construção à crescente preocupação com o impacto ambiental, social e económico das atividades humanas. (Marques, L. M. da S. (2017)

Todavia, importa sublinhar que a popularidade e a difusão que o conceito de Construção Sustentável alcançou nas últimas três décadas não devem fazer esquecer que, ao longo da história da arquitetura e da construção, sempre existiram referências e práticas que procuravam uma maior integração com o meio ambiente e uma utilização racional dos recursos. Exemplos disso encontram-se em técnicas construtivas vernaculares, desenvolvidas em diferentes geografias e épocas, que, mesmo sem uma consciência ambiental formalizada, já incorporavam princípios de eficiência energética, adaptação climática e aproveitamento equilibrado dos materiais locais. Assim, o que hoje se designa por construção sustentável assenta, em parte, na recuperação e reinterpretação desses saberes antigos, agora apoiados pelo conhecimento científico e tecnológico contemporâneo. (Marques, L. M. da S. (2017)

Efetivamente, o setor da construção tem procurado, de forma cada vez mais consciente, responder às exigências de um mundo em constante transformação, no qual a escassez de recursos e a pressão ambiental se tornaram desafios inadiáveis. A aplicação prática do conceito de “Construção Sustentável”, alicerçada nos seus sete princípios fundamentais, ao longo de todas as fases do ciclo de vida de um edifício – desde a conceção e a escolha de materiais até à sua manutenção, utilização e eventual demolição – constitui uma ferramenta essencial para orientar o setor rumo a uma maior responsabilidade ambiental e social. (Marques, L. M. da S. (2017)

Esta abordagem permite definir metas e objetivos claros, facilitando a sua quantificação, monitorização e simplificação, de modo a torná-los mais compreensíveis e alcançáveis por todos os intervenientes. Ao mesmo tempo, possibilita a recolha sistemática de indicadores e a identificação de tendências, o que se traduz numa base sólida para a tomada de decisões informadas e sustentáveis. Deste modo, arquitetos, engenheiros, empreiteiros e demais profissionais podem adequar as suas escolhas a critérios de sustentabilidade previamente definidos, reforçando a coerência entre o edificado e o meio envolvente. (Marques, L. M. da S. (2017)

Em última análise, esta prática contribui para o desenvolvimento de uma relação mais equilibrada entre o ambiente natural e o ambiente construído, estimulando soluções que não apenas reduzem impactos negativos, mas também acrescentam valor ao território, à qualidade de vida das populações e à preservação dos recursos para as gerações futuras. (Marques, L. M. da S. (2017)

O conceito de “Construção Sustentável” tem, entretanto, vindo naturalmente a evoluir e, numa das suas mais recentes definições, determinar-se-ia que o ato de construir deveria, não só integrar as preocupações relacionadas com o impacto ambiental, social ou económico associados à construção de um edifício, mas também se deveria focar na melhoria. (Marques, L. M. da S. (2017)

## **1.2 Objetivos da Dissertação**

O principal objetivo desta dissertação é analisar o papel dos materiais de construção sustentáveis no contexto atual, explorando como a sua adoção pode contribuir para a eficiência, a redução do impacto ambiental e a resposta aos desafios do setor da construção. Especificamente, pretende-se:

- Caracterizar a sustentabilidade dos materiais tradicionais e compará-los com os materiais sustentáveis modernos.
- Avaliar o desempenho ambiental, social e económico dos sistemas construtivos sustentáveis, com foco em soluções industrializadas e em reabilitação energética.
- Identificar as vantagens e limitações dos materiais sustentáveis, nomeadamente em termos de eficiência energética, conforto térmico e acústico, e durabilidade.
- Propor recomendações para a integração destes materiais e sistemas na prática profissional, considerando as implicações para o projeto, a execução e a manutenção de edifícios.

## **1.3 Organização da Dissertação**

A dissertação está organizada em cinco capítulos principais, cada um com uma função específica:

- Capítulo 1 – Introdução: Apresenta o enquadramento geral, os objetivos da investigação e a estrutura da dissertação.
- Capítulo 2 – Revisão da literatura: Explora os conceitos de sustentabilidade, as normas e certificações ambientais e os principais estudos sobre materiais e sistemas construtivos sustentáveis.
- Capítulo 3 – Materiais usados na construção tradicional: Analisa os materiais tradicionais, suas características e impactos ambientais.
- Capítulo 4 – Sustentabilidade dos materiais de construção: Detalha as inovações e tecnologias dos materiais sustentáveis, incluindo painéis pré-fabricados, sistemas com cortiça, Leca, *Light Steel Framing*, entre outros, e analisa o impacto social e económico da sua adoção.
- Capítulo 5 – Análise dos resultados: Sintetiza e discute os principais resultados obtidos, destacando as implicações para a prática profissional e sugerindo pistas para futuros trabalhos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Definição dos materiais de construção

Os materiais de construção constituem a base física de qualquer edificação, determinando não apenas a sua durabilidade e funcionalidade, mas também o seu impacto ambiental e a sua integração no meio envolvente. De forma geral, podem ser definidos como todas as substâncias naturais ou transformadas pelo homem que, direta ou indiretamente, são utilizadas na execução de obras de engenharia e arquitetura, com o objetivo de garantir resistência, estabilidade, conforto e estética.

De acordo com manuais introdutórios de materiais de construção, estes podem ser entendidos como todos os produtos naturais ou transformados utilizados na execução de obras de engenharia e arquitetura. (Lopes, 2017) (Portal da Construção, s.d.)

A classificação destes materiais pode ser realizada a partir de diferentes critérios. Um dos mais comuns diz respeito à sua origem, distinguindo-se os materiais naturais – como a madeira, a pedra ou a terra crua –, que são utilizados de forma mais próxima do estado em que se encontram na natureza, e os materiais sintéticos, resultantes de processos industriais, como o cimento, o vidro, os plásticos ou os compósitos. Outra forma de categorização tem em conta a sua função estrutural, diferenciando os materiais que participam diretamente na estabilidade da construção, como o betão, o aço e a madeira, que daqueles que desempenham papéis secundários ou complementares, como os revestimentos ou os isolamentos. Esta forma de classificação é consensualmente utilizada na literatura técnica sobre materiais de construção civil. (Lopes, 2017) (Portal da Construção, s.d.)

Importa ainda salientar a durabilidade e a resistência como critérios fundamentais de avaliação. Enquanto alguns materiais são mais sensíveis à ação da água, à temperatura ou a agentes biológicos, outros conseguem resistir de forma mais eficaz ao desgaste e ao envelhecimento. A adequação de um material às condições climáticas locais é, por isso, determinante: a madeira, por exemplo, revela-se adequada em contextos florestais, onde existe disponibilidade abundante e conhecimento técnico acumulado, enquanto o xisto e o granito são características de zonas serranas, pela sua resistência e proximidade geográfica. A importância da durabilidade, da resistência e da adequação às condições ambientais locais é amplamente referida em manuais de materiais de construção e em guias de construção sustentável. (Município de Palmela, 2021) (Silva, Alves, & Marques, 2023)

Deste modo, a escolha dos materiais de construção não deve ser entendida apenas como uma questão técnica ou estética, mas também como uma decisão que envolve a sustentabilidade. A caracterização dos materiais deve integrar, desde o início, parâmetros ambientais e sociais, garantindo que o material cumpre a sua função ao

mesmo tempo que contribui para uma construção mais equilibrada e responsável (Pacheco Torgal & Jalali, 2010; Município de Palmela, 2021).

A arquitetura vernacular constitui um exemplo paradigmático dessa articulação entre desempenho técnico, adequação climática e contexto sociocultural. Tem sido entendida como a expressão arquitetónica das comunidades, refletindo os seus dialetos étnicos, regionais e locais, e resultando de construções realizadas por não especialistas. Esta forma de arquitetura procura adaptar-se às condições climáticas, aos materiais disponíveis e às técnicas artesanais de cada região, traduzindo a cultura, os costumes e o modo de vida das comunidades locais (Fuentes Pardo, 2023). Este enquadramento é particularmente relevante para a análise dos materiais tradicionais desenvolvida no capítulo seguinte, onde se evidenciam as relações entre recursos locais, saber/fazer construtivos e princípios de sustentabilidade implícitos.

## **2.2 Avaliação do impacto ambiental com a avaliação do ciclo de vida (ACV / LCA)**

O conceito de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conhecido internacionalmente como *Life Cycle Assessment (LCA)*, surgiu nos Estados Unidos em 1990. Contudo, desde a década de 1970 já se realizavam estudos semelhantes, então designados por *Resource and Environmental Profile Analysis (REPA)*. (Ferreira, 2015)

Um dos primeiros trabalhos de relevo foi conduzido em 1969 pelo *Midwest Research Instituto (MRI)* para a empresa Coca-Cola. Este estudo analisava o consumo de recursos, as emissões e os resíduos associados a diferentes tipos de embalagens para bebidas. Apesar de nunca ter sido publicado, devido ao seu carácter confidencial, serviu de base às decisões estratégicas da empresa nos anos seguintes. Entre as conclusões mais significativas destacou-se o facto de demonstrar que as garrafas de plástico não apresentavam um desempenho ambiental necessariamente inferior ao das garrafas de vidro – contrariando a perceção negativa que os plásticos então tinham, muitas vezes sustentada em interpretações erradas. (Ferreira, 2015)

Já em 1972, o mesmo instituto (MRI) desenvolveu um estudo para a *U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)*, centrado nas embalagens de vidro reutilizáveis em comparação com latas e garrafas descartáveis. O objetivo era avaliar as implicações ambientais da rápida substituição de embalagens reutilizáveis por alternativas descartáveis. Este trabalho foi considerado um marco, por envolver diversas indústrias – vidro, aço, alumínio, papel e plástico – e mais de 40 materiais distintos, tornando-se o estudo REPA mais ambicioso até à época. (Ferreira, 2015)

Durante a década de 1980, a Suíça desempenhou um papel central no avanço da metodologia, através do Laboratório Federal Suíço para Teste e Investigação (EMPA). Em 1984, foi publicado o relatório Balanço Ecológico de Materiais de Embalagem, encomendado pelo governo suíço, que avaliava materiais como o alumínio, vidro, plásticos, papel e cartão, introduzindo uma metodologia inovadora

para normalizar e agregar emissões para o ar e para a água, através dos conceitos de “volume crítico do ar” e “volume crítico de água”. Este método foi posteriormente refinado e deu origem ao cálculo dos chamados ecopontos, desenvolvido por Ahbe, Braunschweig e Muller-Wenk (1991). Em paralelo, na Holanda, Druijff trabalhava numa abordagem semelhante, de forma independente. (Ferreira, 2015)

A partir da década de 1990 verificou-se um crescimento significativo das atividades relacionadas com ACV, sobretudo na Europa e nos EUA. Um dos principais motores desta evolução foi a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)*, que passou a reunir investigadores, profissionais e utilizadores, promovendo a consolidação da metodologia e da sua terminologia. Para harmonizar práticas e responder ao aumento da procura por orientações metodológicas, especialmente na Europa, a SETAC organizou, em 1993, um workshop em Sesimbra, Portugal, que resultou no documento *Code of Practice*. Este texto representou um consumo metodológico entre a perspetiva europeia e a norte-americana sobre a ACV. (Ferreira, 2015)

Paralelamente, em 1992 foi criada a Sociedade para a Promoção do Desenvolvimento do Ciclo de Vida (*Society for the Promotion of LCA Development – SPOLD*), com o objetivo de reunir esforços e acelerar a evolução da metodologia, consolidando-a como uma ferramenta de apoio à tomada de decisões e à gestão ambiental. (Ferreira, 2015)

Em 1992, a Organização Internacional de Normalização (ISO) criou o comité técnico (TC 207/SC 5), com o objetivo de estabelecer normas que orientassem diferentes abordagens de gestão ambiental, entre as quais a Avaliação do Ciclo de Vida (AVC). Desde então, têm vindo a ser publicadas diversas normas específicas relacionadas com a ACV, que contribuem para a sua padronização e aplicação consistente a nível internacional: (Ferreira, 2015)

- ISO 14040: 1997 – *Environmental management, Life cycle assessment – Principles and Framework;*
- ISO 14041: 1998 – *Environmental management, Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis;*
- ISO 14042: 2000 – *Environmental management, Life cycle assessment – Life cycle interpretation;*
- ISO/TR 14049: 2000 – *Environmental management, Life cycle assessment – Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis;*
- ISO/TS 14048: 2002 – *Environmental management, Life cycle impact assessment - data documentation format;*
- ISO/TR 14047: 2003 – *Environmental management, Life cycle impact assessment – Examples of application of ISO 14042.*

A crescente consciencialização relativamente aos impactos ambientais do setor da construção trouxe para a investigação científica e para a prática profissional a necessidade de avaliar os materiais não apenas pelas suas propriedades técnicas, mas também pela sua pegada ecológica. Neste sentido, análise do ciclo de vida (ACV) surge como uma das metodologias mais relevantes e amplamente reconhecidas. (Município de Palmela, 2021) (Universidade do Minho, 2014)

A ACV consiste numa abordagem sistemática que avalia os impactos ambientais de um material ao longo de todo o seu ciclo de vida: desde a extração das matérias-primas, passando pelo processamento e transporte, até à fase de utilização, e, finalmente, à sua demolição, reciclagem ou deposição final. Este processo permite ter uma visão global e comparativa do desempenho ambiental de diferentes soluções construtivas, tornando-se assim uma ferramenta essencial para apoiar decisões sustentáveis. (Município de Palmela, 2021) (Universidade do Minho, 2014)

Os principais parâmetros de avaliação numa ACV incluem a pegada de carbono, que mede as emissões de gases com efeito de estufa associadas ao material; o consumo energético, que contabiliza a energia incorporada em cada etapa do ciclo de vida; o consumo de água; e a produção de resíduos, que abrange tanto os resultantes da extração e transformação, como os que ocorrem no fim da vida útil do material. (Município de Palmela, 2021) (Universidade do Minho, 2014)

O primeiro passo consiste em definir com clareza o objetivo do estudo: por exemplo, comparar o impacto ambiental de um painel de betão ecoeficiente com um painel em betão convencional, ou avaliar o ciclo de vida de uma parede em LSF versus alvenaria. Nesta fase define-se também a unidade funcional (por exemplo, 1 m<sup>2</sup> de parede com determinada resistência térmica, ou 1 edifício durante 50 anos) e as fronteiras do sistema, ou seja, que fases do ciclo de vida serão incluídas: “do berço ao portão” (*cradle-to-gate*: produção até à saída da fábrica), “do berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*: produção, construção, utilização e fim de vida) ou “do berço ao berço” (*cradle-to-cradle*: incluindo reciclagem e reutilização). (Projeto EnerBuiLCA, 2012)

Em seguida, o sistema é decomposto nas diferentes etapas do ciclo de vida. Para edifícios e materiais de construção, seguem-se normalmente as recomendações do CEN/TC 350 e normas associadas, que estruturam o ciclo de vida em quatro grandes estágios: produção, construção, utilização e fim de vida. Cada estágio pode ser subdividido em módulos: (Projeto EnerBuiLCA, 2012) (CYPE, s.d.)

- Produção: (A1 – A3):
  - A1 – extração e processamento das matérias-primas (minério de ferro, calcário, cortiça, argila, etc.);
  - A2 – transporte das matérias-primas até às unidades de fabrico;
  - A3 – processos industriais de fabrico do produto (produção de cimento, betão, aço, painéis, etc.).
- Processo de construção: (A4-A5):

- A4 – transporte dos produtos até ao estaleiro;
- A5 – atividades de construção e instalação, incluindo consumos de energia, desperdícios em obra e eventuais perdas de material.
- Utilização (B1-B7):
  - B1 – fase de uso do produto;
  - B2–B5 – manutenção, reparação, substituição e reabilitação;
  - B6–B7 – consumos operacionais de energia e água associados à utilização do edifício, quando incluídos no escopo da ACV.
- Fim de Vida (C1-C4):
  - C1 – demolição ou desconstrução.
  - C2 – transporte de resíduos.
  - C3 – triagem, reciclagem ou valorização.
  - eliminação final (aterro, incineração).

No contexto desta dissertação, esta estrutura modular do ciclo de vida é particularmente relevante, uma vez que permite comparar de forma consistente soluções baseadas em materiais tradicionais, como a pedra ou o adobe, com sistemas industrializados como o Light Steel Framing, os painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente ou os sistemas de isolamento em cortiça, avaliando não apenas a fase de produção, mas também o desempenho em utilização e o fim de vida. (Projeto EnerBuiLCA, 2012) (CYPE, s.d.)

Concluída a definição e modelação do sistema, passa-se à fase de inventário do ciclo de vida (*Life Cycle Inventory – LCI*), que consiste na recolha e quantificação de todos os fluxos de entrada e saída associados a cada etapa. Esta fase implica levantar dados relativos a consumos de energia (eletricidade, combustíveis), quantidades de matérias-primas, água e auxiliares de produção, bem como emissões atmosféricas, descargas em meio hídrico e produção de resíduos. As fontes de informação podem incluir bases de dados especializadas de ACV, declarações ambientais de produto emitidas por fabricantes, medições específicas em fábrica e em obra e bibliografia técnica. No caso dos materiais de construção, é frequente a utilização de declarações ambientais em conformidade com normas europeias, que estruturam os dados por módulos de ciclo de vida e garantem maior comparabilidade entre produtos. (Projeto EnerBuiLCA, 2012) (CYPE, s.d.)

A etapa seguinte corresponde à avaliação de impactos do ciclo de vida (*Life Cycle Impact Assessment – LCIA*), na qual os fluxos inventariados são convertidos em indicadores de impacto ambiental. Para o setor da construção, os indicadores mais comuns incluem o potencial de aquecimento global, expresso em quilogramas de dióxido de carbono equivalente, o consumo de energia primária renovável e não renovável, o consumo de água doce e a produção de resíduos perigosos e não perigosos, entre outros. Cada fluxo de inventário (por exemplo, uma quantidade de CO<sub>2</sub> emitida ou uma quantidade de energia consumida) é associado a fatores de

caracterização próprios dos métodos de avaliação adotados, obtendo-se assim valores agregados de impacto para cada módulo ou fase do ciclo de vida. (Projeto EnerBuiLCA, 2012) (CYPE, s.d.) (Nunes & Cruz, 2021)

Diversos estudos de ACV em edifícios demonstram que, para muitas tipologias, a fase de utilização tende a ser a principal responsável pelos impactos globais, sobretudo em termos de energia e emissões, enquanto a contribuição dos materiais é mais significativa em soluções com forte presença de betão e aço. Esta evidência reforça a importância de articular a escolha de materiais de menor impacto incorporado com estratégias de melhoria do desempenho térmico, como as analisadas nesta dissertação.

Por fim, procede-se à interpretação dos resultados, etapa em que se analisam criticamente os indicadores obtidos, identificando-se as fases, materiais ou processos com maior contributo para os impactos globais, bem como as oportunidades de melhoria. Nesta fase, podem ser comparadas diferentes alternativas de materiais ou sistemas construtivos, avaliados cenários de otimização, como o aumento da incorporação de conteúdos reciclados, a redução de espessuras, a alteração de rotas de transporte ou a melhoria da durabilidade dos elementos. É igualmente fundamental explicitar as principais limitações do estudo, nomeadamente a qualidade e representatividade dos dados, as simplificações adotadas e os módulos eventualmente excluídos da análise. (Projeto EnerBuiLCA, 2012) (CYPE, s.d.) (Nunes & Cruz, 2021)

Exemplos comparativos ajudam a ilustrar a utilidade desta metodologia. A madeira, por exemplo, apresenta uma energia incorporada significativamente mais baixa do que o betão ou o aço, o que se traduz em menores emissões de carbono e menor impacto ambiental. Já materiais como o alumínio, embora recicláveis, possuem um elevado consumo energético na fase de produção, o que exigem uma análise ponderada da sua utilização. (Município de Palmela, 2021) (Universidade do Minho, 2014)

Todavia, importa destacar que a ACV também apresenta limitações e desafios. A falta de dados consistentes e comparáveis, a variabilidade associada ao contexto geográfico, ou mesmo as diferenças metodológicas na forma como os impactos são contabilizados, podem comprometer a fiabilidade dos resultados. Ainda assim, enquanto ferramenta científica e prática, a ACV constitui um instrumento fundamental para a integração da sustentabilidade no setor da construção. (Município de Palmela, 2021) (Universidade do Minho, 2014)

Assim, a ACV deve ser entendida menos como um valor absoluto e mais como uma ferramenta comparativa de apoio à decisão, dependente do contexto, das hipóteses adotadas e da qualidade dos dados disponíveis. No âmbito desta dissertação, a metodologia é utilizada de forma simplificada e com base em fontes secundárias, com o objetivo de enquadrar, de forma coerente, as diferenças de desempenho entre materiais tradicionais e materiais sustentáveis, e não de produzir inventários

exaustivos para cada solução construtiva. (Município de Palmela, 2021) (Universidade do Minho, 2014)

## **2.3 Normas e Certificações ambientais**

A implementação de práticas mais sustentáveis no setor da construção não se limita à escolha de materiais ou à utilização de ferramentas como a ACV. Envolve também um quadro normativo e de avaliação que permita comparar soluções, harmonizar metodologias e garantir transparência perante projetistas, empreiteiros, fabricantes e utilizadores. Nesse contexto, normas e sistemas de certificação ambiental assumem um papel central, ao estabelecer critérios, indicadores e requisitos mínimos de desempenho que orientam o mercado para edifícios e materiais mais eficientes e responsáveis. (Município de Palmela, 2021) (ADENE, 2020)

No que respeita às normas internacionais, destaca-se a ISO 14040, que define os princípios e a estrutura geral da Avaliação do Ciclo de Vida, assegurando que os estudos sejam conduzidos de forma consistente e comparável. Em complemento, a ISO 14044 detalha requisitos e orientações para a definição de objetivos, inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados, sendo amplamente utilizada em estudos de ACV aplicados a materiais de construção. No contexto europeu, a norma EN 15804 assume particular relevância ao estabelecer regras de categoria de produto para produtos de construção, servindo de base à elaboração de Declarações Ambientais de Produto (DAP), que apresentam, de forma normalizada e verificável, o desempenho ambiental de cada produto ao longo do seu ciclo de vida. (Município de Palmela, 2021) (Ecosativa, 2025) (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.)

Em termos metodológicos, a DAP pode assumir diferentes níveis de abrangência. Numa abordagem mais restrita, a avaliação incide apenas sobre as fases de extração das matérias-primas, fabrico e transporte até ao estaleiro, permitindo caracterizar os impactos associados à produção do elemento pré-fabricado. Numa abordagem mais completa, a análise estende-se a todo o ciclo de vida, incluindo utilização, manutenção, eventual reabilitação, demolição e as possibilidades de reutilização ou reciclagem do material. Esta segunda abordagem é a mais exigente, mas também a que oferece uma visão mais realista do desempenho global do produto, sendo particularmente relevante quando se pretende comparar soluções construtivas em termos de pegada de carbono e energia incorporada. (Município de Palmela, 2021) (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.)

Para os materiais analisados nesta dissertação, como os painéis pré-fabricados em betão, os sistemas de isolamento em cortiça ou os sistemas Light Steel Framing, a existência de Declarações Ambientais de Produto em conformidade com a EN 15804 é particularmente relevante, uma vez que permite comparar soluções concorrentes com base em indicadores harmonizados de ciclo de vida. Esta normalização é essencial para que projetistas e donos de obra possam tomar decisões informadas quanto ao impacto ambiental real de cada material, para além do seu

desempenho técnico e do custo inicial. (Município de Palmela, 2021) (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.)

Para além das normas, existem sistemas de certificação ambiental de edifícios que se têm afirmado como referenciais globais. O *LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)*, desenvolvido nos Estados Unidos, avalia o desempenho de edifícios em categorias como eficiência energética, gestão da água, seleção de materiais, qualidade do ambiente interior e inovação, atribuindo diferentes níveis de certificação consoante a pontuação obtida. O *BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)*, de origem britânica, segue lógica semelhante, ponderando critérios ambientais, sociais e económicos, e tem sido amplamente aplicado em projetos europeus, incluindo empreendimentos que privilegiam materiais com DAP e baixo impacto ambiental. Em Portugal, destaca-se o sistema *LiderA*, desenvolvido para o contexto nacional, que integra aspetos como desempenho energético, gestão de recursos, impactos locais e integração paisagística, incentivando o uso de materiais com melhor desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida. (Município de Palmela, 2021) (Ecosativa, 2025) (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Iberdrola, s.d.) (SGA Ambiente, s.d.)

Em termos práticos, estes sistemas de certificação valorizam a utilização de produtos com DAP, conteúdos reciclados, baixa energia incorporada e capacidade de reutilização ou reciclagem no fim de vida, critérios em que muitos materiais sustentáveis recentes – como betões ecoeficientes, cortiça e soluções industrializadas leves – podem obter vantagem face a materiais tradicionais de maior intensidade de carbono. Assim, as normas e certificações não funcionam apenas como instrumentos de avaliação, mas também como motores de transformação do mercado, orientando a inovação dos fabricantes e a adoção de sistemas construtivos mais sustentáveis, como os que são discutidos nos capítulos seguintes desta dissertação. (Município de Palmela, 2021) (Ecosativa, 2025) (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Iberdrola, s.d.) (SGA Ambiente, s.d.)

A importância destas normas e certificações ultrapassa a mera validação técnica. Ao funcionarem como selos de qualidade e transparência, contribuem para aumentar a confiança dos utilizadores, para valorizar os edifícios certificados no mercado imobiliário e para criar pressão positiva sobre fabricantes e projetistas no sentido de adotarem materiais mais sustentáveis. Paralelamente, estes instrumentos ajudam os decisores públicos a definir políticas e regulamentos mais exigentes, promovendo a inovação tecnológica e a melhoria contínua do desempenho ambiental do setor da construção. (Município de Palmela, 2021) (Ecosativa, 2025) (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Iberdrola, s.d.) (SGA Ambiente, s.d.)

Em Portugal, o enquadramento legal do desempenho energético dos edifícios de habitação está definido no Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto, que aprova o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH). Este diploma estabelece, entre outros aspetos, o zonamento climático do território nacional, dividindo o país em diferentes zonas em função das condições de inverno

e de verão, o que permite adaptar as exigências de isolamento térmico e de eficiência energética às características específicas de cada região. (Portugal. Governo) (Portugal. Ministério do Ambiente, 2015)

Este zonamento baseia-se na nomenclatura das unidades territoriais para fins estatísticos (NUTS) de nível III, em que cada município pertence a uma das 30 NUTS III. (Portugal. Governo) (Portugal. Ministério do Ambiente, 2015)

Em conjunto com este zonamento são consideradas três zonas climáticas de inverno, representadas nas figuras abaixo apresentadas e três zonas climáticas de verão, representadas nas figuras abaixo. Estas zonas são determinadas com base em parâmetros climáticos locais e ajustados à altitude local. Para aplicação de requisitos de qualidade térmica da envolvente. (Portugal. Governo) (Portugal. Ministério do Ambiente, 2015)

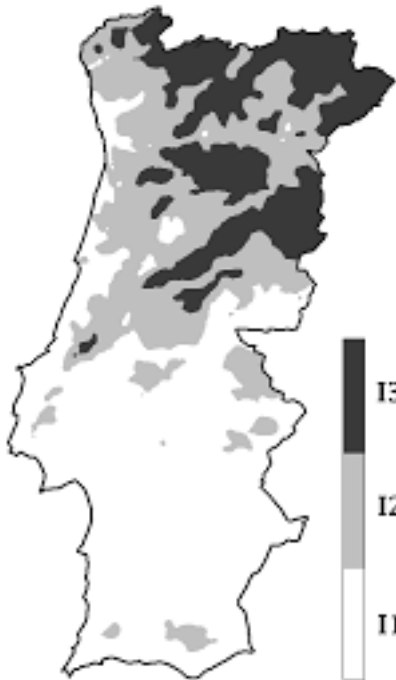


Figura 2 - Zonas climáticas de inverno de Portugal Continental (Portugal. Ministério do Ambiente, 2015)

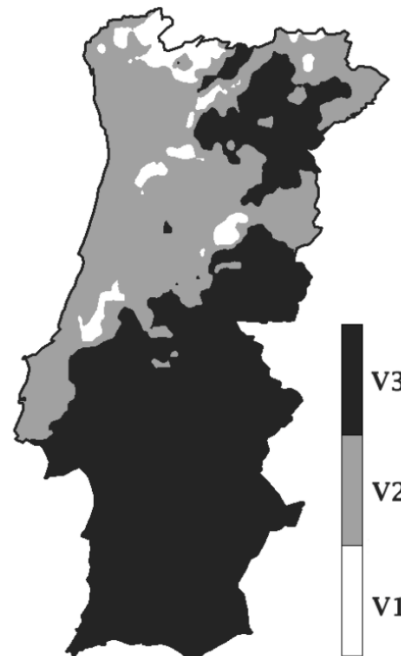


Figura 3 - Zonas climáticas de verão de Portugal Continental (Portugal. Ministério do Ambiente, 2015)

As zonas climáticas de inverno são classificadas com base no número de graus-dias (GD), calculados a partir de uma temperatura de referência de 18°C, correspondendo ao período necessário de aquecimento para manter os espaços interiores confortáveis. Este indicador resulta da diferença entre a temperatura média diária exterior e a temperatura base de 18°C, acumulada ao longo da estação de aquecimento. Quanto maior o número de graus-dias, mais severas são as condições climáticas da região, indicando a necessidade de sistemas de aquecimento mais eficiente e de soluções construtivas adaptadas para minimizar perdas térmicas e

aumentar a eficiência energética. (Portugal. Governo) (Portugal. Ministério do Ambiente, 2015)

A estação de arrefecimento é o período do ano em que as temperaturas exteriores são suficientemente elevadas para que seja necessário o arrefecimento dos espaços interiores dos edifícios, de forma a garantir o conforto térmico dos ocupantes. Durante esta estação, a temperatura ambiente pode exceder os limites considerados confortáveis, levando ao aumento do uso de sistemas de climatização, como ar condicionado ou ventilação natural, para manter condições térmicas adequadas. (Portugal. Governo) (Portugal. Ministério do Ambiente, 2015)

A determinação da estação de arrefecimento é baseada na análise das temperaturas médias diárias e do comportamento térmico dos edifícios, sendo influenciada por fatores como: (Portugal. Governo) (Portugal. Ministério do Ambiente, 2015)

- Zona climáticas: Regiões com climas mais quentes apresentam uma estação de arrefecimento mais prolongada, enquanto regiões mais temperadas ou costeiras podem ter uma necessidade menor de arrefecimento;
- Características do edifício: O nível de isolamento térmico, a orientação solar, os materiais de construção e o uso de sombreamento influenciam a necessidade e a duração do período de arrefecimento;
- Fatores internos: A ocupação, os equipamentos elétricos e outras fontes internas de calor podem antecipar ou prolongar a necessidade de arrefecimento.

Em Portugal, a estação de arrefecimento é considerada no âmbito do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios (REH) para definir requisitos de eficiência energética e conforto térmico. As zonas climáticas de verão (Tabela 3) ajudam a orientar o dimensionamento de soluções passivas e ativas para mitigar os efeitos das altas temperaturas e otimizar o desempenho energético dos edifícios.

Como mostra a tabela 2, para ser uma zona I1 que corresponde a uma região de clima mais ameno, e necessário que a base no número graus-dias seja inferior a 1300 horas, para ser classificada como uma zona I2, que corresponde a uma região que abrange áreas com condições moderadas de inverno, é necessário ser superior a 1300 horas e inferior a 1800 horas, por último, para se classificado como uma zona I3, que corresponde a regiões mais frias como zonas de montanha e interior norte, necessário ser superior a 1800 horas. (Portugal. Ministério do Ambiente, 2013)

Tabela 1 - Critérios para a determinação da zona climática de inverno

<b>Critério</b>	GD ≤ 1300 horas	1300 < GD ≤ 1800	GD > 1800
<b>Zona</b>	I1	I2	I3

Em Portugal, as zonas climáticas de verão são determinadas com base na temperatura média exterior durante a estação de arrefecimento ( $\theta_{ext, v}$ ). Esta classificação é essencial para definir os requisitos de eficiência energética nos edifícios, assegurando conforto térmico adequado e consumo energético otimizado. (Portugal. Ministério do Ambiente, 2013)

Tabela 2 - Critérios para a determinação da zona climática de verão

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

Conforme mostra a tabela 3, as zonas climáticas de verão são definidas da seguinte maneira: (Portugal. Ministério do Ambiente, 2013)

- Zona V1: Abrange regiões onde a temperatura média exterior durante a estação de arrefecimento é inferior ou igual a  $20^\circ\text{C}$ , ou seja, essas áreas geralmente possuem verões mais amenos, resultando em menores necessidades de arrefecimento nos edifícios;
- Zona V2: Inclui áreas onde a temperatura média exterior está entre  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , ou seja, essas regiões apresentam verões moderadamente quentes, exigindo soluções de arrefecimento mais eficazes para manter o conforto térmico;
- Zona V3: Refere-se a locais onde a temperatura média exterior excede  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  durante a estação de arrefecimento, sendo zonas onde são caracterizadas por verões quentes, requerendo sistemas de arrefecimento mais robustos e estratégias de construção que minimizem o ganho de calor.

### **3 MATERIAIS USADOS NA CONSTRUÇÃO TRADICIONAL**

#### **3.1 Contexto histórico e cultural da construção tradicional**

Antigamente, devido à falta de tecnologia para usar diversas fontes de energia disponíveis, os edifícios eram concebidos utilizando formas passivas. Estas medidas eram simples, tendo em atenção as condições de cada local, e deste modo eram implementadas tendo em atenção as características geográficas, orientação solar, geometria, forma, materiais, entre outras. Quando o homem sentiu a necessidade de criar um abrigo para se proteger, sem terem conhecimento da energia térmica, leis da termodinâmica, mas em contrapartida e de maneira sensorial e empírica, tinha a noção da relação existente com o clima, forma, material de construção, e principalmente do bem-estar físico. Foram necessárias várias gerações para chegarem de forma racional aos processos construtivos de modo a ter um maior ganho possível. (Fernandes, 2012)

A influencia do ambiente e dos recursos locais na construção tradicional é um dos principais fatores que moldam a arquitetura em diferentes regiões e épocas. Os métodos e materiais usados eram diretamente determinados pelas condições climáticas e geográficas, assim como pela disponibilidade de recursos naturais. Esta interligação resultava em edifícios que se integravam harmoniosamente com a sua envolvente, enquanto garantiam conforto e sustentabilidade. (Fuentes Pardo, 2023) Com o passar dos anos, os métodos construtivos tradicionais e os materiais utilizados tinham uma variação significativa ao longo das várias décadas e das várias regiões, apesar disso tinham de ter atenção sobre a influência dos fatores, tais como, a geografia, o clima, a disponibilidade de recursos locais e as tradições culturais de cada região. Devido a estes fatores, houve uma necessidade de se fazer uma adaptação das várias situações para conseguir dar uma resposta positiva às condições ambientais diferentes que cada região proporcionava. (Fuentes Pardo, 2023)

O clima desempenhou um papel crucial na escolha dos materiais e métodos construtivos. Nas regiões desérticas do Medio Oriente e do Norte de África, onde o calor extremo é uma constante, materiais como o adobe (tijolos de barro secos ao sol) e a taipa (argila compactada misturada com palha) tinham uma ampla utilização. Estes materiais proporcionavam um excelente isolamento térmico, mantendo os interiores frescos durante o dia e quentes à noite. A arquitetura destas regiões reflete, assim, uma preocupação com a temperatura, essencialmente para a sobrevivência em climas desérticos. (Fuentes Pardo, 2023) (Vagtholm, Matteo, Vand, & Tupenaite, 2023)

Em contraste, nas regiões temperadas da Europa, como o norte da Alemanha e a Escandinávia, a madeira tornou-se o material de construção predominante devido à abundância de florestas, mas também pela capacidade de fornecer isolamento térmico contra o frio. O uso de telhados inclinados comuns nesta área, ajudava a prevenir o acúmulo da neve, garantindo assim a integridade estrutural do edifício

durante as épocas mais frias do ano. A técnica de construção em enxaimel, como podemos observar na figura 1 (estrutura de madeira com preenchimento de argila ou tijolos) foi particularmente popular em muitas regiões da Europa central. Nas áreas mais expostas ao frio e à humidade, o uso de materiais como a ardósia e o telhado de colmo (palha) também era comum para garantir melhor proteção contra as intempéries.



Figura 4 - Técnica de enxaimel (Fonte: Google Imagens)

Como podemos observar na figura 2, as habitações nessa localidade da Suíça eram concebidas com a utilização de técnicas construtivas tradicionais, de forma a obter um maior ganho para os seus utilizadores. Assim, as coberturas eram executadas de forma inclinada, para evitar que o excesso de neve no local pudesse degradar os elementos construtivos, e evitar que a neve permanecesse durante muito tempo na cobertura, pois caso permaneça durante algum tempo na cobertura irá passar para o estado sólido, formando gelo, e se passar para esse estado irá exercer uma maior força sobre os elementos construtivos, podendo, em casos extremos, existir o desabamento dos edifícios.



Figura 5 - Edifícios nos alpes suíços

Na tabela 1, podemos observar o peso volúmico do gelo e da neve, deste modo podemos comprovar que o gelo é sensivelmente 7 vezes mais pesado que a neve, neste caso, caso o gelo permaneça durante mais tempo nas coberturas irá degradar os elementos da cobertura.

Tabela 3 - Peso volúmico da neve e do gelo

<b>Materiais</b>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Neve</b>	125
<b>Gelo</b>	900

Nas zonas montanhosas, como os Alpes ou a Grécia Antiga, a pedra foi o material preferido, devido à sua durabilidade e resistência. Nas ilhas do mediterrâneo, os materiais eram escolhidos com base na proximidade ao mar, com a utilização de calcário, conchas e areia nas construções costeiras, que garantiam uma maior resistência às condições salinas. A arquitetura tradicional grega, por exemplo, usava blocos de mármore e calcário, em construções como templos, que sobreviveram durante séculos. (Hu, 2023)

Além do ambiente físico, as práticas culturais e sociais também moldaram a escolha dos materiais. Em regiões como a Ásia ou África, a tradição de construção com materiais renováveis, como a madeira, o bambu e a palha, esta intimamente ligada a uma filosofia de harmonia com a natureza. Estes materiais, além de ecológicos, permitiam a fácil substituição e reparação das estruturas, promovendo uma abordagem circular à construção. (Vagtholm, Matteo, Vand, & Tupenaite, 2023)

Ao longo dos tempos, as técnicas construtivas também evoluíam de acordo com os avanços tecnológicos e as trocas culturais. Durante a época romana, o uso de novos materiais, como o betão, e a introdução de técnicas como os arcos e as abóbadas, permitiram a construção de grandes infraestruturas, como aquedutos e coliseus, expandindo as possibilidades de construção. Na Idade Média, na Europa, surgiram novos métodos, como os arcos ogivais e os contrafortes, fundamentais para a arquitetura das grandes catedrais góticas. (Fuentes Pardo, 2023)

Com a chegada da revolução industrial, a mecanização e a produção em série de materiais, como o aço e o vidro, revolucionaram a construção urbana. Os métodos tradicionais começaram a ser substituídos por novas técnicas que possibilitavam construções mais rápidas, altas e duráveis. No entanto, em muitas regiões, as técnicas tradicionais continuaram a ser usadas, preservando o conhecimento transmitido de geração em geração. (Fuentes Pardo, 2023)

Grande parte das práticas utilizadas nos projetos e construções vernaculares estão alinhadas com os princípios da sustentabilidade, uma vez que são ecologicamente responsáveis e requerem menos energia. A utilização de materiais locais e de técnicas de construção conhecidas pelos construtores da região é uma característica essencial deste tipo de arquitetura, conferindo-lhe uma identidade própria que varia de região para região. No entanto, a produção em série de materiais industrializados tem contribuído para o desaparecimento de técnicas tradicionais e de materiais locais, enfraquecendo, assim, estas práticas ancestrais. (Fuentes Pardo, 2023)



Figura 8 - Arquitetura Vernacular do Pólo Norte



Figura 9 - Arquitetura Vernacular Africana



Figura 7 - Arquitetura Vernacular da Malásia



Figura 6 - Arquitetura Vernacular Portuguesa

A arquitetura vernacular caracteriza-se por estar em harmonia com o meio envolvente, integrando-se de forma equilibrada com o ambiente, o local e as necessidades das pessoas. O clima assume um papel fundamental como referência na sua conceção. Este tipo de arquitetura surge sem intervenção de pessoas especializadas, e era desenvolvida pela população local com base em conhecimentos transmitidos de geração em geração. A sua construção assenta no uso de materiais e técnicas disponíveis no contexto geográfico e temporal em que se insere, refletindo as tradições e os recursos existente na região. (Castanhas, 2020)

Muitos estudos da arquitetura vernacular destacam que o uso de materiais locais não era apenas uma questão de conveniência, mas também uma prática sustentável. A ausência de transporte de materiais a longas distâncias reduzia a pegada de carbono associada à construção. Além disso, os edifícios eram projetados para tirar o máximo partido do ambiente circundante, utilizando a orientação solar, o vento e as condições naturais para garantir o conforto térmico sem a necessidade de sistemas modernos de aquecimento ou arrefecimento. (Fuentes Pardo, 2023)

Atualmente, há um crescente interesse em resgatar estas práticas tradicionais, sobretudo pela sua sustentabilidade. O uso de materiais naturais, como a terra, a madeira e a pedra, é valorizado pelas suas propriedades ecológicas e pelo baixo impacto ambiental. A arquitetura vernácula, que utiliza estes materiais e adapta as construções às condições climáticas locais, é muitas vezes vista como um modelo de eficiência e respeito pelo meio ambiente. (Fuentes Pardo, 2023)

Com base na distribuição da litologia portuguesa em Portugal continental é frequente encontrar edifícios tradicionais de cada região, deste modo eram utilizadas as seguintes rochas: (Peixoto, 2008)

- Minho, Douro Litoral e Beira Litoral – é comum encontrar construções em granito e xisto;
- Litoral – é frequente encontrar construções utilizando tijolos de adobe;
- Trás-os-Montes e Alto Douro – é frequente encontrar construções em granito;
- Beira Alta e Beira Baixa – é comum encontrar construções em granito e xisto;
- Estremadura e Ribatejo – é dominante as construções utilizando o calcário, e nas zonas exista poucos recursos disponíveis utiliza-se taipa, adobe e tijolo;
- Alentejo – é predominante as construções de taipa e tijolos de maciços de barro;
- Algarve – são executadas construções em adobe, taipa, xisto e rochas vulcânicas.

As condições climáticas desempenham um papel determinante na definição e aplicação de diferentes técnicas construtivas locais. Estas adaptações refletem não apenas a necessidade de responder às características específicas de cada região, como

temperatura, humidade e precipitação, mas também a busca por soluções que promovam o conforto térmico dos espaços. Assim, compreender e aplicar esse conhecimento torna-se essencial, pois a correta adaptação de um edifício às condições climáticas e ao contexto local não só melhora a eficiência energética e o desempenho ambiental, como também contribui para uma construção mais sustentável e integrada com o meio envolvente. (Pereira, 2015)

Para ter uma melhor abordagem sobre a constituição geológica de Portugal, podemos observar na imagem 8 que apresenta a sua disposição a nível continental. Podemos identificar com a cor verde, os locais onde existe uma abundância de xisto, mármore e quartzo, nesse sentido podemos encontrar edifícios construídos à base desses materiais. Nas regiões dos arquipélagos podemos observar edifícios construídos com basaltos, pois é uma rocha que predomina nas regiões. Com a cor rosa podemos observar que a rocha que predomina no local é o granito.

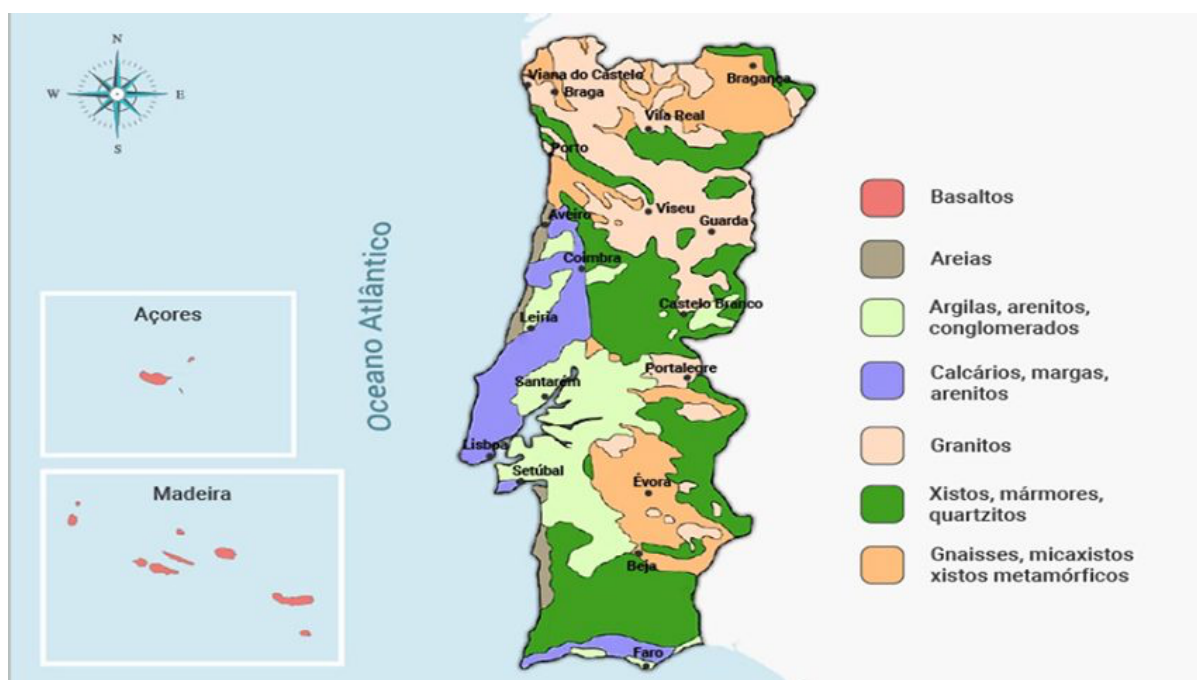


Figura 10 - Carta Geológica de Portugal

A utilização de materiais locais (e produtos derivados) e de técnicas tradicionais caracteriza-se por um impacto ambiental reduzido e uma baixa energia incorporada nos edifícios construídos com esses métodos. Este fato deve-se à proximidade das fontes de materiais e à simplicidade dos processos de extração, transporte e construção, que frequentemente dependiam de trabalho manual e ferramentas simples. (Peixoto, 2008)

Antes da massificação e padronização dos produtos industriais de construção, os materiais utilizados eram, na sua maioria, naturais e extraídos diretamente das imediações do local de construção, como a terra, madeira, pedra e fibras vegetais.

Este método reduzia significativamente os impactos ambientais associados à produção e transporte, que são fatores predominantes na construção moderna. Além disso, os processos manuais e a ausência de maquinaria pesada contribuíam para um consumo de energia quase nulo. (Peixoto, 2008)

Essas práticas, profundamente enraizadas no saber local, priorizavam a sustentabilidade inerente às comunidades, sendo adaptadas às condições climáticas e às necessidades específicas da região. O resultado eram edifícios com um elevado nível de eficiência ambiental e um impacto praticamente nulo quando comparados com as construções contemporâneas, dependentes de materiais industrializados e processos intensivos em energia. (Peixoto, 2008)

A industrialização dos produtos de construção civil marcou uma transformação significativa no setor, introduzindo novos materiais e sistemas construtivos que, além de ampliar as possibilidades arquitetônicas, também tornaram os materiais acessíveis a regiões mais distantes dos locais de produção. Essa expansão geográfica permitiu a padronização das soluções construtivas, promovendo maior uniformidade e eficiência nos processos construtivos. (Peixoto, 2008)

Os novos produtos, como blocos de betão, painéis pré-fabricados e isolamentos térmicos, foram desenvolvidos com o objetivo de melhorar os desempenhos térmicos e energéticos dos edifícios, atendendo à procura de eficiência e sustentabilidade. Adicionalmente, a industrialização trouxe avanços tecnológicos que revolucionaram os métodos de construção, substituindo, em grande parte, o trabalho manual por processos mecanizados. (Peixoto, 2008)

Equipamentos como retroescavadoras, guias e autobetoneiras não só reduziram o tempo e o esforço necessário para a execução das obras, como também possibilitaram a construção em larga escala e em menor tempo. Este aumento de produtividade foi acompanhado por uma redução nos custos associados à mão de obra e à execução de projetos mais complexos, abrindo caminho para a modernização da arquitetura e do urbanismo. (Peixoto, 2008)

A modernização da construção civil, no entanto, também trouxe desafios relacionados ao aumento da pegada ecológica, devido ao consumo de energia e recursos naturais na fabricação e transporte desses produtos. Este contexto reforça a importância de equilibrar os benefícios da industrialização com estratégias que minimizem os impactos ambientais, como a adoção de práticas sustentáveis e materiais de baixo impacto. (Peixoto, 2008)

A localização geográfica das rochas tem uma influência direta na escolha dos materiais utilizados nas construções locais. A relação entre o ser humano e o meio ambiente é dinâmica, com ambos a influenciarem-se mutuamente. Da mesma forma, os edifícios são profundamente impactados pelo contexto em que se inserem, sendo moldados pelo clima, pela envolvente natural e pelas condições económicas, sociais e culturais da região. Estes fatores específicos de cada local refletem-se nas distintas técnicas construtivas adotadas, resultando numa arquitetura tradicional diversificada, característica de diferentes regiões geográficas e climáticas. Assim, as técnicas e

materiais utilizados variam de acordo com as necessidades de adaptação das construções ao ambiente envolvente. (Pereira, 2015)

As condições climáticas de uma determinada região desempenham um papel fundamental na definição das técnicas construtivas tradicionais, uma vez que influenciam diretamente a escolha dos materiais e os métodos de construção utilizados localmente. O conhecimento aprofundado destas especificidades climáticas é essencial, pois permite uma adaptação mais eficiente dos edifícios ao meio envolvente. A consideração criteriosa de fatores como a temperatura, humidade, a precipitação e a radiação solar contribui significativamente para a criação de soluções arquitetónicas que proporcionam um elevado nível de conforto térmico aos ocupantes. Além disso, uma construção adaptada às condições climáticas locais permite uma gestão mais eficiente dos recursos energéticos, reduzindo a necessidade de climatização artificial e, conseqüentemente promovendo práticas de construção mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis. (Pereira, 2015)

### **3.2 Conceção bioclimática**

Na conceção de um edifício, a adoção de estratégias adequadas pode ter um impacto determinante no seu desempenho térmico, influenciando de forma significativa o conforto dos ocupantes e a eficiência energética da construção. O consumo energético de um edifício está diretamente relacionado com as condições de conforto térmico que se pretendem alcançar. Caso o edifício não esteja devidamente adaptado ao clima local, será necessário um maior consumo de energia para garantir as condições ideais de habitabilidade, o que poderá resultar em custos operacionais elevados e numa maior pegada ecológica associada ao funcionamento do edifício. (Gonçalves & Nunes, 2004)

As estratégias que consideram as condições climáticas do local e a sua interação com a envolvente construída, promovendo a adaptação do edifício ao seu ambiente, são denominadas estratégias bioclimáticas. Estas estratégias consistem em princípios e diretrizes gerais que orientam a conceção arquitetónica e construtiva, permitindo maximizar os benefícios oferecidos pela condição climática específicas de cada região, enquanto se minimizam os impactos negativos, como o sobreaquecimento no verão ou as perdas térmicas excessivas no inverno. (Gonçalves & Nunes, 2004)

A concepção bioclimáticas desde a fase inicial do projeto permite aproximar o edifício das condições ideais de conforto térmico, reduzindo significativamente a necessidade de sistemas mecânicos de climatização, como o aquecimento ou o arrefecimento artificial. Desta forma, a eficiência energética do edifício é otimizada, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e para uma menor dependência de recursos energéticos. (Gonçalves & Nunes, 2004)

A arquitetura bioclimática, frequentemente designada por arquitetura solar passiva, centra-se no desenho do edifício de forma a tirar o máximo partido das condições

ambientais locais, reduzindo a necessidade de energia proveniente de fontes externas. Valoriza a orientação correta em relação ao sol, a utilização do vento para ventilação natural, o aproveitamento da chuva e a integração da vegetação, com o objetivo de garantir níveis de conforto térmico interior adequados com o mínimo de consumos energéticos. Embora o conceito tenha sido sistematizado mais recentemente, muitos dos princípios que lhe estão subjacentes já eram aplicados de forma empírica na arquitetura vernácula. Face às limitações técnicas e económicas de outras épocas, as construções tradicionais recorreram a materiais locais e a soluções passivas adaptadas ao clima e ao terreno, o que explica o seu bom desempenho térmico e os reduzidos gastos de energia ao longo da vida útil. (Castanhas, 2020)

A habitação vernacular, de forma geral, já não responde plenamente às exigências de conforto térmico e habitabilidade definidas pelos padrões atuais, mas incorpora um conjunto de estratégias passivas que a tornam pouco dependente de fontes de energia não renováveis para atenuar o desconforto. Essas soluções empíricas de aquecimento e arrefecimento – como a orientação dos edifícios, a espessura das paredes, o aproveitamento da inércia térmica e a ventilação natural – podem hoje ser entendidas como parte de um sistema solar passivo, em que as trocas de energia térmica com o exterior se realizam por meios exclusivamente naturais. Através da otimização e atualização destas estratégias, é possível aproximar as construções tradicionais dos níveis de conforto térmico atualmente recomendados, reduzindo simultaneamente o consumo de energia de origem fóssil. (Castanhas, 2020)

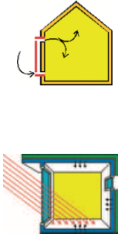






O conforto térmico corresponde à sensação de bem-estar em relação ao ambiente térmico envolvente, isto é, à perceção de ausência de desconforto associado ao frio ou ao calor. Em termos físicos, aproxima-se da situação em que o corpo humano não sente variações bruscas de temperatura porque existe um equilíbrio entre o calor produzido pelo metabolismo e o calor dissipado para o meio, ainda que essas trocas sejam sempre necessárias para a regulação térmica do organismo. Para a arquitetura, este conceito tem implicações diretas no processo de conceção: influencia a implantação do edifício, a volumetria, a orientação e dimensão dos vãos, bem como a escolha de sistemas construtivos e materiais, sobretudo quando se privilegia uma abordagem bioclimática baseada no funcionamento natural dos edifícios. A grande vantagem de aplicar estes princípios, observáveis em grande parte da arquitetura vernacular, reside na possibilidade de garantir condições aceitáveis de conforto interior com consumos energéticos muito reduzidos, o que se traduz em menores custos de operação em iluminação, ventilação e climatização. (Castanhas, 2020)

Um dos primeiros aspetos a considerar no projeto de um edifício bioclimático ou solar passivo é a escolha criteriosa da sua implantação e orientação. Estes fatores são essenciais para tirar partido dos ganhos solares passivos, permitindo uma utilização eficiente da radiação solar durante o inverno e garantindo a proteção necessária contra a exposição excessiva durante o verão. É fundamental avaliar o componente climático da região ao longo das diferentes estações do ano, assegurando que as

estratégias adotadas sejam eficazes na regulação térmica do edifício, quer no aquecimento, quer no arrefecimento natural. (Gonçalves & Nunes, 2004)

No quadro abaixo apresento algumas estratégias que são importantes para o distrito de Coimbra.

Tabela 4 - Estratégias bioclimáticas, clima I1-V2 (Gonçalves & Nunes, 2004)

Estação	Estratégias Bioclimáticas	Sistemas Passivos	
<b>Inverno</b> - Estação de aquecimento	Promover ganhos solares	Todos os sistemas de ganho são adequados para os tipos de edifícios mais conveniente	
	Restringir perdas por condução	Isolar envolvente	
	Promover Inércia Forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior	
<b>Verão</b> - Estação de arrefecimento	Restringir ganhos solares	Sombrear envidraçados	
	Restringir ganhos por condução	Isolar envolvente	
	Ventilação	Ventilação transversal (noturna)	
	Promover inércia forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior	

As estratégias bioclimáticas abrangem um conjunto de princípios que influenciam não apenas a forma e o design do edifício, mas também os seus sistemas, componentes e os processos construtivos. Podem incluir soluções como o correto posicionamento e dimensionamento das aberturas para otimizar a ventilação natural e a iluminação, o uso de materiais com elevada inércia térmica para armazenamento

de calor, a implementação de sistemas de sombreamento eficazes, e a seleção de soluções construtivas adequadas ao clima local. (Gonçalves & Nunes, 2004)

As soluções bioclimáticas mais adequadas para cada edifício devem ter em consideração uma análise detalhada de vários fatores, tais como as características climáticas da região, a função do edifício, o perfil de ocupação, os padrões de utilização e as necessidades específicas dos utilizadores. Ao integrar estes aspetos no processo de projeto, é possível alcançar um equilíbrio entre conforto térmico, eficiência energética e sustentabilidade ambiental, promovendo edifícios resiliente e adequados às condições climáticas em que estão inseridos. (Gonçalves & Nunes, 2004)

Por este motivo, é frequentemente classificada como uma arquitetura passiva, ainda que esta “passividade” não resulte de uma opção consciente no sentido moderno do termo, mas sim da adequação espontânea às condições ambientais e à resposta à escassez de recursos. Trata-se, portanto, de uma arquitetura profundamente racional, que, apesar da simplicidade dos meios utilizados, encerra soluções de elevada inteligência ambiental e social, constituindo um testemunho da capacidade humana de criar espaços sustentáveis em harmonia com o meio envolvente. (Castanhas, 2020)

O clima de Portugal é predominante temperado, caracterizando-se por condições amenas ao longo do ano, com invernos suaves e verões relativamente quentes, embora com variações regionais significativas. A influência do oceano Atlântico nas zonas costeiras e a continentalidade nas regiões do interior contribuem para uma diversidade climática que, apesar das diferenças, mantém um carácter moderado. Esta característica climática favorece a adoção de soluções passivas no projeto de edifícios, permitindo um aproveitamento eficiente das condições naturais para garantir o conforto térmico dos ocupantes. Estratégias como a correta orientação dos vãos, o uso adequado da ventilação natural e o aproveitamento da inércia térmica dos materiais de construção tornam-se fundamentais para otimizar o desempenho energético dos edifícios. A implementação destas soluções permite reduzir significativamente a dependência de sistemas mecânicos de climatização, como o aquecimento e o arrefecimento artificial, resultando em menores consumos de energia e contribuindo para uma construção mais eficiente e sustentável. Assim, o clima ameno de Portugal, aliado a práticas construtivas inteligentes e adaptadas ao contexto climático, oferece condições favoráveis para a criação de edifícios confortáveis e energeticamente eficientes. (Pereira, 2015)

O desempenho térmico de um edifício e o nível de conforto no seu interior dependem não só das características construtivas, como também das variáveis climáticas que definem o ambiente exterior, nomeadamente a temperatura do ar e a radiação solar. A análise gráfica das temperaturas médias diárias ao longo dos diferentes meses do ano, bem como da distribuição anual da radiação solar, evidencia a diversidade climática existente em Portugal, refletindo variações significativas entre regiões e estações do ano. Estes dados climáticos desempenham um papel

fundamental na conceção de soluções passivas, permitindo uma adaptação eficaz do edifício ao meio envolvente, otimizando o seu desempenho energético. A correta interpretação destas informações é essencial para o desenvolvimento de estratégias arquitetónicas que maximizem o aproveitamento das condições naturais, contribuindo assim para a redução das necessidades energéticas associadas à climatização e promovendo uma construção mais sustentável e eficiente. (Pereira, 2015)

A temperatura do ar desempenha um papel fundamental na determinação dos fluxos energéticos através da envolvente do edifício, influenciando diretamente o seu desempenho térmico. Durante o inverno, os fluxos de calor ocorrem predominantemente do interior para o exterior, resultando em perdas térmicas que, se não forem adequadamente controladas, podem comprometer o conforto dos ocupantes e aumentar o consumo de energia para o aquecimento. Por outro lado, no verão a direção desses fluxos tende a inverter-se, verificando-se ganhos térmicos provenientes do exterior para o interior, o que pode levar a um sobreaquecimento dos espaços interiores. Assim, para garantir um desempenho térmico eficiente, é essencial minimizar as trocas de calor através da envolvente, adotando soluções construtivas que promovam um adequado isolamento térmico e uma correta gestão dos ganhos e perdas energéticas. (Pereira, 2015)

Alem da temperatura do ar, a intensidade da radiação solar no local de implantação do edifício constitui um fator determinante no conforto térmico. Durante o inverno, a radiação solar pode ser uma ajuda valiosa, funcionando como uma fonte natural de calor que contribui para o aquecimento dos espaços interiores, reduzindo a necessidade de sistemas de climatização. No entanto, no verão, essa mesma radiação, torna-se um desafio, pois é responsável pelo aumento das temperaturas interiores, exigindo estratégias eficazes de sombreamento e ventilação para evitar o sobreaquecimento. Dessa forma, a consideração das condições climáticas locais, nomeadamente a temperatura do ar e a radiação solar, é essencial para a definição de soluções arquitetónicas e construtivas que proporcionem um elevado nível de conforto térmico e uma maior eficiência energética ao longo de todo o ano. (Pereira, 2015)

### **3.3 Construção em pedra**

As construções em xisto e granito são um marco indelével na paisagem arquitetónica portuguesa, particularmente nas regiões onde esses materiais se encontram abundantemente. Historicamente, estas construções surgiram como resposta às condições geográficas e climáticas locais, refletindo um profundo conhecimento empírico das comunidades acerca dos recursos disponíveis e da sua utilização. (Pereira, 2015)

Ao longo dos séculos, estas construções desempenharam um papel central na organização das comunidades rurais, abrigando famílias, animais e bens essenciais.

Para além da sua funcionalidade, tornaram-se um símbolo de identidade cultural e tradição, transmitindo o conhecimento construtivo de geração em geração. Este património, atualmente ameaçado pela modernização e pelo abandono das zonas rurais, representa uma herança que necessita ser preservada, não apenas pelo seu valor histórico, mas também pelas lições que oferece em termos de construção sustentável e integrada ao meio ambiente. (Pereira, 2015)

A comparação entre estes dois materiais evidencia que, enquanto o granito se destaca pela sua elevada e consistente resistência à flexão, o xisto apresenta um desempenho mais heterogéneo, condicionado pela direção dos seus planos de foliação. Na prática, a escolha entre utilizar o granito ou xisto deve ser orientado não só pelas características estéticas e pela disponibilidade local dos materiais, mas também pelo comportamento mecânico exigido pelo projeto, sobretudo em termos de resistência à flexão. Em contextos onde a segurança estrutural e a previsibilidade do desempenho são prioritárias, o uso do granito é frequentemente preferido. Contudo, quando o xisto é devidamente analisado e as suas características anisotrópicas são consideradas na conceção do edifício, este material pode ser integrado com sucesso, contribuindo para uma arquitetura que valoriza tanto o património regional como a sustentabilidade ambiental. (Pereira, 2015)

Assim, a compreensão detalhada das propriedades flexionais destes dois materiais é fundamental para a otimização do desempenho dos elementos estruturais, permitindo o desenvolvimento de soluções construtivas que combinam segurança, eficiência e integração com o meio envolvente. (Pereira, 2015)

### **3.3.1 Granito**

Os granitos são rochas ígneas resultantes da consolidação, em profundidade, quer “in situ” quer após terem ascendido através de fraturas da crosta terrestre, de magmas primários ou secundários, nesse sentido são rochas intrusivas. (Pereira, 2015)

O granito, mais comum no norte de Portugal e na região do Minho, caracteriza-se pela sua extrema durabilidade e resistência, propriedades que tornaram este material ideal para construções de maior envergadura, como igrejas, pontes e muros. A arquitetura em granito evidencia uma maior robustez e, frequentemente um trabalho artesanal mais detalhado, refletindo a importância dessas construções no contexto social e económico da época. (Pereira, 2015)

Em termos térmicos, o granito caracteriza-se por uma condutividade relativamente elevada para uma rocha natural, com valores médios frequentemente próximos de 2,9–3,1 W/m.K em condições secas, o que significa que transmite calor com facilidade. Esta característica, aliada à sua elevada densidade, confere-lhe uma capacidade apreciável de armazenar calor (inércia térmica), mas implica que, em paredes exteriores, seja geralmente necessário complementar com materiais isolantes para limitar as perdas e ganhos de calor ao longo do dia. (Miranda, 2014)

A resistência à compressão pode variar significativamente, situando-se geralmente entre 80 e 300 N/mm<sup>2</sup> (aproximadamente 800 a 3000 kg/cm<sup>2</sup>). (Moura, 2000)

Devido à sua composição, o granito apresenta uma estrutura relativamente homogênea e elevada densidade. Estas características proporcionam-lhe uma boa capacidade de resistência a esforços de flexão. Graças à sua consistência, os elementos estruturais construídos em granito apresentam uma resposta previsível e robusta quando submetido a flexão, o que torna este material adequado para aplicações que exigem elevada estabilidade e segurança, tais como pavimentos, lajes e pilares. (Pereira, 2015)

### **3.3.2 Xisto**

O xisto, predominante em regiões montanhosas como as Aldeias do Xisto, apresenta-se como uma rocha metamórfica de fácil extração e manuseio, utilizada para erguer habitações de traços simples, mas extremamente adaptadas ao ambiente. As habitações em xisto destacam-se pelas paredes espessas e pela integração harmoniosa com a paisagem, sendo um símbolo de relação entre o homem e a natureza. (Pereira, 2015)

A literatura sobre propriedades termofísicas de rochas metamórficas aponta, de forma geral, condutividades térmicas médias da ordem dos 3 W/m.K, com grande variabilidade em função da composição mineralógica e, sobretudo, da direção de medição relativamente aos planos de xistosidade, o que reforça o carácter anisotrópico deste material. A capacidade térmica específica do xisto situa-se na mesma ordem de grandeza de outras rochas silicatadas (cerca de 0,7–0,8 kJ/kg.K), permitindo-lhe contribuir para alguma inércia térmica quando utilizado em paredes massivas, ainda que a presença de planos de foliação possa favorecer percursos preferenciais de entrada de água e acelerar fenómenos de degradação se não houver proteção adequada. (Miranda, 2014) (Balkan, Erkan, & Salk, 2017)

O xisto, que caracteriza-se pela sua estrutura foliada, resultante da orientação preferencial de minerais. Quando os esforços de flexão são direcionados perpendicularmente aos planos de foliação, o xisto pode oferecer um desempenho mecânico razoável, no entanto, se os esforços coincidirem com os planos de clivagem, a sua resistência à flexão tende a ser consideravelmente inferior, aumentando a probabilidade de fissuração e fragmentação. Esta variabilidade torna a utilização do xisto em elementos estruturais submetidos a esforços flexionais mais desafiante, exigindo uma análise mais detalhada da sua orientação e qualidade antes de ser integrado no projeto. (Pereira, 2015)

## **3.4 Construção em adobe**

O termo “adobe” designa tanto o material de construção como o método utilizado na sua preparação, neste processo, a terra é trabalhada manualmente enquanto se

encontra no estado plástico, permitindo que seja moldada de acordo com a forma desejada. Após a secagem natural ao ar, a terra adquire as propriedades necessárias para ser aplicada na construção. Desta forma, o adobe pode ser classificado em três tipos distintos: (Fernandes, 2013)

- Adobe manual produzido apenas de forma manual;
- Adobe moldado produzido com um molde, frequentemente designado de bloco de lama ou adobo;
- Adobe mecânico ou extrudido, que consiste em moldar e comprimir a terra por processos mecânicos e industriais.

A designação de adobe é derivada do árabe “attob”, que tem como significado tijolo seco ao sol. Segundo a origem dessa designação, afirma-se que esta técnica foi introduzida na Península Ibérica durante a ocupação árabe. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

O adobe, enquanto material de construção, destaca-se pela sua versatilidade, sendo empregado na edificação de paredes, tetos e coberturas. Por essa razão, o termo “adobe” engloba, de forma simultânea, tanto o material em si como a técnica construtiva que utiliza. Quando aplicado em paredes, o adobe integra sistemas de alvenaria que, por vezes, requerem métodos e dispositivos específicos, especialmente quando se recorre à sua preparação manual. Adicionalmente, o adobe pode ser utilizado na confecção de pilares, adaptando-se a forma das unidades ao diâmetro dos arcos, o que viabiliza a construção de variados sistemas de tetos ou coberturas. (Fernandes, 2013)

O adobe é um bloco de terra cuja produção se baseia num processo relativamente simples, que envolve a moldagem de pequenos blocos. Este processo começa com a preparação de uma mistura de terra, que pode ser composta exclusivamente por solo ou enriquecida com aditivos, como areia, cal ou cimento, dependendo das características e do desempenho pretendidos para o material. A moldagem dos blocos é geralmente realizada com o auxílio de moldes de madeira, nos quais a mistura é compactada para adquirir a forma desejada. Após esta etapa, os blocos são cuidadosamente desmoldados enquanto ainda estão no estado fresco, ou seja, antes de endurecerem completamente, e posteriormente colocados a secar ao ar livre, aproveitando a temperatura ambiente para garantir uma secagem natural e uniforme. Este método de secagem reduz a necessidade de equipamentos sofisticados e torna o processo mais sustentável. O fabrico dos adobes pode ser realizado de forma artesanal, com recurso a técnicas manuais, ou de modo mecanizado, utilizando equipamentos específicos para maior eficiência e produção em maior escala. Assim, o adobe destaca-se como um material versátil, cuja composição e método de fabrico podem ser ajustados de acordo com as necessidades do projeto de construção. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)



Figura 11 - Exemplos de construções em adobe existentes no distrito de Aveiro (Varum, Costa, Silveira, Oliveira, & Figueiredo, 2010)

Apesar do bloco apilado ser um método distinto do adobe, apesar da sua maneira de fabricação ser praticamente igual, a única diferença é que na sua compactação é utilizado um pequeno maço, devido ao facto de se adicionar cal à terra, e nesse sentido fica muito difícil a moldagem manual. (Fernandes, 2013)

Para produzir o adobe, procede-se à moldagem de pequenos blocos, geralmente recorrendo a moldes de madeira, como podemos observar na figura 11. Estes blocos são desmoldados enquanto ainda quando se encontram frescos e, subsequentemente, deixados a secar à temperatura ambiente. Os blocos de adobe podem assumir variados formatos e dimensões, sendo fabricados tanto na forma simples como com sistemas de encaixe macho-fêmea, que contribuem para um melhor travamento das paredes. A técnica de construção com adobe requer utilização de um solo com características plásticas ou argilosas, o que torna este método mais adequado a locais com abundância de água. Contudo, o uso de solos argilosos pode levar à formação de fissuras durante a secagem, em virtude da retração do material. Para evitar este fenómeno, é habitual reforçar a mistura com palha ou outras fibras vegetais, garantindo assim uma maior integridade dos blocos. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

Para efetuar a construção do adobe é necessário respeitar alguns requisitos mínimos, nesse sentido são os seguintes: (Fernandes, 2013)

- A terra necessita de ter entre 15% a 18% de volume de argila;

- É necessário fazer a seguinte proporção de água 1:5, ou seja 1 m<sup>3</sup> de água para 5 m<sup>3</sup> de terra.



Figura 12 - Molde do bloco de adobe (Fonte: Google Imagens)

A construção em adobe é um processo simples, com processos semelhantes aos da colocação de tijolos convencionais ou blocos de betão, formando uma alvenaria, conforme ilustrado na figura 15. O assentamento dos blocos de adobe é feito com uma argamassa composta por terra, o que proporciona uma melhor interligação entre os materiais. Este método assegura que a retração ocorra de forma uniforme, evitando assim o surgimento de fissuras ou o destacamento do material da estrutura, contribuindo assim para a estabilidade e a durabilidade do material. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

A inadequação da terra em termos granulométricos pode ser corrigida com a adição de estabilizadores. No caso das terras arenosas, por exemplo, a introdução de ligantes como cal ou cimento pode compensar a ausência de argila. Por outro lado, quando a terra contém um excesso de argila ou argilas muito ativas, pode-se corrigir a mistura adicionando areia ou materiais vegetais, como palha. Em relação à água, a sua quantidade mínima é essencial, pois sem ela, a terra não alcança o estado plástico necessário para moldar os blocos. Para a produção de adobes em grandes quantidades, é necessário dispor de abundante água, o que explica o histórico de antigos centros urbanos construídos em adobes se localizarem, em sua maioria, junto

a fontes naturais de água, como rios, canais, lagos e barragens. Embora o processo de moldagem e construção com adobe seja, à primeira vista, simples e acessível, ambos exigem um conhecimento prático detalhado do comportamento das terras e grande experiência, visto que grandes partes deste saber são transmitidos de forma empírica. (Fernandes, 2013)



Figura 13 - Alvenaria de adobe (Fonte: Google Imagens)

Do ponto de vista estético, as paredes de adobe podem ser deixadas com os blocos à vista, evidenciando o aspecto rústico e autêntico do material, ou então rebocadas com uma argamassa à base de terra, conferindo-lhes um acabamento uniforme e tradicional. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

Assim podemos destacar várias vantagens inerentes ao uso do adobe como material de construção: (Fernandes, 2013)

- É simples de fabricar, secar e empilhar;
- Apresenta uma notável capacidade isolante, resultado da sua elevada porosidade;
- Permite a criação de diversas formas e dimensões, adaptando-se a múltiplas aplicações;

- É totalmente reciclável, contribuindo para a sua sustentabilidade;
- A sua produção e a construção não requerem mão de obra altamente especializada, recorrendo a equipamentos artesanais e moldes de baixo custo;
- É adequada para a construção de paredes, arcos, abóbadas e cúpulas;
- E, por fim, a matéria-prima necessária para a sua produção encontra-se em abundância.

Contudo, o adobe apresenta também várias limitações que merecem ser consideradas. Em primeiro lugar, este material possui uma resistência à tração e à flexão inferior quando comparado com outras alvenarias, como o bloco de terra comprimido ou o tijolo. A sua produção exige uma mão de obra bastante intensiva, bem como a disponibilidade de um espaço amplo e bem ventilado para a secagem. Para além disso, o fabrico do adobe requer um volume considerável de água, e há ainda a dificuldade de se obter blocos com dimensões uniformes após a secagem, uma vez que a qualidade final depende criticamente da mistura e do período de repouso entre a terra e a água. Em áreas sujeitas a sismos, a utilização de coberturas em cúpula não se revela adequada, sendo preferível o uso de abóbadas. Nestes casos, torna-se imprescindível adotar medidas específicas, como o reforço com contrafortes, socos nas construções, esticadores e redes, para assegurar a estabilidade das alvenarias. Outro ponto importante é que, devido à elevada porosidade, o adobe tende a absorver muita água, o que pode comprometer a sua durabilidade. Por fim, as construções em adobes requerem uma manutenção inicial e continua sendo que a longevidade da edificação esta diretamente condicionada ao cuidado que se dispensa a este material. (Fernandes, 2013)

Devido à sua capacidade de absorver e libertar vapor de água, os elementos construtivos em terra desempenham um papel essencial na regulação da humidade no interior dos edifícios. Sendo um material higroscópico, a terra ajusta-se à humidade relativa do ambiente, alcançando um equilíbrio que favorece o conforto térmico e a qualidade do ar interior. A troca de humidade ocorre através da estrutura porosa do material, permitindo manter a humidade relativa dentro de uma faixa ideal, geralmente entre os 40% e os 60%. No entanto, esta capacidade varia consoante diversos fatores, como a humidade ideal da terra, a temperatura ambiente e a taxa de ventilação. (Silva, 2015)

A terra possui uma baixa condutividade térmica e acústica, o que lhe confere boas propriedades de isolamento quando utilizada como material de construção. As paredes em terra crua, por norma bastante espessas, destacam-se não apenas pela sua capacidade de isolamento, mas sobretudo pela elevada inércia térmica. Estas características permite-lhes armazenar e libertar calor de forma gradual, contribuindo para a regulação da temperatura ambiente e o conforto dos espaços. Assim, mais do que a simples condutividade térmica, é a inercia da parede que desempenha um papel determinante na eficiência térmica e acústica das construções em terra. (Silva, 2015)

### **3.5 Construção em Bloco de terra comprimido (BTC)**

Os blocos de terra comprimida (BTC) representam uma evolução em relação ao adobe, sendo fabricados através de um processo de prensagem da terra, que pode ser realizado manualmente ou com recurso a equipamentos mecanizados. À semelhança dos adobes, os BTC podem ser constituídos exclusivamente por terra ou estabilizados através da incorporação de aditivos — como areia, cal ou cimento — com o objetivo de alcançar o desempenho técnico pretendido. Uma das principais características destes blocos é o facto de serem prensados dentro de moldes, o que permite uma grande diversidade de formatos, desde blocos maciços a blocos perfurados. O processo de prensagem confere aos BTC uma resistência mecânica significativamente superior à dos adobes, sendo esta resistência ainda maior quando a prensagem é realizada de forma mecanizada, devido à maior pressão aplicada. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

Esta técnica resultou da evolução do adobe, através da estabilização do solo por meios mecânicos. O processo consiste na prensagem do solo dentro de um molde, permitindo a obtenção de blocos de terra compactada. Estes blocos apresentam uma resistência e durabilidade superiores às do adobe, tornando-se uma alternativa mais robusta para a construção. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

A compactação da terra é feita por meio de uma prensa, que pode ser acionada manualmente ou de forma mecanizada. Este processo possibilita a produção de diferentes tipos de blocos, sejam eles maciços, perfurados ou até mesmo placas para revestimento. A terra utilizada apresenta uma consistência húmida, semelhante à empregue na técnica da taipa, o que resulta em blocos de elevada resistência, embora mais pesados do que os de adobe. Esta técnica de construtiva distingue-se pela rapidez na execução, pela facilidade de montagem e pela redução significativa de resíduos de construção. (Silva, 2015)

Em Portugal, a construção de habitações utilizando alvenarias de blocos de terra comprimido (BTC) ainda é pouco comum. No entanto, tem vindo a ganhar maior relevância devido à sua associação a princípios de sustentabilidade. Além disso, esta técnica apresenta vantagens significativas, destacando-se pelo seu desempenho superior em comparação com as alvenarias de adobe, tanto em termos de resistência como de durabilidade. (Silva, 2015)

Os blocos de terra comprimida podem desempenhar diferentes funções na construção, podendo ser utilizados como elementos estruturais, autoportantes ou simplesmente como material de enchimento. Graças ao seu processo de moldagem, apresentam um acabamento liso, o que possibilita a sua aplicação sem necessidade de revestimento adicional, constituindo uma vantagem tanto económica como ambiental. A compactação da terra durante a prensagem confere aos blocos uma resistência inicial suficiente para que possam ser transportados e empilhados logo após a moldagem, iniciando-se assim a fase de cura. No entanto, o transporte deve ser realizado com precaução e preferencialmente a curtas distâncias, uma vez que as

arestas dos blocos frescos são suscetíveis a danos. Esta característica permite ainda uma otimização do espaço de armazenamento em comparação com os blocos de adobe. (Silva, 2015)

Para as sociedades que recorrem às técnicas de construção tradicional, como a alvenaria de tijolos ou blocos de adobe, a utilização dos blocos de terra comprimida (BTC) revela-se uma alternativa face a outras técnicas construtivas em terra. Isto deve-se, sobretudo, à maior estabilidade dimensional dos blocos, que apresentam um desempenho mais uniforme. A tecnologia associada aos BTC permite não só a padronização das unidades, como também um maior controlo de qualidade ao longo do processo produtivo, fatores essenciais na construção moderna. Desta forma, combinam-se as vantagens de standardização dos materiais de construção industrializados com os benefícios da utilização de recursos locais, resultando numa solução mais sustentável e economicamente viável. (Silva, 2015)

O processo de produção de blocos de terra comprimida (BTC) é, em geral, semelhante independentemente do tipo de bloco produzido. Trata-se de um ciclo de produção cuja eficiência está diretamente relacionada com o nível de mecanização do estaleiro. Para garantir um rendimento otimizado, é fundamental uma gestão eficiente da produção e um rigoroso controlo de qualidades em cada uma das suas fases. O processo de fabrico dos BTC envolve, geralmente, as seguintes etapas: (Silva, 2015)

1. Extração – A terra é retirada a uma profundidade superior a um metro para minimizar a presença de matéria orgânica indesejada;
2. Secagem – O solo é espalhado em camadas finas para facilitar a perda de humidade excessiva;
3. Pulverização – A terra é reduzida a um pó fino, eliminando torrões que possam comprometer a homogeneidade da mistura;
4. Peneiração – Elementos indesejáveis, como partículas de grande dimensão e resíduos orgânicos, são removidos através de um processo de separação mecânica;
5. Dosagem dos constituintes – Os diferentes componentes da mistura são medidos, seja por peso ou volume, para garantir a correta proporção dos materiais;
6. Mistura a seco – Os constituintes secos são misturados até se obter uma composição homogénea;
7. Mistura húmida – Adiciona-se a quantidade de água necessária, promovendo a homogeneização da massa;
8. Dosagem da mistura – Mede-se a quantidade exata da mistura húmida a introduzir na prensa, garantindo a densidade desejada para os blocos;
9. Moldagem – A mistura é compactada dentro da prensa para formar os blocos com a resistência e forma pretendidas;

10. Desmoldagem – Os blocos são removidos cuidadosamente da prensa e transportados para o local de cura;
11. Cura – O tempo e as condições de cura variam consoante a presença de estabilizadores e as suas propriedades, sendo essencial para garantir a resistência final dos blocos.

Este conjunto de etapas permite assegurar a qualidade e a durabilidade dos BTC, tornando-os uma opção viável e sustentável na construção civil. (Silva, 2015)

A pulverização da terra é uma fase essencial no processo de produção dos blocos de terra comprimida (BTC), uma vez que permite obter um pó fino, garantindo uma dosagem precisa e uma mistura homogênea com o estabilizador. A presença de torrões de argila pode comprometer a uniformidade dos blocos e afetar a sua coesão. Este processo pode ser realizado manualmente, através do uso de maços e pilões, embora seja um trabalho intensivo e demorado. Em alternativa, é possível recorrer a pulverizadores mecânicos, que aumentam significativamente a eficiência. De acordo com Adam (2001), a pulverização manual apresenta um rendimento médio de aproximadamente 1 m<sup>3</sup> por dia por trabalhador, valor bastante inferior ao alcançado com equipamentos mecanizados. (Silva, 2015)



Figura 14 - Equipamentos e material utilizado na produção: a) Pulverizador mecânico de pás; b) Peneiro com 4mm de abertura; c) Terra após pulverização e peneiração (Silva, 2015)

Tanto a mistura a seco como a mistura húmida podem ser efetuadas em betoneiras. No entanto, a utilização destes equipamentos exige alguns cuidados, uma vez que a terra húmida tende a aderir às pás da betoneira, dificultando a homogeneização da mistura e originando desperdícios. Para otimizar o processo, o ideal seria que as pás da betoneira girassem independentemente do tambor, permitindo uma mistura mais eficiente. Além disso, a adição de água deve ser feita de forma gradual e dispersa, garantindo uma distribuição uniforme e evitando a formação de grumos na mistura. (Silva, 2015)



Figura 15 - A) e B) Dosagem dos materiais; C) Mistura dos materiais utilizando uma betoneira elétrica. (Silva, 2015)

A moldagem dos blocos de terra comprimida (BTC) pode ser realizada através de prensas manuais ou mecânicas, sendo esta última significativamente mais eficiente em termos de produtividade. As prensas manuais permitem atingir pressões de compactação que variam entre 1 Mpa e 4 Mpa, sendo o valor mais comum cerca de 2 Mpa. No entanto, a pressão aplicada depende da quantidade de mistura húmida inserida no molde da prensa (dosagem da mistura), bem como da força exercida pelos operadores, o que representa uma das principais limitações deste tipo de equipamentos. Apesar da menor eficiência, as prensas manuais apresentam algumas vantagens, nomeadamente o custo reduzido e a facilidade de transporte para o local de produção, que frequentemente coincide com a própria obra. Para garantir um fluxo de trabalho eficiente com uma prensa manual, são necessários pelo menos três operários: um responsável pela moldagem dos blocos, dois para o transporte até à área designada para a cura. (Silva, 2015)



Figura 16 - A) Dosagem da mistura; B) Colocação da mistura na prensa; C) Moldagem do bloco. (Silva, 2015)

A etapa de cura dos blocos de terra comprimido (BTC) é fundamental para assegurar a sua qualidade, prevenindo fissuras superficiais causadas por uma secagem acelerada e permitindo que ocorram corretamente as reações de hidratação dos estabilizadores adicionados. No caso de blocos não estabilizados, realiza-se uma cura a seco, tornando-se o cuidado de cobrir os blocos com uma lona plástica ou outro material protetor, evitando assim uma secagem demasiada rápida. Para blocos estabilizados, o método de cura varia consoante o tipo de estabilizador utilizado. Contudo, a prática mais comum envolve uma cura húmida nos primeiros sete dias após a desmoldagem, seguida de uma cura a seco durante os 21 dias seguintes, totalizando

um ciclo de 28 dias, semelhante ao processo utilizado no betão. A fase de cura húmida garante que os blocos mantem um nível de humidade adequada para permitir as reações de estabilização, especialmente quando são utilizados ligantes hidráulicos. Já a cura a seco, por vezes designada como período de secagem, tem a função de permitir a evaporação lenta da humidade, favorecendo uma retração controlada da argila, e aumentando a coesão do bloco. Para melhores resultados, a cura deve ocorrer em ambiente protegido, evitando a exposição direta ao sol e ao vento, que poderiam comprometer a uniformidade do processo. (Silva, 2015)

A estabilização física dos blocos de terra comprimida (BTC) é geralmente realizada através da incorporação de fibras ou pela modificação da composição granulométrica do solo, seja através da adição ou remoção de determinados agregados, como partículas argilosas, arenosas, pedras ou seixos. A adição de fibras tem como principal objetivo aumentar a coesão entre as partículas do solo, conferindo maior resistência mecânica ao material. No entanto, o seu impacto é mais significativo nos blocos de adobe do que nos BTC, uma vez que ajudam a minimizar a fendilhação superficial durante o processo de secagem, ao redistribuir as tensões de retração da argila de forma mais uniforme. Por outro lado, a alteração da granulometria do solo, seja pela introdução ou remoção de agregados específicos, visa otimizar a composição do material para que este se enquadre dentro dos parâmetros adequados à produção de BTC, garantindo assim um melhor desempenho estrutural e maior durabilidade dos blocos. (Silva, 2015)



Figura 17 - Cura dos blocos: blocos tapados com lona plástica após rega com água (Silva, 2015)

### 3.6 Construção em Taipa

A taipa é uma técnica construtiva tradicional que consiste na compactação de terra dentro de cofragens para elevar paredes espessas e resistentes, num processo semelhante ao do betão armado. Quando bem executada, destaca-se pela sua durabilidade, sendo possível encontrar exemplos antigos que ainda se mantêm em boas condições, como a Grande Muralha da China. Em Portugal, esta técnica foi amplamente utilizada até à década de 1950, especialmente no centro e sul do país, onde se adaptou bem às características locais e aos recursos disponíveis. (Silva, 2015)

A taipa é uma técnica construtiva que envolve a utilização de solo com consistência húmida, que é colocado dentro de cofragens, conhecidas como taipais, e compactado para formar paredes sólidas e resistentes. Este método pode ser realizado de forma tradicional ou mecanizada, apresentando diferenças significativas em termos de execução e recursos utilizados. Na abordagem tradicional, o processo é desenvolvido em camadas sucessivas de cerca de 50 cm de altura, com uma espessura variável entre 40 e 70 cm e um comprimento de até 2 metros. A compactação do solo é efetuada manualmente, utilizando pilões de madeira, sendo compactadas camadas de 10 cm de cada vez até atingir a altura total pretendida. Por outro lado, a taipa mecanizada introduz tecnologias modernas para otimizar o processo. Esta abordagem distingue-se pela utilização de cofragens de dimensões maiores e pelo recurso a compactadores pneumáticos, que substituem o trabalho manual. A mecanização não só permite uma compactação mais uniforme como também reduz significativamente o tempo necessário para concluir a obra. Apesar das diferenças nos métodos de execução, ambas as formas de taipa se destacam pela sua sustentabilidade e pela criação de estruturas robustas e duradouras. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)



Figura 18 - Novo edifício da empresa Ricola, Suíça (2012) (Silva, 2015)



Figura 19 - Paredes de taipa (Fonte: Google Imagens)

O método tradicional de construção em taipa seguia uma sequência bem definida de etapas. Inicialmente, procedia-se à extração e preparação da terra, seguida da execução dos caboucos e de seguida efetuava-se as fundações, geralmente em alvenaria de pedra, para garantir a estabilidade da estrutura. Posteriormente, montava-se os taipais ou enxaiméis, que serviam de cofragem para moldar as paredes. A terra era então depositada em camadas dentro dos taipais e compactada cuidadosamente. Assim que atingisse um nível adequado de secagem, removia-se a cofragem, expondo a parede ao sol para endurecer gradualmente. O processo repetia-se, avançando de troço em troço até completar uma fiada. Em seguida, iniciava-se uma nova fiada sobre anterior, garantindo que as juntas verticais ficassem desencontradas para reforçar a resistência da estrutura através do travamento da

mesma. A repetição deste ciclo permitia obter paredes com as dimensões desejadas. Embora as superfícies em taipa possam ser deixadas sem acabamento, caso seja necessário aplicá-lo, este deve ser compatível com os materiais utilizados na construção. (Silva, 2015)

Os taipais tradicionais eram compostos por dois painéis laterais, duas comportas frontais e quatro costeiras, sendo mantidos unidos por agulhas e canguetas, que podiam ser de madeira ou corda, garantindo a estabilização lateral. Dessa forma, formava-se uma estrutura temporária sem topo nem fundo, conforme ilustrado na imagem abaixo. Atualmente, à semelhança das cofragens utilizadas no betão armado, os sistemas de moldagem da taipa evoluíram, permitindo o uso de diferentes materiais, como madeira, contraplacado e metal, conforme o acabamento desejado. Além disso, podem ser aplicados sistemas hidráulicos deslizantes para otimizar o processo. No método tradicional, a compactação da terra era realizada manualmente com o auxílio de pilões ou maços de madeira. Posteriormente, esse instrumento forma substituído por versões metálicas e, mais recentemente, por equipamentos que aumentam a produtividade da construção em taipa. Além da seleção adequada do solo, a força de compactação desempenha um papel fundamental na qualidade final da estrutura. (Silva, 2015)

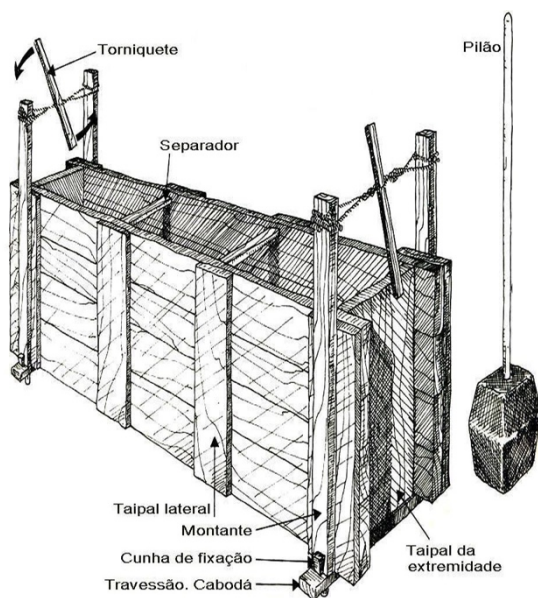


Figura 20 - Taipa e pilão tradicional (Silva, 2015)



Figura 21 - Compactação mecânica da taipa (Silva, 2015)

A terra empregada na construção em taipa deve apresentar uma granulometria variada, com predominância de areia, além da presença de alguns seixos, pedras e uma quantidade reduzida de argila. O uso de partículas mais grosseiras favorece uma compactação mais eficiente, enquanto a limitação do teor de argila reduz o risco de fissuração superficial, mantendo, ao mesmo tempo, a coesão necessária ao material.

Para melhorar o desempenho da taipa, é comum estabilizar a mistura com ligantes, como cal ou cimento. Durante a aplicação, a terra utilizada deve estar apenas ligeiramente umedecida, facilitando a compactação sem exigir grandes volumes de água, o que torna essa técnica viável em regiões com acesso limitado a esse recurso. Nas juntas horizontais entre os painéis de taipa, podem ser incorporados elementos de reforço, como o tijolo cerâmico maciço, pedra ou argamassas. Além disso, a estrutura pode ser fortalecida com varões de aço, de forma semelhante ao que ocorre no betão armado. (Silva, 2015)

### **3.7 Construção em Madeira**

A madeira é um material de origem natural que resulta do crescimento e desenvolvimento das árvores, organismos vivos que, ao longo de anos ou até mesmo décadas, interagem de forma dinâmica com o ambiente que as rodeia. Esta relação continua com o meio dá origem a um produto profundamente enraizado na natureza, que cada árvore é, em si mesma, uma construção viva, complexa, e a madeira que se extrai dela traz consigo a sua complexidade. (Santos, 2023)

Ao contrário dos materiais produzidos em ambiente industrial, homogêneos e previsíveis, a madeira nasce da variabilidade da natureza. As suas propriedades não são fixas, mas moldadas por diversos fatores como o tipo de solo onde a árvore cresceu, o clima a que foi exposta, a disponibilidade de água, a incidência solar ou o regime de ventos. Estes elementos influenciam diretamente a forma como o tecido lenhoso se desenvolve, fazendo com que cada árvore e conseqüentemente cada peça de madeira, seja única e irrepetível. (Santos, 2023)

Essa individualidade é evidente na estrutura anatômica da madeira. O tecido lenhoso é formado por um conjunto altamente especializado de células vegetais, como os anéis de crescimento, os vasos condutores, as fibras de suporte e os parênquimas. Esta organização interna, simultaneamente funcional e estética, reflete a história de vida da árvore. Assim, mesmo entre indivíduos da mesma espécie botânica, é possível observar variações significativas em termos de cor, textura, densidade, dureza, comportamento higroscópico e propriedades mecânicas. Esta diversidade não constitui uma limitação, mas sim uma das mais-valias da madeira enquanto material de construção. (Santos, 2023)

Importa salientar que esta identidade própria da madeira tem implicações práticas. As suas propriedades físicas e mecânicas – como a resistência à compressão, à flexão ou à tração, bem como a sua capacidade de isolamento térmico e acústico – estão intimamente ligadas às condições em que a árvore se desenvolveu. Por esse motivo, é impossível compreender verdadeiramente a madeira sem reconhecer a influência do seu crescimento e do seu percurso biológico. (Santos, 2023)

Contudo a madeira deve ser encarada não apenas como um recurso natural, mas como o resultado de um processo biológico complexo e sofisticado. A sua utilização na construção permite integrar a natureza no edificado, desempenho e origem

natural que faz da madeira um material singular, não apenas pelo que é, mas por tudo aquilo que representa. (Santos, 2023)

A madeira é um recurso natural de origem vegetal, proveniente das árvores, organismos vivos que se constituem, por si só, como verdadeiras construções da natureza. Ao longo do tempo, e fruto de um processo evolutivo altamente especializado, a madeira tornou-se num dos materiais mais versáteis e valorizados pelo ser humano. A sua formação resulta de um equilíbrio complexo entre fatores biológicos, ambientais e temporais, conferindo-lhe um carácter singular e impossível de replicar artificialmente. (Santos, 2023)

Sendo a árvore um ser vivo, cada exemplar desenvolve-se de forma distinta, mesmo dentro da mesma espécie, o que faz com que a madeira conserve uma identidade própria. Essa individualidade está intrinsecamente ligada à estrutura do seu tecido lenhoso – o seu “tecido construtivo fundamental” – que mantém as marcas do crescimento da árvore, desde o tipo de solo onde foi implantada, às condições climáticas que enfrentou ao longo da sua vida. Esta diversidade expressa-se em variações de cor, textura, densidade, resistência mecânica ou resposta à humidade, entre outras propriedades. (Santos, 2023)

Deste modo, a madeira não se distingue apenas por pertencer a espécies botânicas diferentes, mas também pelo facto de cada árvore ser um indivíduo único, perfeitamente caracterizado. É essa distinção entre indivíduos que confere à madeira uma complexidade rara entre os materiais de construção: dois elementos do mesmo tipo podem comportar-se de forma distinta, revelando a riqueza e a autenticidade do seu processo natural. (Santos, 2023)

A madeira tem sido, desde tempos remotos, um dos principais materiais utilizados na construção, sobretudo em regiões onde a abundância de recursos florestais facilitava o seu acesso e aproveitamento. Tradicionalmente, todas as fases do processo construtivo envolvendo madeira eram realizados de forma artesanal, diretamente no local da obra, com recurso a ferramentas manuais. No entanto, com o advento da Revolução Industrial e a consequente introdução de maquinaria mecanizada, verificou-se uma transformação significativa nos métodos construtivos. As operações de corte e transformação da madeira, até então efetuadas *in situ*, foram gradualmente transferidas para ambiente oficinais, permitindo um maior controlo dimensional, melhor qualidade de acabamento e ganhos significativos em eficiência e produtividade. (Moreira, s.d.)

No domínio das espécies arbóreas, é possível distinguir duas grandes categorias botânicas: as angiospérmicas, conhecidas vulgarmente como folhosas ou madeiras duras, e as gimnospérmicas, usualmente designadas por resinosas, coníferas ou madeiras brandas. As árvores folhosas são caracterizadas por um crescimento mais lento, apresentando folhas de forma mais achatada e com maior superfícies. Em contraste, as árvores resinosas distinguem-se por um desenvolvimento mais célere e por possuírem folhas geralmente estreitas e de formato acicular ou circular. (Torres, 2021)

A aplicação da madeira na construção em Portugal apresenta uma longa tradição, confirmada tanto pela análise do património edificado como por registos documentais. Historicamente, este material foi amplamente utilizado em diversos elementos estruturais, incluindo coberturas, pavimentos intermédios e, por vezes, na execução integral de edificações. Esta preferência justifica-se pelas propriedades intrínsecas da madeira, nomeadamente a sua leveza, facilidade de trabalho e elevada resistência mecânica face ao seu peso próprio. Adicionalmente, o recurso à madeira sempre foi viável do ponto de vista económico, fruto da sua ampla disponibilidade e abundância em território nacional. (Moreita, s.d.)

Nas zonas costeiras portuguesas, é comum encontrar construções em madeira designados por palheiros de tabuado, tradicionalmente utilizadas como habitação por comunidades ligadas às atividades marítimas, nomeadamente pescadores, cabaneiros e sargaceiros. Estas edificações apresentam, geralmente, planta retangular e estão elevadas do solo, sendo assentes sobre pilares em alvenaria de pedra ou, em zonas de instabilidade dunar, sobre estacaria de madeira cravadas no terreno. O sistema de cobertura é composto por telhados de duas águas, por vezes bastante inclinados, com a empena voltada para a via pública. Originalmente, a cobertura era realizada em colmo ou estorno, tendo sido progressivamente substituída por telha cerâmica. As fachadas são revestidas com tabuado, frequentemente disposto na vertical ou na horizontal, pintado tradicionalmente com pigmento vermelho. O afastamento ao solo permite a ventilação da estrutura e a utilização do espaço inferior para a arrumação de equipamento ligados à frota marítima. (Moreita, s.d.)

As condições de crescimento a que a árvore é sujeita ao longo do seu ciclo de vida tem um impacto determinante na qualidade e nas suas propriedades da madeira enquanto material de construção. Fatores como a idade da árvore no momento do abate, bem como o seu ritmo de crescimento, influenciam diretamente a resistência mecânica e o desempenho estrutural da madeira face a diferentes solicitações. Sendo um material de origem natural, a madeira apresenta uma variabilidade significativa resultante de elementos como o clima, as características do solo, e a composição biológica específica de cada espécie. Assim, é essencial compreender as propriedades físicas, mecânicas e anatómicas desta matéria-prima, pois é essa compreensão que permite tirar pleno partido das suas potencialidades enquanto material construtivo versátil, adaptável a distintas exigências funcionais e construtivas. (Santos, 2023)

A madeira é classificada como um material lenho celulósico de estrutura celular, apresentando propriedades anisotrópicas, viscoelásticas e biodegradáveis, características que influenciam de forma decisiva o seu comportamento nas mais diversas condições de utilização. Para além destas particularidades, destaca-se ainda a sua resistência a agentes como a água salgada, a oxidação e diversos compostos químicos e agentes corrosivos, o que amplia a sua durabilidade e aplicação em contextos exigentes. Entre as propriedades físico-mecânicas mais relevantes, sobressai a dureza entendida como a capacidade do material em resistir à penetração de um corpo externo, seja por pressão contínua ou por impacto. Esta propriedade está intimamente relacionada com a densidade, de um modo geral, quanto maior for

a dureza, maior será a densidade da madeira, o que se traduz também num maior peso específico. Importa ainda referir que madeiras de maior dureza tendem a ser mais difíceis de trabalhar, exigindo maior esforço mecânico e consumo energético durante o processamento e transformação. (Santos, 2023)

A madeira é um material de construção com excelente relação resistência-peso, destacando-se pela sua leveza aliada a uma notável capacidade mecânica. A sua estrutura celular, composta por cavidades internas, confere-lhe boas propriedades de isolamento térmico, enquanto as paredes das células possuem a capacidade de absorver e libertar humidade, regulando naturalmente o equilíbrio hidrotérmico do ambiente interior. Esta particularidade contribui para a criação de um clima interior mais saudável e confortável, fazendo da madeira um material com elevado desempenho térmico e particularmente adequando à construção sustentável e bioclimática. (Santos, 2023)



Figura 22 - Construções em Madeira, no Alpes Suíços (Fonte: Autor)

Uma das principais características intrínsecas da madeira é o seu comportamento higroscópico, ou seja, a capacidade de absorver e libertar vapor de água em função da humidade relativa do ambiente em que se encontra. Idealmente, a madeira destinada à construção deverá apresentar um teor de humidade controlado e compatível com as condições do local de aplicação, uma vez que níveis elevados de

humidade comprometem significativamente a sua resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade. A presença excessiva de humidade pode favorecer o aparecimento de fungos xilófagos e acelerar os processos de degradação biológica, nomeadamente o apodrecimento. Por este motivo, é essencial garantir uma boa ventilação das estruturas em madeira e prever variações no seu comportamento em função do ambiente. A sua natureza higroscópica, aliada à anisotropia do material, resulta frequentemente em fenómenos de retração (encolhimento) ou expansão (inchaço), podendo originar deformações, fendilhação ou empenos ao longo do tempo, especialmente se não forem tomadas precauções adequadas no seu dimensionamento e aplicação. (Santos, 2023)

Uma das propriedades mecânicas mais relevantes da madeira é a sua viscoelasticidade, características que combinam simultaneamente comportamentos elásticos e viscosos quando sujeita a solicitações mecânicas. A elasticidade da madeira permite-lhe recuperar a sua forma original após a aplicação de uma carga ou esforço, desde que os limites do seu módulo de elasticidade, que quantifica a sua rigidez, não seja excedido. Quando este limite é ultrapassado, a madeira pode sofrer uma deformação permanente, sem que ocorra, necessariamente, a rotura estrutural do elemento. Esta capacidade de suportar deformações sem falha imediata confere à madeira uma elevada flexibilidade, tornando-a especialmente adequada para estruturas sujeitas a cargas variáveis ou a esforços de encurvadura. A flexibilidade da madeira, enquanto combinação entre elasticidade e rigidez, é, por isso, uma propriedade essencial no seu desempenho estrutural, especialmente em elementos sujeitos a flexão ou em sistemas construtivos que exigem alguma capacidade de adaptação às tensões importadas. (Santos, 2023)

É importante destacar que a construção em madeira, mais do que qualquer outro sistema construtivo, sempre esteve fortemente condicionada pela relação próxima com os profissionais especializados na arte de trabalhar este material. Durante séculos, o conhecimento sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira, vem como o seu comportamento estrutural em edifícios, não resultava de estudos científicos formais, mas sim de uma transmissão empírica de saberes entre gerações. Essa aprendizagem fazia-se essencialmente através da observação direta, da prática contínua e da convivência próxima com a madeira, permitindo aos mestres carpinteiros e marceneiros interpretar as particularidades de cada peça e compreender a melhor forma de a integrar nas construções. Assim, os princípios de dimensionamento, a escolha das espécies mais adequadas e as soluções construtivas adotadas eram definidos com base na experiência acumulada e no profundo conhecimento do material, aplicado de forma intuitiva e criteriosa no planeamento e execução dos edifícios. (Santos, 2023)

No entanto, foi a partir do século XVII que se começou a assistir a uma mudança significativa nestes paradigmas, uma vez que, neste período, surgiram os primeiros esforços sistemáticos no sentido de desenvolver métodos teóricos e práticos para a análise das forças aplicadas em estruturas de madeira. Até então, a construção em madeira baseava-se quase exclusivamente na experiência empírica dos marceneiros

e carpinteiros, mas a partir desta época, começaram a ser lançadas as bases para uma abordagem mais racional e científica do comportamento estrutural da madeira. Já no século XIX, apesar dos avanços tecnológicos e do aparecimento de novos materiais construtivos impulsionados pela Revolução Industrial, as qualidades naturais da madeira continuaram a ser amplamente valorizadas e exploradas. Este material manteve-se como elemento essencial em múltiplas aplicações, desde a edificação de habitações e embarcações até à construção de dispositivos mecânicos, mobiliário e utensílios do quotidiano. Contudo, “desde então, o trabalho em madeira foi-se afastando progressivamente desta rica interação entre material, ofício e ferramentas, rumo a uma produção de carácter mais industrializado”. A crescente mecanização e a normalização das peças de madeira como elementos construtivos vieram transformar não só as formas de trabalhar e produzir este material, mas também a própria maneira de o conceber, projetar e integrar nas soluções construtivas modernas. (Santos, 2023)

Contudo, foi apenas no início do século XX que se verificou, de forma consistente, a transição da construção tradicional em madeira, fortemente baseada no saber empírico e transmitida oralmente entre gerações, para uma abordagem mais informada, estruturada e suportada por princípios científicos e técnicos. A realização de estudos sistemáticos, ensaios laboratoriais e investigações específicas sobre o comportamento da madeira enquanto material de construção revelou-se essencial para a validação de projetos e para a definição de normas e regras de engenharia que conferissem maior fiabilidade e segurança às estruturas em madeira. Este avanço científico permitiu, não só conhecer em maior profundidade as propriedades físico-mecânicas da madeira, como também estabelecer os primeiros padrões técnicos reconhecidos e aplicáveis a nível profissional. Paralelamente, a introdução de ferramentas, equipamentos e métodos de trabalho tecnologicamente mais evoluídos permitiu transformar a forma como a madeira era trabalhada, garantindo níveis de precisão e eficiência substancialmente superiores aos da carpintaria tradicional. Como consequência direta destes progressos, os produtos de madeira sofreram também mais evolução significativa, passando a ser concebidos, fabricados e aplicados de forma mais racionalizada e económica, beneficiando das potencialidades oferecidas pela tecnologia industrial moderna. (Santos, 2023)

Deste modo, torna-se evidente reconhecer as vantagens ambientais e ecológicas associadas à utilização da madeira enquanto material de construção. Sendo uma matéria-prima de origem inteiramente natural, a madeira resulta do crescimento das árvores, um processo contínuo alimentado pela energia solar, sem necessidade de intervenções humanas dispendiosas ou consumo de energia fóssil durante a sua formação. Para além disso, o próprio desenvolvimento das árvores desempenha um papel fundamental na manutenção do equilíbrio ecológico do planeta, uma vez que, através do processo de fotossíntese, capturam dióxido de carbono da atmosfera e libertam oxigénio, contribuindo significativamente para a redução da concentração de gases com efeito de estufa. A floresta, enquanto ecossistema natural e renovável, assegura uma produção sustentável de madeira, caracterizada pela sua autossuficiência

e capacidade de regeneração. Assim, ao contrário de outros materiais de construção cujo fabrico implica elevados consumos energéticos e emissões poluentes, a madeira surge como uma opção construtiva ecológica, sustentável e ambientalmente responsável. (Santos, 2023)

A partir da década de 1970, e na sequência de várias catástrofes ambientais e da crescente consciencialização acerca dos impactos negativos associados à exploração intensiva dos recursos naturais para fabrico de materiais de construção industrializados, começou a emergir uma reflexão mais crítica sobre as práticas construtivas então vigentes. Verificou-se que a produção massiva desses novos materiais implicava consumos excessivos de energia e matérias-primas, além de gerar consequências ambientais e para a saúde humana que até então haviam sido desvalorizadas. Neste contexto, generalizou-se uma nova tomada de consciência que impulsionou o estudo do potencial da madeira enquanto material construtivo sustentável e ambientalmente responsável. Paralelamente, a crescente valorização do património edificado e o interesse renovado pelos métodos tradicionais de construção vieram reforçar essa mudança de paradigma. Assim, o respeito pela herança construtiva vernacular e a preocupação com a preservação ambiental tornaram-se dois pilares determinantes para a revalorização da madeira no setor da construção, não apenas pela sua menor pegada ecológica, mas também pelas suas qualidades intrínsecas enquanto material técnico e versátil. (Marques, 2010)

Embora a madeira seja, por natureza, um material combustível, o seu comportamento face à ação do fogo revela-se, na prática, bastante satisfatório. Ao contrário de outros materiais, como o aço, que perde rapidamente resistência estrutural quando exposto a altas temperaturas, a madeira possui a capacidade de manter a sua estabilidade estrutural durante um período considerável. Isto deve-se à formação de uma camada carbonizada à superfície, que atua como isolante térmico, retardando a progressão da combustão para o interior da secção. Para além desta particularidade, a madeira é uma matéria-prima inteiramente renovável, apresentando uma relação muito favorável entre resistência mecânica e densidade, o que torna simultaneamente robusta e leve. Acresce ainda a facilidade de ser trabalhada com meios simples ou mecanizados, permitindo soluções construtivas versáteis e adaptáveis a diferentes tipologias e necessidades. Estas características fazem da madeira um material competitivo e cada vez mais valorizado no panorama da construção contemporânea, sobretudo no contexto de uma maior exigência ambiental e de eficiência energética. (Marques, 2010)

Quando comparada com outros materiais de construção correntemente utilizados, a madeira destaca-se de uma forma inequívoca pelo reduzido consumo energético associado ao seu ciclo produtivo. Desde a fase de extração – que, na prática, se resume ao abate controlado das árvores – passando pelo transporte, transformação e aplicação em obra, a madeira requer quantidade significativamente inferiores de energia, sobretudo quando comparada com os processos industriais de fabrico de materiais como o betão, o aço ou o alumínio. Para se ter uma ideia mais concreta, podemos observar na tabela abaixo estudos demonstram que, para produzir uma

tonelada de madeira serrada, o consumo de energético é cerca de quatro vezes inferior ao necessário para produzir a mesma quantidade de betão, sessenta vezes inferior ao do aço e aproximadamente duzentas e cinquenta vezes menor do que o necessário para o alumínio. Esta vantagem energética reflete-se não só na fase de recolha da matéria-prima, mas também em todas as etapas subsequentes de transformação, transporte e colocação em obra, tornando a madeira um material particularmente interessante no atual contexto de construção sustentável e de descarbonização do setor. (Santos, 2023)

A tabela abaixo apresentada permite uma leitura clara e objetiva em comparação com o descrito acima, sobre os diferentes consumos energéticos associados à produção dos materiais mais frequentemente utilizados na construção civil. Os valores apresentados são expressos em megajoules por quilograma (MJ/KG) e por metro cúbico (MJ/M<sup>3</sup>), permitindo perceber o peso ambiental de cada material não apenas em função da sua massa, mas também em função do volume ocupado em obra, uma variável particularmente relevante em contextos estruturais. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

De uma forma geral, observa-se que os metais, nomeadamente o alumínio e o aço, apresentam os consumos energéticos mais elevados. Contudo, importa destacar o impacto positivo da reciclagem, que reduz significativamente os consumos, chegando, no caso do alumínio reciclado simples, a 8,1 MJ/KG, uma redução de cerca de 96% face ao alumínio primário. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

O betão, sendo um dos materiais mais utilizados a nível mundial, apresenta consumos energéticos bastantes moderados. Verifica-se que, mesmo aumentando a sua resistência à compressão, os valores sobem de forma controlada, oscilando entre 1 MJ/KG no betão com 17,5 MPa e 1,6 MJ/KG no betão de 40 MPa. Estes valores, que por metro cúbico variam entre 2.350 a 3.890 MJ/M<sup>3</sup>, posicionam o betão como um material de baixo consumo energético, sobretudo quando comparado com os metais. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

A madeira, por sua vez, evidencia-se como o material mais eficiente em termos energéticos. A madeira em bruto seca ao ar consome apenas 0,3 MJ/KG, valor que aumenta ligeiramente quando seca em estufa ou quando polida. Ainda assim, mesmo nas situações de maior processamento, como a madeira polida seca em estufa, os valores mantêm-se baixos. Este dado reforça o carácter sustentável da madeira, não só pelo seu baixo consumo de energia no processo de transformação, mas também pela possibilidade de reaproveitamento integral dos seus resíduos e pela sua condição de recurso renovável. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

Nesse sentido mostramos a tabela seguinte que conseguimos comprovar a energia incorporada em materiais de construção, onde demonstra a unidade de medida de energia (MJ) necessária para 1 metros cubico de material. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

A madeira assume-se como um recurso renovável de elevado valor ecológico e ambiental, desde que a sua exploração seja realizada de forma sustentável,

recorrendo a praticas de gestão florestal responsáveis e políticas de reflorestação adequadas. Durante o seu processo de crescimento, as arvores capturam dióxido de carbono da atmosfera, armazenando-o na sua estrutura lenhosa. Este carbono permanece retido na madeira ao longo de todo o seu ciclo de vida – desde a fase de abate, passando pela sua transformação da madeira em produto de construção distingue-se pelo reduzido consumo energético face a outros materiais estruturais, como o aço ou o betão. Acresce ainda que os resíduos produzidos durante o processo de serração e processamento da madeira podem ser integralmente aproveitados, seja como combustível biomassa, seja para a produção de aglomerados ou outros derivados, reforçando a sua imagem como material de construção ambientalmente responsável e energeticamente eficiente. (Marques, 2010)

Tabela 5 - Energia incorporada em materiais de construção. (Pacheco Torgal & Jalali, 2010)

<b>Material</b>	<b>MJ/KG</b>	<b>MJ / M<sup>3</sup></b>
Alumínio Extrudido	201	542.700
Alumínio extrudido anodizado	227	612.900
Alumínio reciclado	8,1	21.870
Alumínio reciclado extrudido	17,3	46.710
Alumínio reciclado anodizado	42,9	115.830
Betão pronto (Fc = 17,5 MPa)	1	2.350
Betão pronto (Fc = 30 MPa)	1,3	3.180
Betão pronto (Fc = 40 MPa)	1,6	3.890
Aço	32	251.200
Aço reciclado	10,1	37.210
Madeira em bruto seca ao ar	0,3	165

Madeira em bruto seca em estufa	1,6	880
Madeira polida seca ao ar	1,16	638
Madeira polida seca em estufa	2,5	1380

As vantagens associadas à construção com madeira ultrapassam, atualmente os argumentos tradicionais relacionados com o baixo custo, a facilidade de montagem ou os benefícios ambientais. A investigação e o desenvolvimento tecnológico aplicados a este material vieram demonstrar que as estruturas em madeira apresentam um desempenho notável sob diversos pontos de vista. Além de garantirem uma maior eficiência energética, fruto das propriedades naturais de isolamento térmico que a madeira possui, os edifícios construídos com este material revelam também uma estabilidade superior quando sujeitos a ações sísmicas. Este comportamento deve-se, em grande parte, à leveza do material e à sua capacidade de dissipar a energia provocada por movimentos do solo, reduzindo assim os danos estruturais. Para além disso, importa salientar que, contrariamente à perceção comum, as construções em madeira podem alcançar níveis de resistência ao fogo cada vez mais elevados, desde que sejam utilizadas madeiras devidamente processadas e tratadas, bem como sistemas construtivos adequados. Assim, a madeira, surge nos dias de hoje, como um material contemporâneo e tecnologicamente valorizado, reunindo um conjunto de propriedades que a tornam competitiva face a outras soluções construtivas, mesmo em contextos urbanos e edifícios de maior dimensão. (Marques, 2010)

Para além das características técnicas e funcionais que conferem à madeira um lugar de destaque no panorama construtivo atual, importa também reconhecer a importância histórica e simbólica deste material. Ao longo dos séculos, a madeira foi, desde os primórdios da civilização, um recurso privilegiado na construção de abrigos, estruturas e equipamentos, deixando uma marca profunda na memória coletiva da humanidade. Para além do seu valor técnico, a madeira é um material que desperta uma experiência sensorial única, pelas suas propriedades visuais, táteis e olfativas, que são percecionadas de forma instintiva pelo ser humano e que reforçam o carácter natural e acolhedor. Assim, ao projetar o futuro da construção com madeira, não se pode dissociar esta herança cultural e afetiva. A par de uma visão algo romantizada, é imprescindível integrar os avanços tecnológicos mais recentes, bem como uma nova compreensão do potencial estrutural e ambiental deste material, posicionando a madeira como uma solução construtiva contemporânea, sustentável e tecnicamente fiável para os desafios arquitetónicos e ambientais do presente e do futuro. (Santos, 2023)

Os troncos das árvores constituem a principal matéria-prima para a obtenção de elementos estruturais em madeira, assumindo-se como o núcleo essencial de onde se extraem as peças utilizadas na construção. A estrutura anatômica do tronco é composta por diferentes zonas, entre as quais se destacam o borne e o cerne, tal como ilustrado na imagem abaixo. O borne, também designado de albarno, corresponde à zona periférica do tronco, sendo caracterizado pela presença de células vivas. Nesta região ocorre o armazenamento de nutrientes e o transporte ativo da seiva, desempenhando assim um papel fundamental nos processos fisiológicos da árvore em crescimento. Em contraponto, o cerne ocupa a parte central do tronco e é constituído por células mortas, cuja função é assegurar a resistência mecânica e o suporte estrutural da árvore. (Torres, 2021)

Estas duas zonas apresentam diferenças evidente não apenas na sua função biológica, mas também nas suas propriedades físicas e mecânicas. O borne, geralmente mais claro, possui menor resistência natural à degradação biológica, nomeadamente à ação de fungos e insetos xilófagos, sendo por isso mais suscetíveis ao apodrecimento. Já no cerne, normalmente de tonalidade mais escura, destaca-se por apresentar uma maior durabilidade natural, resultado da acumulação de substâncias orgânicas e compostos extrativos que lhe conferem maior resistência a agentes agressivos externos. Esta distinção entre o borne e o cerne é determinante na seleção da madeira para diferentes aplicações construtivas, influenciando diretamente a longevidade e o desempenho estrutural dos elementos fabricados. (Torres, 2021)

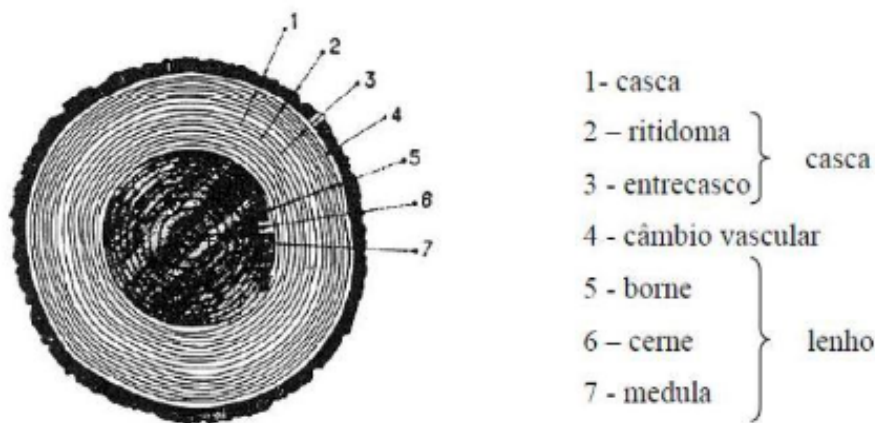


Figura 23 - Representação do tronco de uma árvore (Torres, 2021)

A estrutura da madeira é formada por um conjunto de fibras compostas por pequenas células alongadas, de formato predominante tubular, que podem apresentar seções circulares ou retangulares. Estas células constituem a unidade estrutural fundamental da madeira e são responsáveis pelas suas propriedades físico-mecânicas. As paredes destas células são maioritariamente constituídas por celulose, um polímero natural que garante a elevada capacidade resistente da madeira, conferindo-lhe rigidez e estabilidade dimensional. (Torres, 2021)

Estas fibras encontram-se unidas por lenhina, outro polímero de origem vegetal, cuja função é ligar as células entre si, proporcionando coesão e resistência adicional à estrutura do tecido lenhoso. A lenhina atua como uma espécie de matriz natural, preenchendo os espaços entre as fibras de celulose e contribuindo para a rigidez geral do material. (Torres, 2021)

Importa ainda referir que estas fibras estão orientadas, de forma predominante, segundo a direção longitudinal do tronco da árvore, acompanhando o seu eixo de crescimento. Esta orientação é determinante para o comportamento anisotrópico da madeira, já que as suas propriedades mecânicas variam consoante a direção em que as forças são aplicadas, sendo significativamente superiores no sentido longitudinal do que no sentido radial ou tangencial. Esta particularidade deve ser cuidadosamente considerada no planeamento e dimensionamento de estruturas de madeira. (Torres, 2021)

No que concerne à orientação das fibras, a madeira caracteriza-se por ser um material anisotrópico, ou seja, as suas propriedades físicas e mecânicas não são uniformes em todas as direções, variando de acordo com a orientação das suas fibras. Esta característica é determinante na avaliação do comportamento da madeira enquanto material de construção, uma vez que influencia diretamente a sua resistência, rigidez e capacidade de deformação. (Torres, 2021)

Para a correta análise e compreensão do desempenho da madeira, consideram-se três direções principais, diretamente associadas à disposição das fibras: a direção longitudinal, a direção radial e a direção tangencial. A direção longitudinal, também designada por direção paralela às fibras, acompanha o eixo de crescimento da árvore e é a direção em que a madeira apresenta maior resistência e rigidez. Por outro lado, as direções radial e tangencial são perpendiculares às fibras e situam-se na secção transversal do tronco. A direção radial corresponde a qualquer linha que parta do centro do tronco (medula) até à periferia, atravessando os anéis de crescimento. Já a direção tangencial é definida por uma linha perpendicular à radial, acompanhando a trajetória das camadas de crescimento em torno do tronco. (Torres, 2021)

A definição e distinção destas três direções estruturais são essenciais para a correta previsão do comportamento da madeira face às diferentes solicitações a que pode ser submetida, permitindo um dimensionamento mais rigoroso e uma maior eficiência estrutural das peças e elementos construtivos. (Torres, 2021)

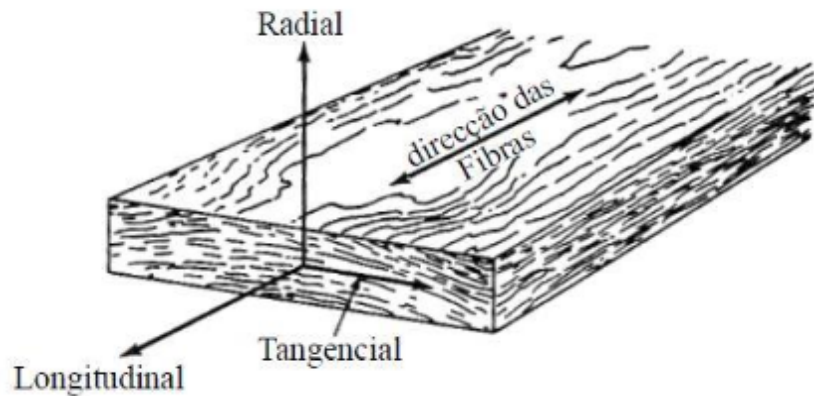


Figura 24 - Direções ou eixos principais (Torres, 2021)

A madeira, enquanto material natural, possui determinadas singularidade e irregularidades que, embora inerentes à sua formação biológica, podem comprometer a sua utilização estrutural e, conseqüentemente, influenciar negativamente as suas propriedades físicas e mecânicas. Esta particularidades, vulgarmente designadas por defeitos da madeira, devem ser cuidadosamente avaliadas, uma vez que podem reduzir a resistência, a durabilidade e a estabilidade dimensional dos elementos construtivos. (Torres, 2021)

Entre os defeitos mais comuns, facilmente identificados a olho nu, destacam-se os nós, as fendas e o fio inclinado. Os nós correspondem às zonas onde existiam ramos que, ao serem englobados pelo crescimento do tronco, originam descontinuidades na fibra, afetando a homogeneidade e a resistência da madeira, sobretudo em situações de esforços transversais ou de flexão. As fendas, por sua vez, resultam da retração diferencial da madeira durante o seu processo de secagem, podendo manifestar-se na direção longitudinal ou transversal, e são potencialmente críticas, pois facilitam a penetração de agentes de degradação, como humidade, fungos e insetos xilófagos. Por fim, o fio inclinado caracteriza-se pela disposição irregular das fibras em relação ao eixo longitudinal da peça, fenómeno que compromete a resistência à tração e à compressão, além de aumentar a propensão para torções e deformações. (Torres, 2021)

A correta identificação e classificação destes defeitos são fundamentais para assegurar a segurança, a durabilidade e a qualidade das construções em madeira, permitindo determinar a adequação das peças às diferentes aplicações estruturais ou decorativas. (Torres, 2021)

Em termos estruturais, os nós influenciam particularmente a resistência da madeira à tração paralela ao fio, uma vez que as fibras são desviadas ou interrompidas na zona do nó, originando pontos de fragilidade e potenciais locais de início de fissuras. Este efeito é tanto mais relevante quanto maior for o tamanho do nó, a sua posição na secção e o número de nós existentes na mesma peça. Para além disso, os nós

contribuem para o desvio do fio, dificultando o trabalho da madeira e comprometendo a sua estabilidade dimensional. (Torres, 2021)

Os produtos de madeira podem ser classificados segundo diferentes critérios, refletindo a diversidade de aplicações e de processos de fabrico associados a este material. A categorização mais imediata tende a estar relacionada com a função ou o uso a que se destinam, distinguindo-se, por exemplo, os produtos concebidos para fins estruturais daqueles que têm uma finalidade meramente decorativa ou utilitária. No entanto, esta não é a única forma de agrupar os materiais derivados da madeira. (Torres, 2021)

Com efeito, a diferenciação pode igualmente assentar no tipo ou na qualidade da madeira utilizada como matéria-prima, uma vez que as propriedades intrínsecas da espécie escolhida – como a densidade, a durabilidade ou a resistência mecânica – condicionam significativamente a performance do produto final. Outro critério de distinção, prende-se com a configuração que o produto assume, isto é, a forma como a madeira é transformada e organizada, podendo variar entre peças maciças, painéis, elementos lamelados ou compósitos. (Torres, 2021)

Contudo é ainda relevante considerar a complexidade do processo de produção envolvido. Existem produtos cuja transformação se resume a operações simples de corte e secagem, preservando em grande medida a estrutura natural da madeira, enquanto outros resultam de processos industriais mais sofisticados, que combinam tecnologias de colagem, prensagem ou tratamento químico, capazes de conferir ao material novas propriedades e ampliar as suas possibilidades de utilização. (Marques, L. M. da S. (2017)

De entre os diferentes produtos de madeira, aquele que se distingue de forma mais evidente é a madeira maciça. Pode afirmar-se que este constitui o material-base, a origem de praticamente todos os sistemas construtivos em madeira conhecidos ao longo da história. Trata-se, de forma simples, da matéria-prima obtida diretamente do tronco da árvore, sem recorrer a processos industriais complexos. Quando a madeira é apenas trabalhada de modo a manter a sua forma cilíndrica, classifica-se como madeira redonda, normalmente utilizada em aplicações mais tradicionais ou em estruturas simples. (Marques, L. M. da S. (2017)

Atualmente, o mercado disponibiliza uma ampla gama de peças de madeira serrada, com dimensões variadas, que permitem múltiplas utilizações, incluindo funções estruturais de maior exigência. Contudo, importa salientar que apenas as madeiras provenientes de espécies resinosas apresentam características adequadas para utilização em todas as áreas da arquitetura e construção. (Marques, L. M. da S. (2017)

A correta aplicação da madeira maciça depende de vários fatores determinantes. Entre eles destaca-se o grau de exposição à humidade, a resistência natural da espécie escolhida e os tratamentos a que a madeira possa ter sido sujeita para proteção contra fungos e insetos xilófagos. Um outro aspeto essencial é a estabilidade dimensional: a madeira maciça tende a sofrer oscilações nas suas dimensões após a aplicação, resultado do seu comportamento higroscópico. Para minimizar esse efeito, é

indispensável que o teor de humidade da madeira esteja o mais próximo possível do equilíbrio higroscópico do ambiente em que será instalada. (Marques, L. M. da S. (2017)



Figura 25 - Peças de madeira maciça (Fonte: Google imagens)

Assim, é relevante referir que, para certas utilizações específicas de madeira maciça, existem normas obrigatórias que asseguram a sua correta classificação e enquadramento. Estas normas desempenham um papel essencial ao definir requisitos de desempenho, durabilidade e segurança, garantindo que a madeira maciça possa ser utilizada de forma adequada e em conformidade com os padrões exigidos pela construção contemporânea. (Marques, L. M. da S. (2017)

### **3.8 Caracterização da sustentabilidade dos materiais tradicionais**

A caracterização da sustentabilidade dos materiais tradicionais exige uma leitura integrada que ultrapassa o simples desempenho estrutural ou funcional, abrangendo os impactos ambientais, sociais e culturais ao longo do respetivo ciclo de vida. Estudos baseados em Avaliação do Ciclo de Vida têm mostrado que materiais como o adobe, a terra crua ou a pedra extraída e transformada localmente apresentam, em regra, uma energia incorporada bastante inferior à de materiais modernos, como o betão armado ou o aço, uma vez que requerem menos processos industriais, menores temperaturas de fabrico e reduzidas distâncias de transporte. Em aplicações de reabilitação patrimonial, análises comparativas indicam igualmente que soluções baseadas em argila, calcário ou outros ligantes tradicionais tendem a exibir impactos globais menores em diversas categorias ambientais, nomeadamente emissões de gases com efeito de estufa, consumo de recursos não renováveis e produção de resíduos, quando confrontadas com alternativas contemporâneas de alta tecnologia. (Mateus, 2004) (Barbhuiya & Das, 2023) (Nasir & Kamal, 2021)

Para lá da perspetiva estritamente ambiental, os sistemas construtivos vernaculares evidenciam uma forte capacidade de adaptação às condições locais, articulando clima, cultura e disponibilidade de recursos de forma intrinsecamente equilibrada. A forma como as espessuras de parede, a inércia térmica, a orientação das aberturas ou a escolha de materiais são ajustadas ao contexto regional resulta de um processo cumulativo de experimentação e aperfeiçoamento ao longo de gerações, o que se traduz em soluções robustas, resilientes e energeticamente eficientes, muitas vezes alcançadas com recurso limitado a tecnologias mecânicas de climatização. Deste modo, materiais como a terra, a pedra ou a madeira local não se destacam apenas pelo baixo custo energético e pela reduzida pegada ecológica, mas também pelo contributo que oferecem à preservação da identidade cultural, à continuidade de saber fazeres comunitários e à promoção de práticas construtivas socialmente inclusivas, ancoradas em economias locais e em cadeias de abastecimento de pequena escala. (Mateus, 2004) (Barbhuiya & Das, 2023) (Nasir & Kamal, 2021)

A sustentabilidade dos materiais tradicionais de construção resulta, em grande medida, da forma como estes se relacionam com o território, com a cultura construtiva local e com o ciclo de vida dos edifícios. Em muitos contextos vernáculos, materiais como a pedra, a terra crua (adobe, taipa, BTC) e a madeira eram extraídos ou produzidos nas proximidades da obra, com baixo nível de transformação industrial, o que se traduzia em reduzida energia incorporada e menores emissões associadas ao transporte. Esta proximidade entre recurso, técnica e lugar permite encarar estes materiais como elementos intrinsecamente ligados a uma lógica de economia de recursos, anterior à própria formalização dos conceitos de “construção sustentável” ou “economia circular”. (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, 2012) (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.)

Do ponto de vista ambiental, diversos estudos indicam que a terra crua, a madeira serrada e as alvenarias tradicionais em pedra podem apresentar impactos globais inferiores aos de soluções modernas equivalentes, sobretudo na fase de produção, desde que as técnicas utilizadas respeitem processos de baixa intensidade energética. A terra crua, por exemplo, pode ser reutilizada inúmeras vezes, não sofre cozedura e, quando estabilizada de forma adequada, garante durabilidade compatível com a de muitas alvenarias cozidas, mantendo ao mesmo tempo uma pegada de carbono muito reduzida. A madeira proveniente de florestas geridas de forma sustentável funciona como reservatório de carbono ao longo da vida útil do edifício, contribuindo para a mitigação das alterações climáticas quando o corte é compensado por práticas de reflorestação. Já a pedra, embora implique algum consumo energético na extração e corte, apresenta uma durabilidade excepcional e grande potencial de reutilização em novos projetos, o que distribui o impacto inicial por períodos muito longos. (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, 2012) (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.) (Nina & Eires, 2022) (Nemcsics, Urmos, & Groller, 2023) (Azevedo, 2010) (Kuyrukçu & Kuyrukçu, 2015)

A sustentabilidade destes materiais não se limita, porém, à dimensão ambiental. Em termos sociais e culturais, as construções em pedra, terra e madeira incorporam saber-fazer local, técnicas transmitidas entre gerações e formas de habitar adaptadas ao clima e à morfologia do território. A arquitetura vernácula demonstra que soluções aparentemente simples, como paredes espessas em adobe, coberturas em madeira ou socacos em alvenaria de pedra seca, podem responder de forma eficaz às condições climáticas, assegurando conforto razoável com poucos recursos energéticos. Preservar e atualizar estas técnicas significa, por um lado, manter vivo um património material e imaterial e, por outro, criar oportunidade para emprego local qualificado, associado a práticas de construção e reabilitação mais artesanais. (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.) (Nemcsics, Urmos, & Groller, 2023) (Ornek, 2019)

Sob a perspetiva da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), vários trabalhos têm mostrado que a reabilitação e conservação de edifícios tradicionais pode ser, em muitos casos, mais sustentável do que a sua substituição por novas construções baseadas exclusivamente em materiais industriais. Ao prolongar a vida útil de paredes de pedra, de estruturas em madeira ou de alvenarias em terra, evita-se a energia e as emissões associadas à demolição, transporte de entulho e produção de novos materiais, enquanto se melhora o desempenho térmico com intervenções cirúrgicas de isolamento e controlo higrotérmico. Esta abordagem híbrida – conservar o que é estruturalmente sólido e culturalmente relevante, complementando com soluções contemporâneas de eficiência energética – revela o potencial dos materiais tradicionais como base para uma construção verdadeiramente sustentável e contextualizada. (Nemcsics, Urmos, & Groller, 2023) (Fernandes, 2020) (reVer, s.d.) (Fokaides, 2025)

A arquitetura vernacular e tradicional emerge da relação intrínseca entre o ser humano e o meio em que habita, refletindo a forma como as comunidades interpretam e interagem com a natureza e com as condições específicas do território onde se fixaram. Este tipo de arquitetura evidencia a importância decisiva que o lugar de implantação assume numa construção, não apenas como cenário, mas como elemento determinante do seu desempenho e significado. Embora, em épocas passadas, não existisse o conceito formal de “eficiência energética” nem a consciência atual do impacto ambiental associado à construção, a verdade é que a arquitetura vernacular revela que as sociedades antigas já integravam preocupações que hoje reconhecemos como fundamentais. (Castanhas, 2020)

As escolhas relacionadas como a orientação dos edifícios, a sua forma e volumetria, bem como os materiais empregues, estavam profundamente enraizados num conhecimento empírico, transmitido de geração em geração, que permite alcançar conforto e funcionalidade com base nos recursos disponíveis localmente. Nesse sentido, a arquitetura vernacular recorre a estratégias que reduzem, de forma natural e intuitiva, a necessidade de consumo energético, garantindo condições de habitabilidade adaptadas ao clima e às necessidades das comunidades. (Castanhas, 2020)

Com a revolução industrial, o carvão impôs-se como a principal fonte de energia transformada, inaugurando uma nova era marcada pela dependência de recursos não renováveis. Este recurso desempenhou um papel fundamental no crescimento económico e no avanço tecnológico, mas também deu início a um modelo energético que, ao longo do tempo, se revelou insustentável. Já em meados do século XX, o panorama energético sofre uma alteração significativa: o petróleo e o gás natural passam a ocupar o lugar central no fornecimento de energia, consolidando a predominância das fontes fósseis. (Castanhas, 2020)

No entanto, a década de 1970 trouxe consigo um momento de rutura e reflexão. A primeira grande crise energética, associada ao petróleo, expôs de forma evidente a vulnerabilidade das economias excessivamente dependentes deste recurso. Essa conjuntura levou à necessidade urgente de repensar os padrões de consumo, promovendo a redução da utilização de energias não renováveis em múltiplos setores da sociedade. A construção civil não ficou indiferente a esta mudança, sendo chamada a assumir um papel de destaque. Tornou-se imperativo melhorar o comportamento termodinâmico dos edifícios, reduzindo perdas energéticas, otimizando os consumos e procurando soluções mais equilibradas entre conforto, eficiência e sustentabilidade. (Castanhas, 2020)

Neste contexto, começaram a ganhar relevo os conceitos de arquitetura ecológica, sustentável e bioclimática, que, mais do que simples tendências, surgem como respostas consistentes à crise energética e ambiental. Estas abordagens procuram harmonizar as construções com o meio envolvente, tirando partido das condições naturais – como a orientação solar, a ventilação ou a inércia térmica dos materiais – para criar edifícios energeticamente mais eficientes, com menores impactos ambientais e capazes de oferecer melhor qualidade de vida aos seus utilizadores. (Castanhas, 2020)

A arquitetura vernacular assume hoje um papel de referência precisamente porque incorpora, de forma empírica, muitos dos princípios que atualmente se associam à sustentabilidade. Esta forma de construir pode ser lida à luz das três dimensões clássicas da sustentabilidade – económica, social e ambiental – uma vez que procura respostas equilibradas entre custos reduzidos, integração comunitária e respeito pelos recursos naturais. A partir destas premissas, emergem princípios que orientam a localização das construções, a escolha dos materiais e a forma como o edifício se relaciona com o clima e com o solo em que se implanta. (Castanhas, 2020)

Do ponto de vista ambiental, é frequente que as construções vernáculas sejam implantadas em solos menos férteis, preservando as melhores terras para a agricultura e adequando a implantação às características topográficas e climáticas do local. A gestão eficiente dos recursos materializa-se na preferência por materiais renováveis ou reutilizáveis, muitas vezes extraídos nas imediações, o que reduz consumos energéticos e emissões associadas ao transporte. Quando estes edifícios chegam ao fim da sua vida útil, uma parte significativa dos materiais pode ser

reintegrada em novas construções ou noutros usos, diminuindo o volume de resíduos e prolongando o ciclo de vida dos recursos. (Castanhas, 2020)

Sob a perspetiva económica, o recurso a materiais e técnicas locais reduz a necessidade de transporte e de transformação industrial, o que se traduz em menores custos de construção e de manutenção. Em muitos casos, a dimensão e o desenho dos edifícios são condicionados pelas dimensões dos próprios materiais – pedras, adobes, peças de madeira – e não o contrário; esta lógica diminui cortes e ajustes em obra, reduzindo desperdícios e esforço de mão de obra. Ao mesmo tempo, favorece a utilização de competências e saber-fazer existentes na comunidade, reforçando a economia local e a transmissão de conhecimento entre gerações. (Castanhas, 2020)

Na dimensão social, a arquitetura vernacular responde a necessidades concretas das populações, articulando modos de vida, clima e cultura num conjunto coerente de soluções. As estratégias solares passivas – como a orientação cuidada dos vãos, o controlo de sombreamentos, a espessura das paredes ou o desenho das coberturas – são usadas, muitas vezes de forma intuitiva, para climatizar naturalmente os espaços, garantindo níveis de conforto razoáveis com consumos energéticos muito baixos. Estas estratégias, que hoje se reconhecem como princípios bioclimáticos, mostram que a arquitetura vernácula integra de forma exemplar as três dimensões da sustentabilidade, antecipando preocupações que apenas recentemente foram formalizadas em indicadores e quadros de avaliação. (Castanhas, 2020)

Tabela 6 - Indicadores de sustentabilidade dos edifícios (Castanhas, 2020)

Dimensão da Sustentabilidade	Indicadores
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de matérias-primas naturais;</li> <li>- Uso de técnicas construtivas tradicionais;</li> <li>- Uso de técnicas construtivas tradicionais;</li> <li>- Consumo de energia;</li> <li>- Liberação de emissões danosas ao meio envolvente;</li> </ul>
Social	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acessibilidade;</li> <li>- Vida útil;</li> <li>- Ambiente interno;</li> <li>- Uso sem barreiras</li> </ul>
Economia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo ao longo do ciclo de vida;</li> </ul>

Tabela 7 - Princípios de sustentabilidade presentes na construção vernacular (Castanhas, 2020)

Ambiental	Sociocultural	Socioeconómico
Respeito pelo ambiente e paisagem	Proteção da paisagem natural	Suporte à autonomia

Valorização dos recursos naturais e climáticos	Transmissão da cultura construtiva	Promoção da economia local
Redução da poluição e dos resíduos	Promoção da inovação e soluções criativas	Otimização dos esforços construtivos
Garantia do conforto humano	Reconhecer os valores intangíveis	Prolongamento do ciclo de vida dos edifícios
Mitigação dos efeitos dos desastres naturais	Promoção da coesão natural	Proteção dos recursos

As estratégias solares passivas encaram o sol como uma fonte direta de energia térmica para o edifício, procurando controlar a forma como essa energia é captada, acumulada e libertada, de modo a criar condições de conforto adequadas em cada espaço. Em termos práticos, tratam-se de decisões de projeto que exploram a trajetória aparente do sol ao longo do dia e do ano, ajustando a forma do edifício, a orientação das fachadas, o desenho dos vãos e o tipo de envidraçados para maximizar os ganhos solares quando são desejáveis e limitá-los quando se tornam excessivos. A intensidade da radiação incidente resulta da combinação entre a duração da exposição e o ângulo com que os raios solares atingem as superfícies, pelo que a correta orientação e o sombreamento seletivo são determinantes para o balanço energético do edifício. (Castanhas, 2020)

A escolha da orientação das fachadas e dos vãos, a dimensão e o tipo de vidros, bem como a presença de elementos de sombreamento fixos ou móveis, influenciam diretamente a quantidade de energia transmitida para o interior. Fachadas bem orientadas e protegidas conseguem reduzir o risco de sobreaquecimento no verão e, em simultâneo, potenciar a entrada de calor no inverno. Para que o edifício responda de forma eficaz a estas variações, os elementos construtivos devem possuir inércia térmica adequada, seja através de camadas de materiais com boa capacidade de armazenamento de calor, de um correto nível de isolamento, de caixilharias eficientes ou da minimização de pontes térmicas. A inércia térmica tem um papel particularmente relevante porque atenua e atrasa as oscilações da temperatura interior face às variações exteriores, reduzindo as amplitudes térmicas entre o período diurno e o noturno. (Castanhas, 2020)

O conforto térmico não depende apenas da radiação solar, mas também do comportamento do ar no interior e no exterior dos espaços. Na arquitetura vernacular, o controlo da temperatura e da humidade relativa recorre frequentemente ao vento, explorando o movimento natural de massas de ar entre zonas de alta e baixa pressão. Esta ventilação natural pode representar uma desvantagem em inverno, quando o objetivo é conservar o calor, mas transforma-se numa vantagem significativa em verão, ao promover o arrefecimento dos ambientes

sem recurso a sistemas mecânicos. Em climas quentes e secos, a presença de água – sob a forma de fontes, canais ou superfícies húmidas – desempenha igualmente um papel importante, contribuindo para o arrefecimento atmosférico por evaporação e aumentando a sensação de conforto dos utilizadores. (Castanhas, 2020)

A arquitetura bioclimática é hoje frequentemente apresentada como uma abordagem inovadora, associada à sustentabilidade e à economia de recursos, mas muitos dos seus princípios encontram raízes profundas na arquitetura vernacular. A observação das construções tradicionais em Portugal mostra que, muito antes de se falar em eficiência energética, já eram consideradas questões como a orientação solar, a proteção face aos ventos dominantes, a espessura das paredes ou o tipo de materiais usados, o que explica a grande diversidade de formas, soluções construtivas e técnicas que se encontram de região para região. Esta adaptação fina ao clima, ao relevo e aos recursos locais dá origem a uma verdadeira “arquitetura de região”, em que cada território desenvolve a sua própria linguagem construtiva. (Castanhas, 2020) (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.) (Ornek, 2019)

Nesta linha, autores como Kenneth Yeang defendem que uma arquitetura verdadeiramente sustentável deve ser, ao mesmo tempo, bioclimática e regionalista, isto é, profundamente enraizada no contexto em que se insere. A arquitetura regionalista procura incorporar no desenho o “espírito” do lugar, respondendo às condições físicas e culturais do contexto por meio da forma, da organização espacial, da expressão estética, da escolha dos materiais e das soluções técnicas adotadas. Mais do que uma simples questão de estilo, trata-se de construir uma relação coerente entre o edifício e o seu meio envolvente, num determinado momento histórico, integrando clima, recursos disponíveis e identidade cultural numa proposta arquitetónica que faça sentido para quem a habita e para o território onde se implanta. (Castanhas, 2020) (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.) (Ornek, 2019)

Portugal apresenta uma grande diversidade de condições climáticas e de tipos de solo, o que se reflete em arquiteturas vernaculares muito distintas e em diferentes formas de ocupação do território. Em cada região, as soluções construtivas tradicionais resultam da adaptação ao lugar, à disponibilidade de materiais e às necessidades específicas das comunidades, pelo que se pode dizer que a arquitetura vernacular é uma arquitetura “do lugar e para o lugar”. Utiliza, regra geral, recursos locais – pedra, terra, madeira, cal, cortiça – e recorre a estratégias de implantação e desenho que procuram tirar partido das características do meio envolvente. (Castanhas, 2020) (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.) (Ornek, 2019)

Observa-se, por exemplo, uma atenção cuidada à localização das construções, procurando protegê-las da exposição solar excessiva e aproveitar a proximidade de linhas de água, tanto para consumo como para moderar o microclima. Muitos aglomerados tradicionais são concebidos como prolongamento da paisagem, com

uma orientação e implantação estratégicas: edifícios encostados entre si, pequenas aberturas para o exterior, volumetrias parcialmente enterradas ou apoiadas na encosta, reduzindo a superfície exposta ao vento e às oscilações extremas de temperatura. Desta forma, o contacto direto com o ambiente exterior é controlado, contribuindo para maior estabilidade térmica interior com recursos muito limitados. (Castanhas, 2020) (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.) (Ornek, 2019)

A escolha dos materiais varia em função do clima e das condições locais. Em regiões secas e quentes, recorrem-se frequentemente a materiais pesados, com elevada inércia térmica, como pedra, taipa ou alvenaria maciça, que acumulam calor durante o dia e o libertam lentamente, suavizando as amplitudes térmicas. Em zonas frias e secas, privilegiam-se igualmente materiais com massa térmica, mas com soluções que maximizam a captação solar no inverno, através da orientação dos vãos e da espessura das paredes. Já em regiões húmidas e quentes, surgem com mais frequência materiais leves e soluções construtivas menos massivas, que facilitam a ventilação e a rápida dissipação do calor, reduzindo o risco de condensações e de degradação biológica. (Castanhas, 2020) (Nina & Eires, 2022) (Azevedo, 2010)

Estas estratégias exigem uma leitura cuidada das propriedades térmicas dos materiais. Nem todos possuem inércia ou capacidade de armazenamento térmico significativa; para que esta seja efetiva, é necessário que o elemento exposto à radiação solar direta apresente massa e espessura suficientes, bem como uma condutividade térmica adequada, como acontece com alvenarias de pedra, betão, tijolo maciço ou mesmo reservatórios de água estrategicamente colocados. A sua posição no edifício é pensada em função da geometria dos vãos, da trajetória solar no inverno e do modo de utilização dos espaços, de forma a otimizar os ganhos solares quando são benéficos e a limitar o sobreaquecimento quando são indesejáveis. Em muitos contextos rurais, uma estratégia adicional consistia em aproveitar o calor libertado pelos animais: não era raro encontrar edifícios de dois pisos em que o rés-do-chão funcionava como estábulo, aquecendo, por transferência de calor, o piso superior destinado à habitação. (Castanhas, 2020) (Nina & Eires, 2022) (Azevedo, 2010)

Estas construções seguem, de forma empírica, vários princípios da arquitetura solar passiva, procurando reduzir perdas de calor no inverno e limitar ganhos excessivos no verão. Em regra, minimizam as superfícies expostas a norte, dispõem de aberturas de dimensão controlada orientadas para o sol, recorrem a sistemas de sombreamento e proteção contra a radiação direta e o vento e utilizam elementos com elevada inércia térmica para atrasar a penetração do calor no interior. A aplicação concreta destes princípios varia em função do clima local, sendo necessário ajustá-los às características de cada região – mais massa e proteção solar em climas quentes e secos, maior captação solar e controlo de infiltrações em climas frios, ou maior ênfase na ventilação em contextos húmidos. (Castanhas, 2020) (Nina & Eires, 2022) (Azevedo, 2010)

As estratégias bioclimáticas presentes na arquitetura tradicional em climas de frio ou de calor excessivo, mas secos, podem ser entendidas como dois conjuntos complementares de medidas: por um lado, tirar partido do sol quando o objetivo é aquecer; por outro, proteger a construção quando o calor é excessivo, assegurando sempre um controlo cuidadoso das trocas com o exterior. (Castanhas, 2020) (Nina & Eires, 2022) (Azevedo, 2010)

No caso de frio intenso, a prioridade passa por maximizar os ganhos solares. Isso faz-se orientando o edifício de acordo com o percurso do sol, aumentando a incidência direta sobre a envolvente e sobre elementos próximos com grande inércia térmica e, muitas vezes, de cor escura, que absorvem e acumulam calor. As aberturas são dimensionadas e posicionadas para permitir a penetração direta da radiação nos espaços interiores, onde o calor é armazenado em paredes, pavimentos ou outros elementos com massa significativa. Em paralelo, procura-se reduzir ao mínimo o contacto com o ambiente exterior: enterrar parcialmente a construção, espessar a envolvente, usar materiais isolantes nas zonas mais expostas, limitar e proteger os vãos e encostar edifícios entre si ou ao terreno para diminuir a área de fachada exposta. A exposição aos ventos frios é cuidadosamente controlada, sobretudo nas zonas de entrada. Em muitos exemplos, o ar é estratificado através de pés-direitos mais altos ou espaços de transição, criando “peles” sucessivas entre o exterior e o interior aquecido. A inércia térmica do terreno é também explorada para desfazer a variação dia-noite. Quando o aquecimento passivo não é suficiente, recorre-se a fontes artificiais, como lareiras centrais, cujo calor é acumulado em elementos massivos ou distribuído para divisões adjacentes, podendo mesmo aproveitar-se o calor libertado por animais alojados nos pisos inferiores. (Castanhas, 2020) (Nina & Eires, 2022) (Azevedo, 2010)

Em climas de calor excessivo e seco, a lógica inverte-se: o objetivo principal é proteger a construção do sol e evacuar rapidamente o calor acumulado. As fachadas e coberturas são orientadas e protegidas por elementos de sombreamento – beirais, varandas, vegetação ou painéis – que reduzem a radiação direta; combinam-se superfícies refletoras e materiais isolantes para limitar a absorção de calor, e a relação com o terreno e a vegetação é trabalhada de modo a criar zonas sombreadas e frescas em redor do edifício. Tal como no caso do frio, controla-se a exposição aos ventos, mas agora para evitar a entrada de ar demasiado quente. A profundidade dos espaços interiores é aumentada e criam-se zonas de transição e “peles” intermédias que amortecem os picos de temperatura, recorrendo a materiais com inércia térmica para gerir o fluxo de calor entre exterior e interior. (Castanhas, 2020) (Nina & Eires, 2022) (Azevedo, 2010)

O arrefecimento faz-se, sobretudo, através de ventilação natural e dissipação do calor: introduz ar fresco a partir de zonas mais sombrias ou do subsolo, capta brisas, canaliza o ar sob pavimentos e promove a ventilação cruzada com aberturas em fachadas opostas. Em muitos casos, recorrem-se também a aberturas superiores, explorando o efeito chaminé para expulsar o ar quente acumulado, bem como a ventilação intensiva dos espaços de transição, em especial nas coberturas. A

evaporação da água – em fontes, tanques ou pavimentos húmidos – é usada para induzir correntes de ar ascendentes e retirar calor do interior. À noite, quando as temperaturas descem, abre-se o edifício ao exterior para libertar o calor acumulado, aproveitando a radiação para o céu noturno e reestabelecendo condições mais confortáveis para o dia seguinte. (Castanhas, 2020) (Nina & Eires, 2022) (Azevedo, 2010)

### **3.8.1 Análise ambiental**

Do ponto de vista ambiental, os materiais tradicionais apresentam, em muitos casos, um perfil de sustentabilidade mais favorável do que os materiais industrializados, sobretudo quando analisados à escala do ciclo de vida. Em primeiro lugar, destaca-se a questão da energia incorporada. Materiais como o adobe, a taipa ou o tijolo cru são, regra geral, produzidos a partir de recursos disponíveis localmente, recorrendo a processos de transformação simples – extração, mistura, moldagem e secagem ao ar livre – que exigem pouco ou nenhum consumo de energia fóssil. A pedra é frequentemente utilizada quase em estado natural, limitando-se a operações de corte e ajustamento, enquanto a madeira pode ser aplicada após abate, desbaste e secagem, sem processos industriais complexos. Em contraste, a produção de materiais como o aço e o betão envolve temperaturas muito elevadas, consumo intensivo de combustíveis fósseis e cadeias logísticas longas, resultando em emissões significativas de gases com efeito de estufa associadas às fases de fabrico e transporte. (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, 2012) (Nina & Eires, 2022) (reVer, s.d.) (Amaral, 2024)

Outro aspeto ambiental fundamental é a durabilidade. Rochas como o granito ou o calcário exibem uma resistência que lhes permite atravessar séculos de exposição com degradação relativamente reduzida, sobretudo quando a construção protege adequadamente as zonas mais vulneráveis. Essa longevidade distribui a energia incorporada por um período muito longo, diminuindo o impacto anual associado ao material. A madeira, quando corretamente detalhada e protegida da humidade e dos agentes biológicos, também pode ter vidas úteis elevadas, e desempenha ainda o papel de reservatório de carbono: o dióxido de carbono fixado durante o crescimento da árvore permanece armazenado na estrutura lenhosa ao longo de toda a vida útil do elemento construtivo, só sendo libertado de forma significativa em situações de decomposição acelerada ou combustão. (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, 2012) (Nina & Eires, 2022) (Kuyrukçu & Kuyrukçu, 2015)

A biodegradabilidade e a reciclabilidade constituem igualmente pilares centrais na avaliação ambiental dos materiais tradicionais. Ao contrário de muitos polímeros sintéticos e de betões com adições complexas, que geram resíduos difíceis de reintegrar em ciclos naturais, materiais como a terra crua, a madeira ou a pedra podem regressar ao ambiente sem impactos duradouros ou ser reutilizados em novos contextos construtivos. A madeira pode ser reaproveitada como elemento estrutural, como revestimento ou, em última instância, como biomassa energética; a

pedra pode ser desmontada e aplicada noutros edifícios ou infraestruturas; e o barro ou a terra estabilizada podem retornar ao solo, participando novamente nos ciclos geológicos e biogeoquímicos. Esta capacidade de reintegração aproxima estes materiais dos princípios da economia circular, reduzindo a quantidade de resíduos de construção e demolição e a necessidade de novos recursos virgens. (Nina & Eires, 2022) (Azevedo, 2010) (reVer, s.d.) (Amaral, 2024) (Farcha & Santiago, 2024)

Em síntese, os materiais tradicionais configuram soluções de baixo impacto ambiental, caracterizadas por reduzida energia incorporada, potencial elevado de reutilização e reciclagem e tempos de vida longa quando corretamente aplicados e mantidos. Estas características alinham-se com os objetivos contemporâneos de diminuição da pegada ecológica do setor da construção e de promoção de modelos construtivos mais circulares, nos quais os materiais são encarados como recursos de longo prazo e não como consumíveis descartáveis. (Peixoto, 2008) (Nina & Eires, 2022) (reVer, s.d.)

### **3.8.2 Análise social e cultural**

Os materiais tradicionais possuem uma dimensão social e cultural inseparável da sua sustentabilidade, o que tem sido amplamente reconhecido na literatura sobre arquitetura vernácula e construção sustentável. Ao longo da história, recursos como madeira, pedra e terra crua foram selecionados não apenas pela disponibilidade física, mas pela forma como respondiam às condições climáticas, ao relevo e às práticas de vida de cada comunidade, reforçando a ligação entre cultura e território. (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.) (Ornek, 2019)

Diversos autores mostram que cada região desenvolveu soluções construtivas próprias – como casas de xisto nas serras, taipa no Alentejo ou granito no Norte de Portugal – em função dos materiais locais e do saber-fazer transmitido entre gerações. Esta arquitetura vernácula materializa um conhecimento empírico acumulado, que integra clima, recursos e usos sociais do espaço, sendo hoje apontada como referência para abordagens contemporâneas de sustentabilidade. A preservação e atualização destas técnicas contribuem para manter vivo um património cultural imaterial, reforçando a identidade das comunidades e o sentimento de pertença ao lugar. (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.) (Nina & Eires, 2022) (Kuyrukçu & Kuyrukçu, 2015)

Do ponto de vista social e económico, a utilização de materiais tradicionais apoia cadeias produtivas de proximidade e valoriza ofícios especializados – pedreiros, carpinteiros, oleiros, mestres de taipa –, promovendo emprego local e a continuidade de competências que, de outro modo, tenderiam a desaparecer. Estudos sobre desenvolvimento local sustentável sublinham que estas práticas reforçam a coesão social e podem constituir uma alternativa relevante em contextos rurais e pequenos centros urbanos, onde o setor da construção tradicional tem peso significativo. (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.) (Nina & Eires, 2022) (Kuyrukçu & Kuyrukçu, 2015)

A literatura sobre conforto e percepção do ambiente construído destaca ainda a importância da dimensão sensorial dos materiais naturais. A madeira está associada a sensações de calor visual e tátil, a pedra transmite estabilidade e permanência, e a terra crua proporciona um conforto higrotérmico particular, graças à sua capacidade de regular temperatura e humidade. Estes atributos intangíveis influenciam o bem-estar psicológico e emocional dos ocupantes, reforçando a ligação entre o espaço construído e os seus utilizadores e contribuindo para uma abordagem de sustentabilidade que integra, de forma equilibrada, as dimensões ambiental, social e cultural. (Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa, s.d.) (Nina & Eires, 2022) (Kuyrukçu & Kuyrukçu, 2015)

### **3.8.3 Comparação com materiais modernos**

A comparação entre materiais tradicionais e materiais modernos evidencia diferenças profundas que não se limitam à dimensão técnica, estendendo-se ao impacto ambiental, ao conforto e à relação com o contexto cultural. Os materiais modernos – como betão, aço ou vidro industrializado – oferecem vantagens evidentes em termos de padronização, resistência uniforme e rapidez de construção, características que respondem bem às exigências de produção em grande escala e à mecanização do setor. Contudo, estas vantagens têm um custo ambiental elevado: a fabricação de cimento e aço está associada a emissões significativas de CO<sub>2</sub>, elevado consumo de energia e água, extração intensiva de matérias-primas e geração de grandes volumes de resíduos de construção e demolição. (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, 2012) (reVer, s.d.) (Amaral, 2024) (AICCOPN, 2022)

Os materiais tradicionais, por sua vez, apresentam maior variabilidade nas propriedades físicas e mecânicas, o que exige conhecimento técnico e experiência para uma aplicação segura e eficiente. Esta aparente limitação pode, no entanto, ser encarada como uma oportunidade, na medida em que obriga a um planeamento mais cuidado e a soluções construtivas mais personalizadas, adaptadas ao clima, ao terreno e às necessidades dos utilizadores. Em vez de propostas padronizadas, resultam edifícios mais contextualizados, que dialogam com a paisagem e com a cultura local. (Nina & Eires, 2022) (Azevedo, 2010) (Kuyrukçu & Kuyrukçu, 2015)

No que respeita ao conforto térmico e energético, muitos materiais tradicionais revelam desempenhos muito interessantes. Paredes espessas em taipa ou adobe, graças à sua elevada inércia térmica, contribuem para amortecer as oscilações de temperatura ao longo do dia, ajudando a manter ambientes interiores mais estáveis sem recurso intensivo a sistemas mecânicos de climatização. Em regiões quentes, a pedra é utilizada para manter o interior fresco, enquanto a madeira se distingue por um bom comportamento como isolante térmico e acústico, melhorando tanto o conforto como a qualidade sonora dos espaços. Em consequência, muitos edifícios tradicionais conseguem reduzir significativamente o recurso a aquecimento e arrefecimento artificiais, o que se traduz em menor consumo energético ao longo da vida útil. (Nina & Eires, 2022) (Nemcsics, Urmos, & Groller, 2023)

Em termos de circularidade e fim de vida, a diferença entre estes dois grupos de materiais torna-se ainda mais evidente. Materiais modernos como o betão armado, certos compósitos ou polímeros de difícil separação tendem a gerar resíduos complexos, com poucas possibilidades de reutilização ou reciclagem de alto valor. Já os materiais tradicionais têm, em geral, destinos mais sustentáveis: a pedra e a madeira podem ser reaproveitadas noutros edifícios ou aplicações, enquanto o barro e as fibras vegetais são biodegradáveis e podem regressar ao solo com impacto reduzido. (reVer, s.d.) (Amaral, 2024) (Farcha & Santiago, 2024)

Deste modo, a comparação mostra um contraste claro: os materiais modernos garantem eficiência, rapidez e escala, mas frequentemente à custa de elevados impactos ambientais e de uma maior dificuldade de reintegração em ciclos circulares; os materiais tradicionais, pelo contrário, oferecem menor energia incorporada, maior compatibilidade com a economia circular, boa durabilidade e forte integração cultural, embora exijam mão de obra mais especializada e processos construtivos menos industrializados. (Kuyrukçu & Kuyrukçu, 2015) (reVer, s.d.)

### **3.9 Impactos sociais e culturais ao utilizar construção típica de cada região**

A valorização dos métodos construtivos tradicionais representa um pilar essencial para a preservação da identidade cultural, o fortalecimento da coesão social e o desenvolvimento sustentável das comunidades. Ao privilegiar técnicas e materiais locais, promove-se não apenas o respeito pelo património histórico, mas também a transmissão de saberes ancestrais, fomentando um sentimento de pertença e pertinência face ao território, elementos fundamentais para a construção de sociedades resilientes e coesas. (Nunes, 2015)

O projeto das Aldeias do Xisto, localizado na região centro de Portugal, é um exemplo paradigmático da valorização dos métodos construtivos tradicionais. A reabilitação destas aldeias, baseada na recuperação de habitações tradicionais em xisto, não apenas revitalizou o património arquitetónico, mas também gerou oportunidades de emprego para pedreiros, carpinteiros e artesãos locais, impulsionando a economia regional e promovendo o turismo sustentável. O projeto das Aldeias do Xisto demonstra como a valorização do saber-fazer tradicional pode transformar comunidades rurais, melhorando as condições de vida e promovendo a valorização do território. A reabilitação destas aldeias foi realizada com o envolvimento ativo da comunidade, garantindo a continuidade dos conhecimentos e a participação cidadã, elementos fundamentais para o sucesso e sustentabilidade do projeto. A integração de técnicas tradicionais com soluções modernas de eficiência energética permitiu a adaptação das habitações às necessidades contemporâneas, sem comprometer a identidade cultural. (Materiais, sistemas e técnicas de construção, s.d.)

A construção em taipa, particularmente no Alentejo, é outro caso relevante. A técnica de taipa, que utiliza barro e fibras vegetais, é adaptada às condições climáticas locais, proporcionando um excelente isolamento térmico e baixo impacto ambiental. A utilização destes materiais locais e técnicas ancestrais favorece a economia circular, reduzindo a dependência de recursos importados e promovendo a sustentabilidade ambiental. A construção em taipa também fortalece a identidade cultural, pois representa uma resposta histórica às necessidades locais, transmitindo valores e tradições entre gerações. A técnica de taipa permite ainda a construção de habitações acessíveis, adaptadas às condições climáticas, melhorando a qualidade de vida dos habitantes. A reabilitação de casas em taipa tem sido promovida por associações locais e instituições, garantindo a continuidade dos conhecimentos e a valorização do património. (Oliveira & Galhano, 2020)

A construção em granito nas regiões do Minho e Trás-os-Montes é outro exemplo notável. As habitações em granito não só se destacam pela sua robustez e durabilidade, mas também pela sua capacidade de integrar o edificado no contexto natural, promovendo a identidade local e a sustentabilidade ambiental. A utilização de granito local permite a redução de custos de transporte e a valorização do território, contribuindo para o desenvolvimento sustentável das comunidades. A construção em granito também representa uma resposta histórica às necessidades locais, transmitindo valores e tradições entre gerações. A integração de técnicas tradicionais com soluções modernas de eficiência energética permitiu a adaptação das habitações às necessidades contemporâneas, sem comprometer a identidade cultural. (Oliveira & Galhano, 2020)

Estes exemplos demonstram que a valorização dos métodos construtivos tradicionais vai além da estética ou da funcionalidade, impactando positivamente a coesão social, a economia local e a preservação ambiental, tornando-se uma estratégia fundamental para o desenvolvimento sustentável das comunidades. A integração destes métodos nos projetos contemporâneos não apenas preserva o património, mas também promove a inovação e a sustentabilidade, garantindo um futuro mais resiliente e coeso para as comunidades. A valorização dos métodos construtivos tradicionais é, portanto, uma estratégia essencial para a construção de sociedades mais justas, sustentáveis e coesas. (Materiais, sistemas e técnicas de construção, s.d.) (Oliveira & Galhano, 2020)

## **4 SUSTENTABILIDADE DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**

### **4.1 Inovação e Tecnologia dos materiais sustentáveis**

Os edifícios, as infraestruturas e o meio ambiente formam um sistema interdependente, no qual cada elemento influencia diretamente os restantes. Os materiais e recursos naturais retirados do meio envolvente são transformados e incorporados na construção, passando depois estes próprios edifícios a integrar e a modificar o território onde se inserem. Num contexto em que a sustentabilidade assume um papel cada vez mais central no debate público, torna-se fundamental reconhecer o impacto que o setor da construção exerce, tanto no consumo de matérias-primas como na forma como molda a sociedade e o ambiente. Compreender esta relação é essencial para promover práticas construtivas mais responsáveis, eficientes e alinhadas com os princípios do desenvolvimento sustentável. (Ferreira, 2014)

Em Portugal, grande parte dos sistemas construtivos continua fortemente dependente do cimento, um material cuja produção implica um consumo energético muito elevado, sobretudo devido à utilização intensiva de combustíveis fósseis. Para além do impacto associado à sua fabricação, o fim de vida das construções convencionais gera volumes significativos de resíduos. Na maioria dos casos, estes materiais resultantes da construção e demolição acabam depositados em aterro, uma vez que apresentam um reduzido potencial de reciclagem. Quando a reciclagem é possível, exige processos complexos e economicamente pouco viáveis, o que contraria os princípios da sustentabilidade e dificulta a integração destes resíduos numa economia verdadeiramente circular. (Ferreira, 2014)

Face à diversidade de sistemas construtivos atualmente disponíveis, torna-se essencial analisar alternativas que permitam reduzir os impactos ambientais associados ao setor da construção. A crescente preocupação com a sustentabilidade reforça a necessidade de adotar soluções que minimizem o consumo de recursos naturais, a produção de resíduos e as emissões resultantes dos processos construtivos tradicionais. Neste contexto, importa considerar materiais e tecnologias cuja aplicação contribua para um desempenho ambiental mais favorável. (Ferreira, 2014)

A construção metálica com estrutura leve em aço surge como uma solução alinhada com os princípios da construção sustentável. Por recorrer a perfis de reduzida espessura e massa, este sistema permite diminuir significativamente o consumo de matérias-primas e minimizar o impacto ambiental associado à fase de produção. Para além da leveza estrutural — que contribui para a redução de cargas, simplificação dos processos de montagem e menor necessidade de fundações — o aço destaca-se pela sua elevada durabilidade e, sobretudo, pela capacidade de ser reutilizado ou totalmente reciclado no final do ciclo de vida. Estas características conferem ao sistema um desempenho ambiental particularmente favorável quando comparado com técnicas construtivas tradicionais, posicionando o *Light Steel Framing* como uma

alternativa sustentável e tecnicamente eficiente no contexto da construção contemporânea. (Ferreira, 2014)

A construção metálica apresenta vantagens significativas relativamente à construção tradicional em alvenaria, especialmente no domínio da sustentabilidade. O seu elevado nível de industrialização — resultante do fabrico dos elementos estruturais em ambiente controlado de fábrica — permite otimizar processos, garantir maior precisão dimensional e reduzir significativamente o tempo de execução em obra. Esta pré-fabricação contribui igualmente para diminuir a necessidade de mão de obra especializada no estaleiro e, sobretudo, para minimizar a geração de resíduos, já que os cortes, ajustes e operações de transformação ocorrem maioritariamente em contexto industrial. Paralelamente, o controlo rigoroso durante a produção assegura melhores condições de segurança e reduz o impacto ambiental associado à fase de construção, posicionando o sistema metálico como uma solução mais eficiente e sustentável face às técnicas convencionais em alvenaria. (Ferreira, 2014)

Os avanços recentes em materiais sustentáveis têm impulsionado o desenvolvimento de soluções pré-fabricadas em betão ecoeficiente, nas quais uma parte significativa do clínquer é substituída por adições minerais ou subprodutos industriais, como cinzas volantes ou escórias de alto-forno. Esta substituição permite reduzir de forma direta as emissões de dióxido de carbono associadas à produção de cimento, enquanto, que muitos casos, melhora características de durabilidade, como a resistência à penetração de cloretos ou à reação álcalis-sílica. A utilização de painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente, com isolamento térmico incorporado, contribui ainda para diminuir a quantidade de material colocada em obra, reduzir desperdícios e encurtar prazos de execução, uma vez que os elementos chegam ao estaleiro dimensionados e prontos a montar, com controlo industrial da qualidade. (Nudurabyconstreco, 2025) (Souza & Oliveira, 2024) (Umbloco, s.d.)

Paralelamente, observa-se uma valorização crescente de materiais de origem natural ou reciclada com elevada capacidade de isolamento térmico e baixo impacto ambiental, entre os quais se destacam a cortiça expandida, os agregados leves de argila expandida (Leca) e os sistemas tipo ICF (*Insulated Concrete Forms*). A cortiça, enquanto recurso renovável abundantemente disponível em Portugal, apresenta uma combinação particularmente favorável de baixa condutividade térmica, boa resistência à humidade e capacidade de reutilização ou reciclagem ao fim de vida, o que a torna adequada tanto para soluções de isolamento contínuo como para elementos pré-fabricados de fachada. Os agregados leves de argila expandida permitem produzir betonilhas e elementos estruturais com menor massa volúmica, reduzindo cargas permanentes e o consumo de matérias-primas, ao mesmo tempo que melhoram o comportamento térmico e acústico dos elementos construtivos. Já os sistemas ICF conjugam cofragens permanentes em material isolante com um núcleo de betão estrutural, originando paredes com elevados níveis de estanquidade e resistência térmica, o que facilita a obtenção de edifícios de baixo consumo energético e com desempenho ambiental mais favorável ao longo do ciclo de vida. (Leca, 2025) (FCT UNL, 2025) (ICF Plastbau Portugal, s.d.)

#### **4.1.1 Painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente**

A indústria da construção enfrenta atualmente um dos maiores desafios da sua história: reduzir de forma significativa os impactos ambientais associados à utilização de materiais convencionais, em particular do betão, que continua a ser um dos materiais mais usados a nível mundial pela sua elevada resistência mecânica e durabilidade. A produção de cimento Portland, componente essencial do betão, é responsável por uma fração relevante das emissões globais de dióxido de carbono, devido à calcinação do clínquer e ao consumo intensivo de energia em fornos de alta temperatura. Neste contexto, têm surgido soluções como os painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente, cuja conceção procura conciliar desempenho estrutural, eficiência energética e redução do impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida. (Nudurabyconstreco, 2025) (Souza & Oliveira, 2024) (Supercasa, 2025)

O conceito de ecoeficiência no betão pré-fabricado assenta em formulações que incorporam materiais alternativos e reciclados, diminuindo a dependência de matérias-primas virgens e mitigando as emissões associadas à produção de cimento. Diversos estudos têm demonstrado o potencial da substituição parcial do ligante por adições minerais, como cinzas volantes, escórias granuladas de alto-forno ou fíler calcário, bem como da utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. Trabalhos recentes mostram, por exemplo, que a combinação de agregados leves de argila expandida (Leca) com resíduos de mármore e a substituição parcial do cimento por cinzas volantes permite obter painéis pré-fabricados com desempenho estrutural compatível com as exigências normativas, ao mesmo tempo que se reduz de forma significativa a pegada de carbono e a energia incorporada por metro cúbico de betão. (Nudurabyconstreco, 2025) (Souza & Oliveira, 2024) (Leca, 2024)

Para além da composição do betão, a configuração construtiva dos painéis pré-fabricados desempenha um papel determinante no seu desempenho ambiental e funcional. As soluções do tipo “sandwich”, constituídas por duas lâminas de betão separadas por um núcleo isolante, têm sido amplamente estudadas pela sua capacidade de combinar inércia térmica, bom comportamento acústico e redução das perdas energéticas através da envolvente. No que respeita aos materiais isolantes, resultados de estudos comparativos indicam que a cortiça expandida se destaca por apresentar uma das mais baixas pegadas de carbono, refletindo o seu carácter renovável e a reduzida energia incorporada, enquanto soluções em EPS reciclado tendem a evidenciar melhor relação custo-benefício em aplicações onde o fator económico é particularmente sensível. Estes desenvolvimentos mostram que a ecoeficiência dos painéis pré-fabricados não depende apenas da redução do conteúdo de cimento ou da escolha de agregados reciclados, mas também da seleção criteriosa dos materiais complementares, em especial dos isolantes térmicos, que condicionam o desempenho energético global do edifício e o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida. (Município de Palmela, 2021) (Nudurabyconstreco, 2025) (Umbloco, s.d.) (FCT UNL, 2025)

A nível europeu, tem sido desenvolvido projetos de investigação e inovação com o objetivo de acelerar a adoção destas soluções. O “*eco-sandwich*”, financiado pela União Europeia, constitui uma solução inovadora no setor da construção, consistindo num painel de parede pré-fabricado e ventilado, conforme mostra a imagem abaixo, concebido com recurso a resíduos de construção e demolição (RCD) reciclados e a lã mineral. A sua produção assenta em tecnologia avançada e sustentável, orientada para a redução significativa do consumo de energia primária nos edifícios. Este conceito enquadra-se as prioridades estratégicas daecoinovação, destacando-se três dimensões essenciais. Em primeiro lugar, promove a valorização de resíduos, ao integrar materiais reciclados na produção de elementos construtivos, contribuindo para a diminuição da deposição em aterro e para a mitigação dos impactos ambientais associados. Em segundo lugar, o *eco-sandwich* reduz a dependência de recursos naturais não renováveis, através da substituição parcial destes por materiais provenientes de ciclos produtivos anteriores, alinhando-se com os princípios da economia circular. Por fim, assegura elevados níveis de eficiência energética, permitindo que os edifícios em que é aplicada alcancem requisitos compatíveis com os padrões de edifícios de energia quase nula ou casas passivas. (Miscovic, Pecur, & Milovanovic, s.d.)



Figura 26 - Eco-sandwich Project (Fonte: Google Imagens)

Do ponto de vista térmico, os ensaios realizados demonstram que o painel atinge uma transmissividade térmica inferior a  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , o que torna adequado para edifícios de consumo quase nulo e mesmo para padrões de casa passiva. A elevada inércia térmica do betão contribui para a atenuação das oscilações de temperatura no interior dos edifícios, reduzindo a necessidade de sistemas ativos de climatização. Este painel tem uma durabilidade superior a 100 anos, o baixo custo de manutenção e a produção industrializada que reduz desperdícios em obra constituem fatores determinantes para a sua viabilidade. Simultaneamente, a versatilidade estética permite a adaptação a diferentes contextos arquitetónicos e requisitos regionais, ampliando o seu potencial de aplicação. (Eco-Sandwich, s.d.)

Outra vertente relevante é a aplicação de painéis pré-fabricados em projetos de reabilitação energética, onde a sua leveza e modularidade permitem intervenções rápidas, pouco intrusivas e com reduzida necessidade de reforço das fundações existentes. Estudos experimentais à escala real mostram que painéis do tipo sandwich em betão reforçado com têxteis (TRC), aplicados sobre fachadas

existentes, podem melhorar de forma significativa o desempenho térmico e a estanquidade dos edifícios, ao mesmo tempo que acrescentam proteção à envolvente e prolongam a sua vida útil. No trabalho de Brameshuber e colaboradores, estes sistemas demonstraram ainda boa durabilidade, resistência à fissuração e elevada flexibilidade arquitetónica, tornando-se especialmente adequados para reabilitar edifícios em contextos urbanos densos. (Souza & Oliveira, 2024) (Umbloco, s.d.) (JNS Construções, 2025) (Porto, Rodolfo, 2023 )

Esta característica assume particular importância no contexto europeu, onde uma parte substancial do parque edificado apresenta fraco desempenho energético, ao mesmo tempo que está sujeita a restrições de natureza patrimonial e construtiva que limitam intervenções mais invasivas. Os painéis pré-fabricados ecoeficientes, sobretudo quando combinam reforço estrutural, isolamento térmico e acabamento exterior num único elemento, constituem assim uma solução integrada para reduzir consumos de energia e emissões associadas à operação dos edifícios, mantendo a integridade formal das fachadas e minimizando o tempo de obra. (Município de Palmela, 2021) (Iberdrola, s.d.) (Nudurabyconstreco, 2025) (Supercasa, 2025)

Quando se aborda a utilização de materiais sustentáveis na construção de fachadas, os painéis pré-fabricados em betão surgem como uma solução particularmente relevante. Estes elementos construtivos combinam elevada durabilidade com potencial de reutilização, bom desempenho energético e níveis adequados de conforto para os utilizadores, assumindo um papel de destaque na transição para edifícios mais eficientes e responsáveis do ponto de vista ambiental. Para além do contributo técnico, os painéis pré-fabricados evidenciam vantagens sociais — ao permitir processos de construção mais seguros e controlados — e benefícios económicos, associados à redução de prazos de obra, menor desperdício e custos de manutenção mais baixos. (Município de Palmela, 2021) (Iberdrola, s.d.) (Nudurabyconstreco, 2025) (Supercasa, 2025)

Contudo, a verdadeira questão reside em compreender de que forma é possível assegurar que este tipo de solução cumpre efetivamente os critérios de sustentabilidade. Tal verificação implica avaliar não apenas as características intrínsecas do material, mas também o seu desempenho ao longo de todo o ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas, passando pelos processos de fabrico e transporte, até à fase de utilização, manutenção, desativação e eventual reciclagem. Só através desta análise abrangente é possível demonstrar, de forma objetiva, que os painéis pré-fabricados em betão representam uma alternativa compatível com as atuais exigências ambientais e com os princípios da construção sustentável. (Município de Palmela, 2021) (Iberdrola, s.d.) (Nudurabyconstreco, 2025) (Supercasa, 2025)

O betão pré-fabricado destaca-se pela sua elevada eficiência ao longo de todo o ciclo de vida, desde a fase de fabrico até à instalação e posterior utilização do edifício. A produção em ambiente industrial controlado permite otimizar o uso de matérias-primas, reduzir consumos energéticos e minimizar a geração de resíduos,

apresentando claras vantagens face aos métodos tradicionais de construção “in situ”. Neste tipo de processo, cada elemento é moldado sob condições rigorosas de controlo de qualidade, garantindo maior precisão dimensional, melhor desempenho mecânico e menor variabilidade entre lotes, aspetos que contribuem para a durabilidade do sistema. (Município de Palmela, 2021) (Iberdrola, s.d.) (Nudurabyconstreco, 2025) (Supercasa, 2025)

Uma das características mais relevantes deste método reside na possibilidade de concentrar grande parte das operações fora do estaleiro. Diversos estudos indicam que até 90% das etapas construtivas podem ser realizadas em fábrica, o que não só diminui significativamente os impactos ambientais associados ao ruído, poeiras e circulação de maquinaria pesada, como também reduz a necessidade de transporte contínuo de materiais para a obra. Para além disso, esta industrialização do processo promove uma gestão mais eficiente dos recursos, permitindo recuperar, reutilizar ou reciclar excedentes de produção, algo muito mais difícil de alcançar em contexto de obra tradicional. (Município de Palmela, 2021) (Iberdrola, s.d.) (Nudurabyconstreco, 2025) (Supercasa, 2025)

Do ponto de vista operacional, a pré-fabricação traduz-se ainda numa clara aceleração dos prazos de execução. Como a produção dos painéis decorre em paralelo com os trabalhos de preparação do terreno e das fundações, os tempos de construção no local reduzem-se significativamente. Esta eficiência global não apenas melhora o desempenho ambiental do edifício, ao diminuir emissões associadas ao processo construtivo, como também contribui para uma maior previsibilidade dos custos e para a mitigação de impactos sociais nas zonas envolventes. (Município de Palmela, 2021) (Iberdrola, s.d.) (Nudurabyconstreco, 2025) (Supercasa, 2025)

Um dos instrumentos fundamentais para avaliar a sustentabilidade dos painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente é a Declaração Ambiental de Produto (DAP). Trata-se de um documento técnico normalizado, baseado na metodologia de Análise de Ciclo de Vida, que apresenta de forma quantificada os impactos ambientais do produto ao longo das diferentes fases do seu ciclo de vida, segundo regras definidas por normas como a EN 15804. A existência de uma DAP confere transparência ao processo de seleção de materiais, facilita a comparação entre produtos com funções semelhantes e valoriza o betão pré-fabricado junto de promotores, projetistas e utilizadores finais, sobretudo em projetos que ambicionam certificações ambientais. (Município de Palmela, 2021) (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.)

As DAP dos painéis de betão pré-fabricado podem ser consultadas em catálogos técnicos, bases de dados setoriais ou diretamente junto dos fabricantes, passando a constituir uma ferramenta de apoio à decisão de projeto. Para além dos impactos globais, estas declarações permitem identificar quais as fases do ciclo de vida mais críticas, orientando estratégias de otimização, como a redução do teor de clínquer, o aumento da incorporação de resíduos ou a melhoria da reciclabilidade no fim de vida. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.)

Entre as principais vantagens sustentáveis associadas aos painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente destaca-se, em primeiro lugar, a sua elevada durabilidade. Vários fabricantes indicam vidas úteis de projeto que podem ultrapassar os 100 anos, desde que sejam asseguradas condições adequadas de projeto, execução e manutenção, o que excede largamente os requisitos mínimos de muitas regulamentações. Esta longevidade, aliada à possibilidade de desmontagem e reutilização de determinados elementos de fachada em novas obras, contribui para uma abordagem mais próxima dos princípios da economia circular, reduzindo a necessidade de extração de novas matérias-primas. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Nudurabyconstreco, 2025)

Em segundo lugar, estes sistemas podem contribuir de forma relevante para a eficiência energética dos edifícios. A combinação de massa térmica do betão com camadas de isolamento integradas em painéis tipo “sandwich” permite reduzir oscilações de temperatura interior e diminuir a energia necessária para aquecimento e arrefecimento, quer em climas frios, quer em climas quentes. A facilidade de integração com soluções de fachada ventilada, sombreamentos e sistemas de ventilação mecânica controlada reforça ainda mais o potencial destes painéis no contexto de edifícios de baixo consumo de energia. (Município de Palmela, 2021) (Nudurabyconstreco, 2025) (Umbloco, s.d.)

Do ponto de vista dos utilizadores, os painéis pré-fabricados em betão apresentam adicionalmente vantagens em termos de conforto e qualidade de vida. A sua massa e configuração estratificada conferem um bom desempenho ao nível do isolamento acústico, reduzindo a transmissão de ruído exterior e melhorando a privacidade entre compartimentos. O processo construtivo mais rápido e menos invasivo, com menor geração de poeiras e ruído em obra, é particularmente benéfico em intervenções de reabilitação em zonas urbanas densas, onde a presença de moradores e vizinhança é um fator crítico. A resistência intrínseca do betão a fogo, intempéries e variações térmicas extremas constitui ainda um elemento adicional de segurança e robustez. (Município de Palmela, 2021) (Nudurabyconstreco, 2025) (Umbloco, s.d.)

A versatilidade estética é outro argumento relevante a favor destes sistemas. A tecnologia de pré-fabricação permite explorar uma grande diversidade de texturas, cores, geometrias e combinações de materiais, seja através de diferentes tipos de cofragens, tratamentos de superfície ou integração de agregados aparentes. Isto torna possível conciliar exigências de desempenho ambiental com a necessidade de integrar os edifícios em contextos urbanos e paisagísticos específicos, respeitando identidades regionais e linguagens arquitetónicas distintas. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Porto, Rodolfo, 2023 )

Em termos conceptuais, os painéis “sandwich” pré-fabricados em betão ecoeficiente podem ser vistos como uma solução que atua simultaneamente nas três dimensões clássicas da sustentabilidade. Na dimensão ambiental, destacam-se pela possibilidade de reduzir energia incorporada e emissões de gases com efeito de estufa através de formulações de baixo teor de clínquer, incorporação de resíduos e otimização do

ciclo de vida, devidamente documentada em DAP. Na dimensão económica, a pré-fabricação industrializada permite encurtar prazos de obra, reduzir desperdícios, estabilizar custos e, a médio e longo prazo, contribuir para menores custos de operação devido ao melhor desempenho energético e à elevada durabilidade. Na dimensão social, a melhoria do conforto térmico e acústico, a redução das perturbações em obra e o aumento da segurança e resiliência dos edifícios convergem para ambientes construídos mais saudáveis e confortáveis para os utilizadores. (Município de Palmela, 2021) (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Souza & Oliveira, 2024) (Umbloco, s.d.)

Em síntese, os painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente configuram uma das respostas mais promissoras aos desafios da construção sustentável contemporânea. Ao aliarem inovação de materiais com métodos construtivos industrializados, permitem reduzir a pegada ecológica da construção, melhorar a eficiência energética dos edifícios e elevar o nível de conforto oferecido aos utilizadores. A sua difusão em larga escala dependerá, contudo, da consolidação de normas técnicas específicas, da integração sistemática em esquemas de certificação ambiental e da existência de políticas públicas que incentivem a economia circular e a valorização de resíduos como recursos na indústria do betão. (Município de Palmela, 2021) (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Nudurabyconstreco, 2025)

#### **4.1.2 Sistema construtivo com Cortiça**

O sistema construtivo com cortiça distingue-se por recorrer a um material natural e renovável, obtido a partir da casca do sobreiro, cuja extração periódica não implica o abate da árvore e contribui para a manutenção dos montados. Ao longo do ciclo de vida, a cortiça apresenta, em geral, uma energia incorporada e emissões de CO<sub>2</sub> inferiores às de muitos isolamentos de origem fóssil, uma vez que o processamento industrial é relativamente simples e o material funciona como reservatório de carbono biogénico. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida mostram que os painéis e aglomerados de cortiça podem ter um balanço ambiental muito favorável, sobretudo quando é valorizada a origem renovável, a durabilidade e a possibilidade de reutilização ou reciclagem em novas aplicações construtivas ou industriais. (Demertzi et al., 2017) (Fuchsl, Rheude, & Roder, 2022) (Cosentino, Fernandes, & Mateus, 2024) (Silvestre et al., 2016)

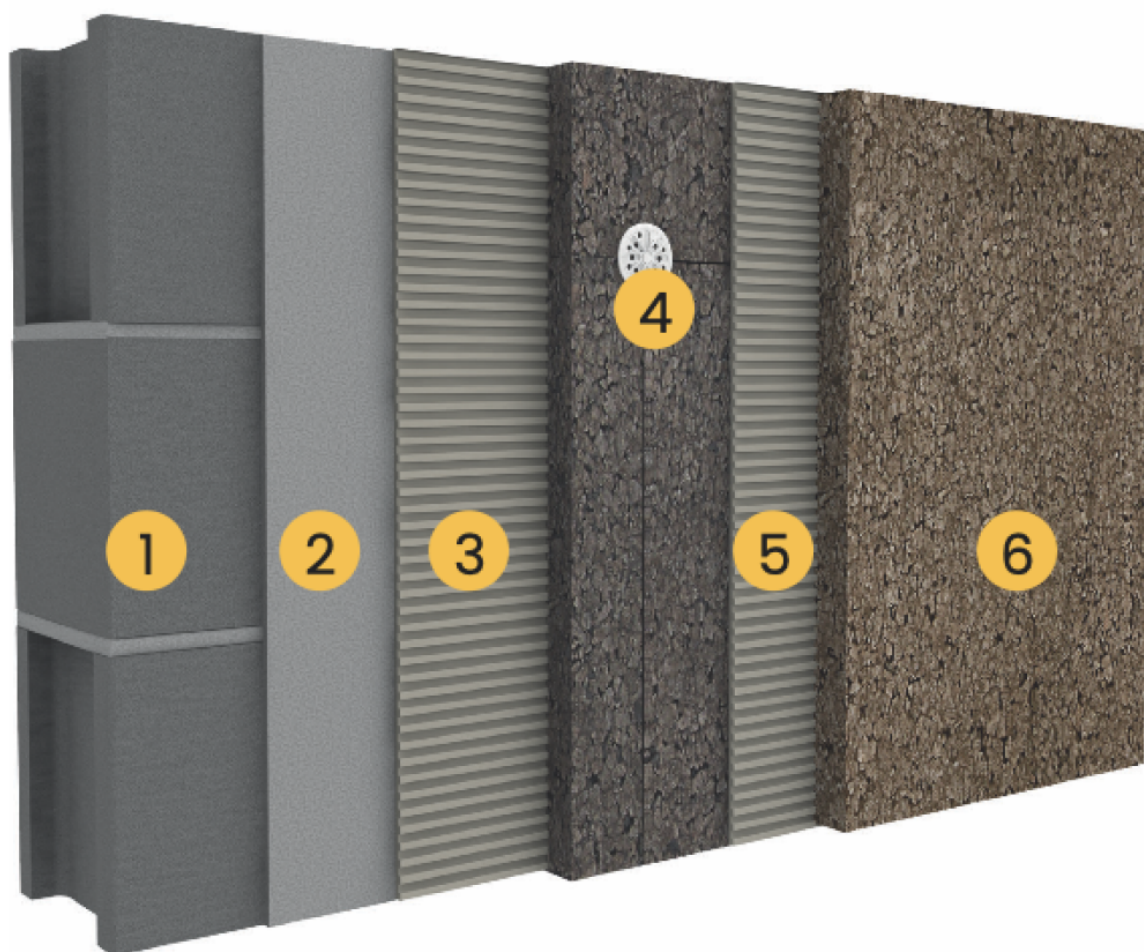


Figura 27 - Sistema de Fachadas com cortiça (SECIL, s.d.)

A imagem acima ilustrada, demonstra uma fachada com cortiça à vista. O número 1 corresponde à base de suporte da fachada, que pode ser betão armado, alvenaria, ou placas de OSB, caso o sistema construtivo seja em LSF. O número 2 é a base de reboco, que serve de aderência à base de suporte. O número 3 é a designado por cola para ter uma fixação do isolamento à base, contudo após essa camada de cola, também é fixada através de fixação mecânica. O número 4 é a placa de cortiça para executar o isolamento, e na zona 4 é onde é executada a fixação mecânica através de buchas e pregos. O número 5 é executada outra camada de cola para aderir a camada final. Por fim, o número 6, é a zona onde a cortiça fica exposta para dar o acabamento final. (SECIL, s.d.)

Sob a perspectiva da Avaliação do Ciclo de Vida, a cortiça apresenta uma energia incorporada relativamente baixa, em grande medida porque o processo industrial

assenta em operações de trituração, aglomeração e prensagem que exigem menos energia do que a produção de muitos polímeros sintéticos. Vários estudos de ACV mostram que os isolamentos em cortiça expandida ou aglomerada têm emissões de CO<sub>2</sub> menores ao longo do ciclo de vida quando comparados com alternativas baseadas em espumas derivadas do petróleo, sobretudo se forem considerados os benefícios associados ao carbono biogénico armazenado no material. Além disso, a possibilidade de reutilização em aplicações de menor exigência e a reciclagem em novos produtos contribuem para aproximar estes sistemas de modelos de economia circular, reduzindo a necessidade de matérias-primas virgens e a quantidade de resíduos enviados para aterro. (Demertzi et al., 2017) (Fuchsl, Rheude, & Roder, 2022) (Cosentino, Fernandes, & Mateus, 2024) (Silvestre et al., 2016)

No desempenho térmico, a cortiça destaca-se pela sua baixa condutividade térmica, resultante de uma microestrutura celular com grande quantidade de ar estabilizado no interior. Quando utilizada como camada contínua em fachadas ventiladas, coberturas ou pavimentos, contribui para reduzir significativamente as perdas de calor no Inverno e os ganhos térmicos no Verão, o que se traduz em menores necessidades de aquecimento e arrefecimento. Em sistemas construtivos bem detalhados, esta função isolante permite também minimizar pontes térmicas em zonas críticas, como ligações de lajes a fachadas ou encontros com caixilharias, melhorando o desempenho energético global do edifício e facilitando o cumprimento de requisitos regulamentares cada vez mais exigentes. (Cosentino, Fernandes, & Mateus, 2024) (Cordeiro, Matos, & Alves, 2020/2021) (Diasen, 2023)

Do ponto de vista acústico, os aglomerados de cortiça combinam uma densidade moderada com uma estrutura interna capaz de dissipar energia sonora, o que os torna eficazes tanto na absorção como na atenuação do ruído. Em pavimentos, a cortiça é frequentemente utilizada como camada resiliente sob revestimentos rígidos, reduzindo o ruído de percussão transmitido às frações inferiores e melhorando significativamente o conforto entre fogos. Em paredes e tetos, pode ser integrada em sistemas multicamada, funcionando como material de enchimento que melhora o isolamento a ruído aéreo, enquanto contribui para o controlo de reverberação em espaços interiores. Esta versatilidade, aliada ao bom desempenho térmico e ao perfil ambiental favorável em ACV, justifica a crescente adoção da cortiça em estratégias de construção sustentável, em particular em países como Portugal, onde existe uma forte base industrial e de conhecimento técnico associada a este recurso. (Cosentino, Fernandes, & Mateus, 2024) (Cordeiro, Matos, & Alves, 2020/2021) (Diasen, 2023) (Barrigón Morillas et al., 2020) (Echave Arquitetura, 2025)

A análise do sistema construtivo com cortiça evidencia que se trata de uma solução particularmente equilibrada do ponto de vista ambiental, conjugando origem renovável, baixa energia incorporada e potencial de reutilização e reciclagem ao longo do ciclo de vida. Em termos de desempenho, a combinação de boa capacidade de isolamento térmico com propriedades acústicas favoráveis permite melhorar simultaneamente a eficiência energética e o conforto sonoro dos edifícios. Estas características, associadas à forte ancoragem territorial da fileira da cortiça em

Portugal, reforçam a sua relevância como material estratégico na promoção de uma construção mais sustentável e alinhada com os objetivos de descarbonização do setor. (Cosentino, Fernandes, & Mateus, 2024) (Cordeiro, Matos, & Alves, 2020/2021) (Diasen, 2023) (Barrigón Morillas et al., 2020) (Echave Arquitetura, 2025)

Tabela 8 - Síntese do sistema construtivo com cortiça

<b>Aspeto</b>	<b>Caraterização do sistema construtivo com cortiça</b>
<b>Origem e ACV</b>	Material natural e renovável, obtido da casca do sobreiro, cuja extração não implica o abate da árvore e apoia a gestão do montado. Apresenta energia incorporada relativamente baixa e pode ter balanço de carbono favorável, armazenando carbono biogénico ao longo da sua vida útil.
<b>Produção e fim de vida</b>	Processos industriais baseados em trituração, aglomeração e prensagem, com menor consumo energético do que muitos isolantes sintéticos. Possibilidade de reutilização em aplicações de menor exigência e reciclagem em novos produtos, contribuindo para modelos de economia circular.
<b>Desempenho térmico</b>	Baixa condutividade térmica, resultante da estrutura celular fechada, tornando a cortiça um isolante eficaz em fachadas, coberturas e pavimentos. Contribui para reduzir perdas e ganhos de calor, diminuir consumos de aquecimento/arrefecimento e limitar pontes térmicas quando usada como camada contínua.
<b>Desempenho acústico</b>	Boa capacidade de absorção sonora e de redução de ruído de percussão, especialmente quando utilizada como camada resiliente em pavimentos ou como enchimento em paredes e tetos. Melhora o isolamento a ruído aéreo e o conforto acústico interior em sistemas multicamada.
<b>Relevância em Portugal</b>	Forte ligação ao contexto português, com cadeia de valor consolidada, conhecimento técnico acumulado e disponibilidade local do recurso, o que reforça o interesse da cortiça em estratégias de construção sustentável a nível nacional.

### **4.1.3 Sistema construtivo com Leca**

O sistema construtivo com Leca assenta na utilização de agregados leves de argila expandida em enchimentos de pavimentos, coberturas, betonilhas e blocos de alvenaria, tirando partido da combinação entre leveza, resistência mecânica e capacidade de isolamento. A argila é submetida a temperaturas elevadas em fornos rotativos, formando grânulos porosos com uma casca exterior resistente, o que permite obter um material com propriedades dimensionais estáveis, inerte e durável. Esta transformação industrial implica um consumo de energia relevante na fase de fabrico, mas o produto final apresenta uma vida útil longa e pode ser reutilizado ou reciclado como agregado após a demolição, o que melhora o seu desempenho quando analisado em termos de ciclo de vida. (Leca, 2023) (Portal da Construção Sustentável, s.d.) (Argex, 2019) (LECA, 2021)



Figura 28 - Pavimento executado com Leca (Fonte: Google imagens)

Do ponto de vista da Avaliação do Ciclo de Vida, a produção de argila expandida concentra a maior parte dos impactos ambientais, sobretudo devido ao consumo energético do forno de cozedura. No entanto, a elevada durabilidade, a resistência a agentes químicos e biológicos e a possibilidade de reutilização como enchimento ou agregado em novas aplicações contribuem para diluir estes impactos ao longo de um período de utilização prolongado. Adicionalmente, o facto de se tratar de um material estável, não combustível e sem emissões de substâncias nocivas favorece a

qualidade do ambiente interior e reduz a necessidade de substituições frequentes, o que se traduz numa diminuição de consumos de recursos ao longo do ciclo de vida do edifício. (Fuchsl, Rheude, & Roder, 2022) (Argex, 2019) (LECA, 2021) (Leca, 2024) (Pargana, 2012)

No desempenho térmico, a Leca destaca-se pela sua estrutura interna repleta de poros de ar, que confere ao material uma condutividade térmica inferior à dos agregados tradicionais de elevada densidade. Quando utilizada em enchimentos de coberturas, pisos térreos ou lajes intermédias, contribui para reduzir as trocas de calor com o exterior e para melhorar o conforto térmico, tanto em situações de clima frio como de clima quente. Em betões leves ou betonilhas pré-misturadas, os agregados de argila expandida permitem obter camadas com melhor desempenho isolante do que betões correntes, reduzindo as necessidades de aquecimento e arrefecimento e ajudando a cumprir requisitos de eficiência energética cada vez mais exigentes. (Fuchsl, Rheude, & Roder, 2022) (Argex, 2019) (LECA, 2021) (Leca, 2024) (Pargana, 2012)

Tabela 9 - Síntese do sistema construtivo com cortiça

Aspeto	Caracterização do sistema construtivo com Leca
Origem e ACV	Agregado leve obtido por cozedura de argila em fornos rotativos, formando grânulos porosos e resistentes. A fase de fabrico concentra parte relevante dos impactos devido ao consumo energético, mas a elevada durabilidade e a possibilidade de reutilização ou reciclagem como agregado melhoram o desempenho em ACV ao longo do tempo.
Produção e fim de vida	Material inerte, estável e não combustível, com baixa necessidade de manutenção. Após a demolição, pode ser separado e reutilizado em enchimentos ou integrado em novos betões leves, reduzindo a extração de novos inertes e a deposição em aterro.
Desempenho térmico	Estrutura interna com numerosos poros de ar, resultando em condutividade térmica inferior à de agregados tradicionais de elevada densidade. Em enchimentos de coberturas, lajes e pavimentos, contribui para reduzir as trocas de calor e melhorar o conforto térmico, especialmente quando integrada em betões ou betonilhas leves.
Desempenho acústico	Bom comportamento como camada de enchimento em pavimentos e elementos horizontais, ajudando a atenuar ruído aéreo e de percussão quando usada em sistemas multicamada com revestimentos adequados. Em blocos e betões leves, associa redução de peso a um desempenho acústico melhorado face a soluções correntes.

Aplicações típicas	Enchimentos leves de coberturas e pavimentos, betonilhas e betões leves, blocos de alvenaria e correções de regularização em obra nova e reabilitação, com vantagens em obras onde a redução de peso próprio e o aumento do desempenho térmico e acústico são prioritários.
--------------------	---

Relativamente ao comportamento acústico, a argila expandida Leca funciona como um isolamento eficaz, sobretudo em pavimentos e elementos horizontais, contribuindo para atenuar tanto o ruído aéreo como o ruído de percussão entre pisos. A combinação entre leveza e estrutura porosa permite dissipar parte da energia sonora, melhorando o conforto acústico interior quando integrada em sistemas multicamada com revestimentos adequados. Em algumas soluções, os agregados são incorporados em blocos ou betões leves que, além de reduzirem o peso próprio das estruturas, conferem às paredes e lajes um melhor desempenho térmico e acústico simultâneo, reforçando o interesse da Leca em estratégias de construção e reabilitação sustentáveis. (Fuchsl, Rheude, & Roder, 2022) (Argex, 2019) (LECA, 2021) (Leca, 2025) (Pargana, 2012)

A síntese do sistema construtivo com Leca mostra que se trata de uma solução interessante quando se pretende conciliar redução de peso próprio com melhoria do desempenho térmico e acústico dos elementos onde é aplicada. Embora o processo de cozedura da argila concentre parte dos impactos ambientais na fase de fabrico, a durabilidade, a estabilidade e a possibilidade de reutilização dos agregados permitem diluir esses impactos ao longo de uma vida útil prolongada. Em enchimentos de pavimentos, coberturas e betões leves, a Leca contribui simultaneamente para o conforto térmico e para a atenuação do ruído entre pisos, o que reforça o seu papel em estratégias de construção e reabilitação mais sustentáveis. (Leca, 2025) (Argex, 2019) (LECA Portugal S.A., 2002) (Leca, 2024) (APCMC, 2018)

#### **4.1.4 Sistemas construtivos pré-fabricados sustentáveis: Thermochip, multicover, e M-tek**

Os sistemas construtivos pré-fabricados Thermochip, Multicover e M-Tek representam soluções industriais que combinam materiais de base madeira ou derivados com núcleos isolantes, destinando-se a aplicações em coberturas, paredes e acabamentos, com destaque para o desempenho térmico e acústico. Estes painéis são fabricados em ambiente controlado, permitindo otimizar o uso de matérias-primas e reduzir desperdícios em obra, o que contribui para uma construção mais eficiente e com menor pegada ambiental. A análise que se segue foca o contributo destes sistemas para a sustentabilidade através da Avaliação do Ciclo de Vida, bem como o seu comportamento térmico e acústico em aplicações reais. (Thermochip, s.d.) (M-TEK, s.d.) (Obras360, s.d.) (Thermochip, 2018) (Obras360, s.d.)

#### **4.1.4.1 Termochip**

O painel Termochip é um sistema sanduíche pré-fabricado constituído por faces exteriores em aglomerado hidrófugo, madeira maciça de abeto ou OSB3, com núcleo em poliestireno extrudido (XPS) de alta densidade, projetado especificamente para coberturas inclinadas e elementos horizontais sujeitos a cargas elevadas. A composição permite uma montagem rápida em obra seca, com fixação mecânica direta, eliminando a necessidade de estruturas secundárias complexas e reduzindo significativamente os tempos de execução. Variantes como o TKH Heraklith incorporam aparas de madeira e magnésia no núcleo, conferindo propriedades acústicas adicionais. (Thermochip, s.d.) (Obras360, s.d.) (Obras360, s.d.) (Thermochip, s.d.)

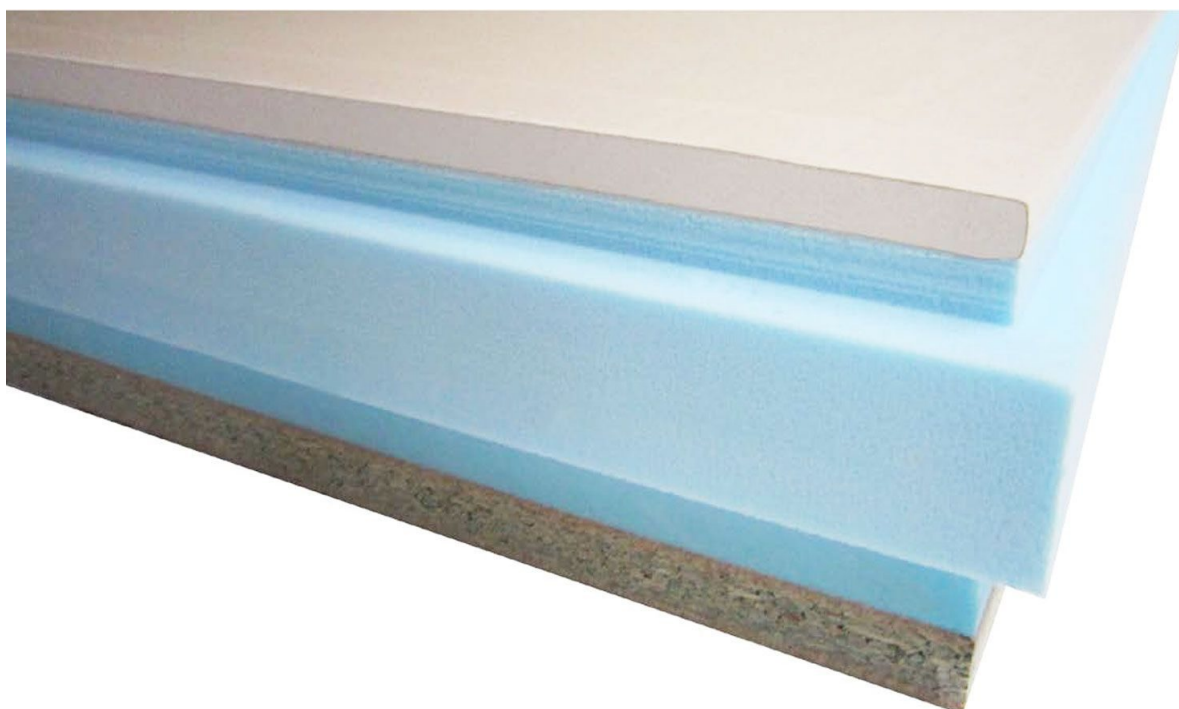


Figura 29 - Painel Termochip com placa de gesso cartonado (Obras360, s.d.)

Na perspectiva da Avaliação do Ciclo de Vida, o Thermochip apresenta um balanço ambiental misto: o núcleo XPS implica impactos ambientais associados à produção de derivados do petróleo, mas a prefabricação reduz consumos energéticos em obra, emissões por transporte de materiais soltos e desperdícios de corte. Estudos comparativos indicam que estes painéis podem apresentar energia incorporada inferior a sistemas tradicionais de cobertura com telhas e suportes múltiplos, especialmente quando se considera a fase de construção e a durabilidade superior a 50 anos. A versão TKH melhora ainda mais o perfil sustentável ao incorporar materiais renováveis (madeira) e reduzir a dependência de polímeros fósseis. No fim de vida, os componentes podem ser separados para reciclagem (madeira para painéis, XPS para granulados). (Thermochip, s.d.) (Thermochip, 2018) (Obras360, s.d.)

Térmicamente, o Thermochip destaca-se pela elevada resistência térmica do núcleo XPS (valores  $U$  inferiores a  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  em espessuras comerciais), combinada com a estabilidade dimensional das faces em madeira que eliminam deformações e pontes térmicas lineares. Esta configuração garante um isolamento contínuo que reduz significativamente as necessidades de aquecimento e arrefecimento, sendo particularmente eficaz em coberturas inclinadas expostas a variações climáticas. A baixa absorção de humidade do XPS mantém o desempenho ao longo do tempo, mesmo em condições húmidas. (Obras360, s.d.) (Obras360, s.d.) (Thermochip, s.d.)

Acusticamente, a versão TKH Heraklith oferece excelente absorção sonora (coeficientes  $\alpha_w$  até 0,80) e redução de ruído de percussão, adequada para coberturas sobre espaços habitados ou escritórios. A massa elevada das faces e a estrutura porosa do núcleo dissipam energia sonora, controlando tanto o ruído aéreo como a transmissão de impactos de chuva ou granizo. Em aplicações residenciais, estes painéis contribuem para cumprir os requisitos acústicos do REH (Regulamento de Desempenho Acústico dos Edifícios). (Obras360, s.d.) (Thermochip, s.d.)

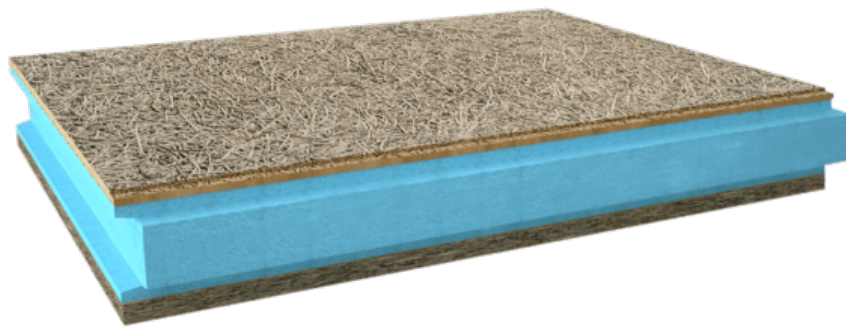


Figura 30 - Placa TKH (Thermochip, s.d.)

#### 4.1.4.2 Multicover

O Multicover refere-se a painéis multicamada compostos por suportes em placas de gesso laminado ou fibrocimento, com núcleo isolante em lã de rocha, lã de vidro ou fibras minerais de alta densidade, aplicados em paredes divisórias, tetos falsos e elementos de separação entre frações. Estes sistemas são particularmente indicados para reabilitação acústica e térmica de edifícios existentes, permitindo intervenções rápidas sem demolições extensas. A composição modular facilita a instalação em qualquer orientação e adaptação a geometrias irregulares. (Danosa, s.d.) (Bricobutikk, s.d.) (Multipanel, s.d.)

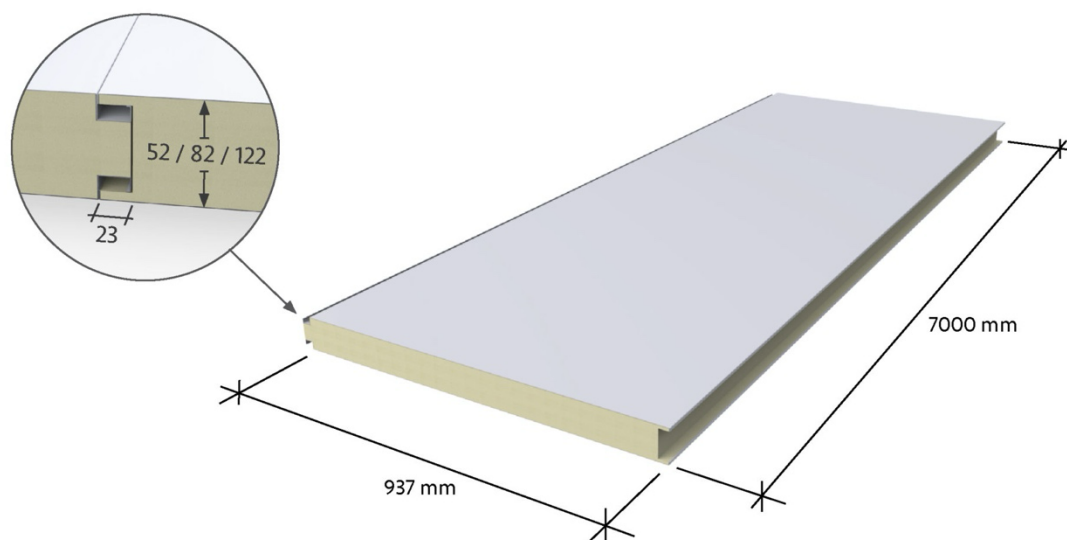


Figura 31 - Painel multicover (Multipanel, s.d.)

Em termos de ACV, os painéis Multicover beneficiam da durabilidade dos materiais minerais (vida útil superior a 50 anos) e da reciclabilidade parcial dos componentes: lã mineral pode ser reaproveitada em novos isolantes, placas de gesso recicladas em novo gesso e fibras em agregados. Embora a produção de lã de rocha implique consumo energético elevado devido aos fornos de fusão, a longevidade e a redução de consumos energéticos na fase de uso do edifício compensam estes impactos. Sistemas certificados com EPD (Environmental Product Declaration) mostram impactos globais inferiores a soluções tradicionais em alvenaria maciça para separações interiores. (Danosa, s.d.) (Bricobutikk, s.d.) (Multipanel, s.d.)

O desempenho térmico é adequado para elementos interiores não expostos diretamente ao exterior, com resistências térmicas que permitem regularizar temperaturas em compartimentos e reduzir consumos em sistemas de climatização coletiva. A lã mineral apresenta baixa condutividade térmica e capacidade de difusão

de vapor, evitando condensações intersticiais. Em tetos falsos, contribui para limitar ganhos térmicos por radiação descendente. (Danosa, s.d.)

O isolamento acústico constitui o principal trunfo destes sistemas, com índices de redução sonora  $R_w$  superiores a 50 dB em configurações duplas e controlo de reverberação em espaços de serviços. A combinação de massa elevada das placas com o núcleo fibroso absorvente permite atenuar ruído aéreo e de percussão, sendo particularmente eficaz em edifícios multifamiliares onde o conforto acústico entre frações é crítico. Estes painéis cumprem os requisitos mais exigentes do REH para separações entre unidades habitacionais. (Danosa, s.d.) (Bricobutikk, s.d.) (Multipanel, s.d.)

#### **4.1.4.3 M-tek**

O M-Tek é um painel compacto de fibrocimento colorido na massa, com espessura reduzida (8-12 mm) e elevada resistência mecânica, utilizado como revestimento exterior em sistemas de fachadas ventiladas. A composição em fibras de celulose, cimento e pigmentos minerais confere ao material durável excepcional, baixa absorção de água e resistência a agentes biológicos e UV, eliminando necessidade de pinturas de manutenção. (EM Living, s.d.)



Figura 32 - Revestimento de fachada com painel M-Tek (fonte: Google imagens)

Na ACV, o M-Tek destaca-se pela longevidade superior a 50 anos e ausência de manutenção programada, diluindo os impactos da produção (cimento + fibras) ao longo de um ciclo de vida prolongado. O fibrocimento é reciclável como material inerte em agregados ou novo fibrocimento, e o sistema de fachada ventilada reduz consumos energéticos do edifício em 15-25% devido à renovação natural de ar. Estudos de ciclo de vida mostram que fachadas ventiladas em fibrocimento apresentam menor impacto global que fachadas ETICS tradicionais após 30 anos de uso. (EM Living, s.d.)

Embora não possua propriedades isolantes intrínsecas, o M-Tek contribui decisivamente para o desempenho térmico do sistema de fachada ventilada, criando uma câmara de ar que limita ganhos solares no Verão (redução até 30% da carga térmica) e favorece a ventilação natural que estabiliza temperaturas no Inverno. A

baixa condutividade e emissividade superficial minimizam trocas radiantes. (EM Living, s.d.)

Acusticamente, atua como fechamento exterior rígido e massivo, melhorando a atenuação sonora do conjunto quando associado a isolantes no interior da fachada (ganhos de 5-10 dB em  $R_w$ ). A rigidez do painel reduz vibrações induzidas pelo vento e chuva, contribuindo para o conforto acústico exterior das fachadas. (EM Living, s.d.)

#### **4.1.5 Sistema construtivo MultiZero**

O sistema construtivo MultiZero é um painel sanduíche pré-fabricado multicamada, composto por placas de isolamento térmico (XPS), placas acústicas especializadas, lã mineral, placas cimentícias FBR-ECO e acabamento em gesso laminado, projetado para paredes exteriores e interiores com elevado desempenho energético e acústico. Esta solução industrial permite a construção rápida de envoltentes completas em fábrica, com montagem em obra seca, reduzindo tempos de execução, desperdícios e consumos energéticos associados ao canteiro de obras. A composição otimizada integra materiais com funções complementares, garantindo simultaneamente isolamento térmico, controlo acústico, estabilidade dimensional e resistência ao fogo, tornando-o adequado para edifícios residenciais e de serviços com certificações Passivhaus ou equivalentes. (Multipanel, 2019) (Multipanel, 2024) (Associação Passivhaus Portugal, 2025)

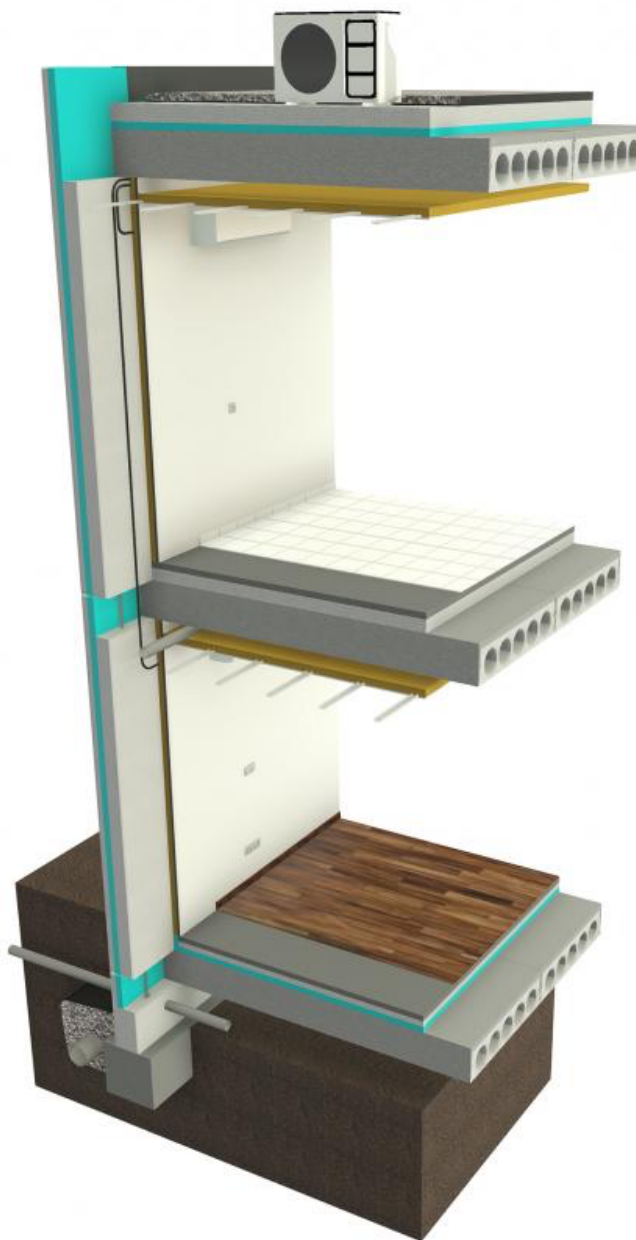


Figura 33 - Sistema construtivo MultiZero (Fonte: Google Imagens)

Na perspectiva da Avaliação do Ciclo de Vida, o MultiZero beneficia da pré-fabricação que minimiza emissões em obra e da seleção de materiais com declarações ambientais verificadas (EPDs para XPS, lã mineral e placas cimentícias). Embora o núcleo isolante em XPS implique impactos fósseis na produção, a transmitância térmica extremamente baixa ( $U \approx 0,174 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) reduz drasticamente os consumos energéticos na fase de uso, que representa 80-90% do ciclo de vida de um edifício.

As placas FBR-ECO de baixa emissão de CO<sub>2</sub> e a lã mineral reciclável contribuem para um balanço ambiental favorável, especialmente em edifícios NZEB (*Nearly Zero Energy Building*), onde os benefícios em operação superam largamente os impactos de fabrico. No fim de vida, os componentes são separáveis para reciclagem seletiva. (Multipanel, 2019) (Multipanel, 2024) (Associação Passivhaus Portugal, 2025)

Termicamente, o sistema destaca-se pela combinação de isolamento contínuo em XPS com a inércia térmica moderada das placas cimentícias e gesso, criando uma barreira eficaz contra perdas de calor no Inverno e ganhos solares no Verão. A ausência de pontes térmicas, graças à execução industrial precisa, permite cumprir requisitos Passivhaus ( $U < 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  em configurações otimizadas) e reduz consumos de aquecimento/arrefecimento em 70-80% face a alvenarias tradicionais. A permeabilidade controlada à vapor evita condensações intersticiais, garantindo durabilidade do isolamento ao longo de décadas. (Multipanel, 2019) (Multipanel, 2024) (Associação Passivhaus Portugal, 2025)

Do ponto de vista acústico, as placas especializadas e a lã mineral conferem ao MultiZero índices de redução sonora  $R_w$  superiores a 55 dB, com excelente controlo de ruído de percussão ( $\Delta L_w > 30 \text{ dB}$ ), adequados para edifícios multifamiliares em zonas urbanas. A massa elevada das camadas intermédias e a estrutura porosa do núcleo absorvem e dissipam energia sonora, melhorando o conforto entre frações e cumprindo os limites mais exigentes do REH. Esta performance é particularmente relevante em fachadas expostas a tráfego ou em separações interiores de serviços. (Multipanel, 2019) (Multipanel, 2024) (Associação Passivhaus Portugal, 2025)

#### **4.1.6 Sistema construtivo ICF**

O sistema construtivo ICF (*Insulated Concrete Forms*) baseia-se em blocos modulares de poliestireno expandido (EPS) de alta densidade travados, que funcionam simultaneamente como cofragem durável e isolamento térmico contínuo, preenchidos in situ com betão projetado ou vibrado. Esta tecnologia permite a construção rápida de paredes monólito com elevada massa térmica e isolamento exterior, eliminando pontes térmicas e reduzindo significativamente os tempos de execução face a sistemas tradicionais de alvenaria. Adequado para edifícios residenciais de vários pisos, o ICF combina a robustez estrutural do betão com o isolamento do EPS, sendo particularmente vantajoso em climas com grandes amplitudes térmicas e zonas sísmicas. (Termobox, n.d.) (Poliespano, n.d.)

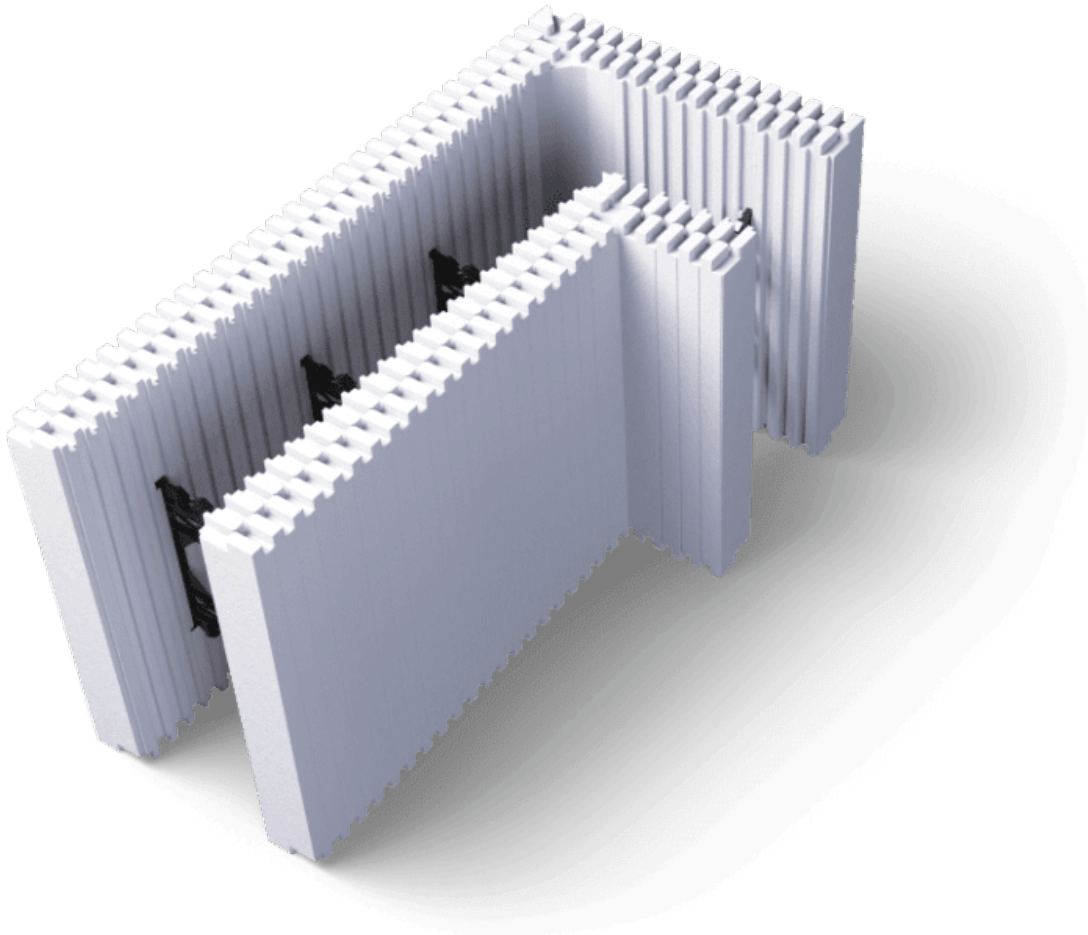


Figura 34 - Sistema construtivo ICF (Termobox, n.d.)

Na perspetiva da Avaliação do Ciclo de Vida, o ICF apresenta um balanço ambiental favorável quando analisado ao longo do ciclo completo: embora a produção de EPS implique impactos fósseis e o betão convencional tenha elevada pegada de CO<sub>2</sub>, o isolamento contínuo reduz drasticamente os consumos energéticos na fase de uso (80-90% do ciclo de vida), podendo compensar os impactos iniciais em 10-15 anos. Estudos comparativos demonstram emissões globais inferiores a paredes de betão + ETICS tradicionais, especialmente em edifícios NZEB, devido à durabilidade superior (vida útil >80 anos) e à redução de materiais auxiliares (rebocos, isolantes soltos). No fim de vida, o EPS é reciclável como granulados e o betão esmagado como agregado. (Termobox, n.d.) (Poliespanso, n.d.)

Termicamente, o ICF destaca-se pela combinação única de isolamento exterior em EPS ( $U < 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  em espessuras comerciais) com a inércia térmica elevada do betão interior, estabilizando temperaturas e reduzindo picos de aquecimento/arrefecimento. A ausência total de pontes térmicas lineares e a execução industrial dos blocos garantem um envelope hermético que minimiza infiltrações de ar e cumpre requisitos Passivhaus. Esta configuração é particularmente eficaz em regiões com invernos rigorosos ou verões quentes,

reduzindo consumos energéticos em 50-70% face a alvenarias convencionais. (Termobox, n.d.) (Poliespanso, n.d.)

Do ponto de vista acústico, a dupla massa betão + EPS proporciona excelente isolamento a ruído aéreo ( $R_w$  52-62 dB conforme espessura) e redução de ruído de percussão ( $\Delta L_w > 35$  dB), superior a muitas soluções leves. A rigidez do betão controla vibrações estruturais enquanto o EPS absorve impactos e dissipa energia sonora, tornando o ICF ideal para edifícios multifamiliares em zonas urbanas ruidosas. Cumpre os requisitos mais exigentes do REH para fachadas e separações entre frações. (Termobox, n.d.) (Poliespanso, n.d.)

#### **4.1.7 Sistema construtivo em “*Light Steel Framing*”**

O sistema construtivo “*Light Steel Framing*” designa um método de construção baseado numa estrutura leve constituída por perfis de aço galvanizado, produzidos através de enformagem a frio. Este processo de conformação permite obter elementos com espessuras reduzidas, o que lhes confere simultaneamente baixo peso, elevada precisão dimensional e boa capacidade resistente. Trata-se, por isso, de um sistema caracterizado pela combinação entre leveza estrutural, rápida montagem e elevado rigor industrial, tornando-o especialmente adequado para construções eficiente e de desempenho controlado. (Ferreira, 2014)

Os perfis metálicos utilizados no LSF desempenham a função de esqueleto estrutural, ao qual são associados vários materiais de revestimento e isolamento, resultante num sistema construtivo modular, versátil e altamente racionalizado. A galvanização do aço assegura proteção contra a corrosão, aumentando a durabilidade do conjunto e reduzindo a necessidade de manutenção ao longo da vida útil do edifício. (Ferreira, 2014)

Enquanto solução técnica, o LSF procura aliar desempenho estrutural, sustentabilidade e eficiência construtiva, respondendo aos atuais desafios do setor da construção, nomeadamente a redução de resíduos, a rapidez de execução e o controlo rigoroso da qualidade. Por estas características, o LSF tem vindo assumir um papel crescente na construção contemporânea, sendo considerado uma alternativa competitiva aos sistemas tradicionais. (Ferreira, 2014)

##### **4.1.7.1 Métodos de construção em “*Light Steel Framing*”**

Os elementos fundamentais do sistema construtivo em LSF são perfis estruturais de aço galvanizado enformados a frio, produzidos industrialmente com elevada precisão dimensional. Estes perfis, resultantes de processos de conformação mecânica a temperatura ambiente, apresentam reduzida espessura, baixo peso próprio e elevada capacidade resistente, características que os tornam particularmente adequado para soluções construtivas leves, modulares e de montagem rápida. (Ferreira, 2014)

A pré-fabricação dos componentes estruturais permite a adoção de três métodos distintos de execução em obra, que variam em grau de industrialização, rapidez e integração de componentes: (Ferreira, 2014)

1. Construção por elementos (“*stick-build*”)

Neste método, os perfis chegam ao estaleiro em barras individuais já cortadas e perfuradas, sendo montados diretamente no local da obra. Trata-se de um sistema mais flexível, adequado a edifícios com maior complexidade geométrica ou alterações frequentes em fase de obra. Contudo, exige mão de obra especializada e maior tempo de execução comparativamente aos restantes métodos; (Ferreira, 2014)

2. Construção por painéis pré-fabricados

Aqui, paredes, lajes e coberturas são montadas em fábrica sob controlo rigoroso de qualidade, integrando já parte dos revestimentos, isolamento térmico e aberturas. Os painéis chegam ao local prontos para montagem, permitindo reduzir significativamente o tempo de obra, os erros de execução e os desperdícios de materiais; (Ferreira, 2014)

3. Construção modular

Representa o nível mais elevado de industrialização. Os métodos tridimensionais são fabricados e completamente equipados em ambiente industrial – incluindo revestimentos, instalações elétricas e hidráulicas, carpintarias e, por vezes, acabamentos finais. Em obra, procede-se apenas ao posicionamento e ligação dos módulos. Este método maximiza a eficiência produtiva e é especialmente benéfico em obras urgentes, locais remotos ou projetos com forte necessidade de controlo de qualidade e prazos. (Ferreira, 2014)

Na figura abaixo apresentam-se de forma esquemática os três métodos construtivos associados ao sistema LSF – construção por elementos (“*stick-build*”), construção por painéis pré-fabricados e construção modular – permitindo uma compreensão visual clara das diferenças entre os níveis de pré-fabricação e montagem envolvidos em cada solução: (Ferreira, 2014)

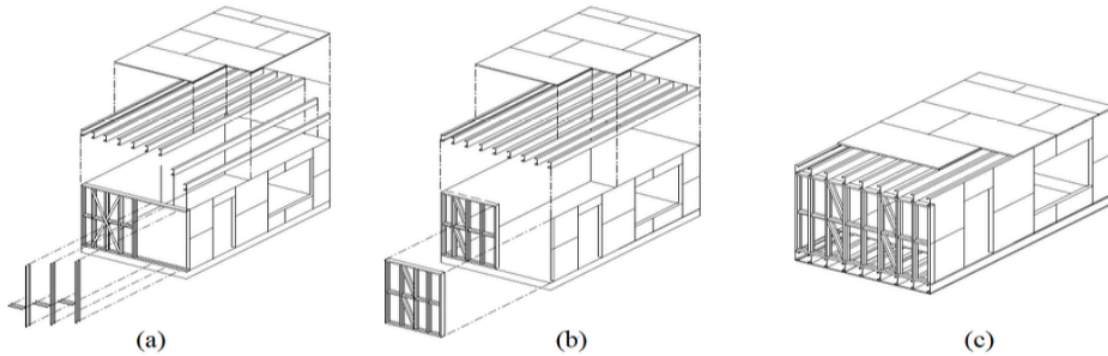


Figura 35 - Métodos construtivos em LSF: (a) construção por perfis "stick-build"; (b) construção por painéis; (c) construção modular

A construção por perfis, designada de “stick-build”, consiste na montagem dos elementos estruturais diretamente no local da obra. Neste método, os perfis metálicos enformados a frio são cortados à medida e posteriormente unidos através de sistemas de fixação específicos, formando um esqueleto estrutural que servirá de suporte ao revestimento interiores e exteriores. Trata-se de um processo que privilegia a flexibilidade construtiva e a adaptação às condições da obra, embora exija maior mão de obra no local. (Ferreira, 2014)

A construção por perfis pode ser subdividida em dois processos distintos, ambos amplamente utilizados no âmbito do LSF: (Ferreira, 2014)

- *Platform framing*: No sistema *platform framing*, cada piso e respetivas paredes são construídos de forma sequencial e independente, o que significa que as paredes não constituem elementos estruturais contínuos ao longo de vários níveis. Após concluído um piso, este passa a funcionar como plataforma de trabalho para a execução do piso seguinte, conferindo maior segurança e facilidade de montagem. Este é, de facto, o método mais comum no LSF, devido à sua eficiência e racionalidade construtiva. Neste sistema, as cargas verticais provenientes das paredes dos pisos superiores são transmitidas às paredes inferiores através das vigas de piso, garantindo uma distribuição uniforme das solicitações estruturais;
- *Balloon Framing*: No método *balloon framing*, os elementos verticais de suporte — os montantes — estendem-se ao longo de vários pisos, podendo abranger dois níveis completos. A estrutura do piso é, neste caso, fixada lateralmente aos montantes contínuos. Apesar de apresentar a vantagem de permitir que as cargas dos pisos superiores sejam transferidas diretamente para os montantes contínuos das paredes inferiores, este método implica maior complexidade na fase de execução, uma vez que os painéis de parede têm de ser provisoriamente escorados até que os pavimentos sejam instalados. Esta característica torna o

processo mais exigente em termos de planeamento e de equipamento de apoio, quando comparado com o *platform framing*.

#### 4.1.7.2 Construção por painéis

A construção por painéis no sistema de LSF baseia-se na pré-fabricação, em ambiente controlado, de elementos bidimensionais destinados a constituir paredes, pavimentos e treliças de cobertura. Cada painel é produzido a partir de perfis metálicos enformador a frio, organizados segundo a função estrutural pretendida, garantindo elevados níveis de precisão dimensional e de controlo de qualidade.

Uma das principais vantagens deste método reside no facto de os painéis poderem ser entregues em obra parcial ou totalmente equipado, integrando não apenas os perfis metálicos, mas também camadas de isolamento térmico e acústico, membranas de estanquidade, caixas de instalação e, em alguns casos, até os revestimentos interiores e exteriores. Esta incorporação em fábrica reduz significativamente o tempo de execução em obra, minimiza erros de montagem e aumenta a eficiência global do processo construtivo.

A instalação dos painéis no local é realizada através de técnicas de montagem convencionais, recorrendo predominantemente a parafusos auto-perfurantes e outros elementos de fixação específicos para o aço enformado a frio, garantindo ligações seguras, rígidas e de elevado desempenho mecânico. O processo de montagem é faseado e rápido, permitindo a estabilização do edifício em curtos períodos e reduzindo a necessidade de mão de obra especializada no local.

Este método apresenta ainda vantagens adicionais ao nível da sustentabilidade, dado que a pré-fabricação diminui a produção de resíduos em obra, melhora a segurança dos trabalhadores, potencia a reutilização e reciclagem dos materiais metálicos, e reduz o impacto ambiental associado ao transporte e ao tempo de construção. (Ferreira, 2014)

Entre as principais vantagens da construção em painéis destaca-se a rapidez de execução em obra, dado que os elementos chegam ao estaleiro já pré-fabricados e frequentemente pré-acondicionados com isolamento e revestimentos. Esta característica permite uma montagem muito mais célere do que nos sistemas construídos integralmente no local. (Ferreira, 2014)

Outra vantagem relevante é o melhor controlo de qualidade, assegurado pelo facto de os perfis e os painéis serem produzidos em ambiente fabril, onde as condições são estáveis e supervisionadas. Isto reduz significativamente o risco de erros dimensionais, defeitos de montagem ou variações na qualidade dos materiais, o que se traduz num desempenho estrutural mais uniforme e previsível. (Ferreira, 2014)

Adicionalmente, este método contribui para uma redução dos custos em obra, não só pela menor necessidade de mão de obra especializada no local, mas também pela diminuição de desperdícios, pela redução dos tempos de montagem e pela minimização de imprevistos associados às condições climáticas. (Ferreira, 2014)

Quando comparada com a construção por perfis (*"stick-build"*), a construção por painéis revela-se globalmente mais eficiente, uma vez que a fase crítica de fabrico ocorre em fábrica, com processos mecanizados e controlados, enquanto no método por perfis grande parte das operações depende do ambiente de obra e das suas limitações logísticas. (Ferreira, 2014)

#### **4.1.7.3 Construção modular**

A construção modular caracteriza-se pela execução de módulos tridimensionais totalmente pré-fabricados em ambiente fabril, que posteriormente são transportados para o local de implantação. Cada módulo constitui uma unidade estrutural autónoma, produzida a partir de painéis bidimensionais que são montados em configuração de "caixa", integrando já elementos essenciais como revestimentos, isolamento térmico e, em muitos casos, instalações técnicas. A grande flexibilidade deste sistema resulta da possibilidade de combinar, agregar ou remover módulos de forma relativamente simples, permitindo uma elevada personalização do edifício, bem como futuras expansões ou adaptações funcionais. (Ferreira, 2014)

Contudo, apesar das vantagens em termos de rapidez de execução, controlo de qualidade e redução de resíduos em obra, a construção modular apresenta limitações relevantes associadas ao fabrico e ao transporte. A produção requer linhas industriais equipadas para manusear volumes consideráveis, e o transporte dos módulos implica frequentemente veículos de dimensões especiais, sujeitos a restrições logísticas e regulamentares. Ainda assim, este sistema revela elevada eficiência, sobretudo quando se considera a ampla variedade de configurações que podem ser obtidas a partir de uma unidade modular básica, tornando-o particularmente adequado para edifícios residências, escolares, de serviços ou soluções temporárias e de resposta rápida. (Ferreira, 2014)

A figura abaixo ilustra um projeto em fase de estudo com 32 m<sup>2</sup>, executado em fábrica e transportado para obra. O projeto contempla um estúdio, onde existe uma casa de banho com 5,60 m<sup>2</sup>, e a cozinha e o quarto uma área de 26,42 m<sup>2</sup>. O projeto é um modelo habitacional, para 1 pessoa. (fonte: autor)

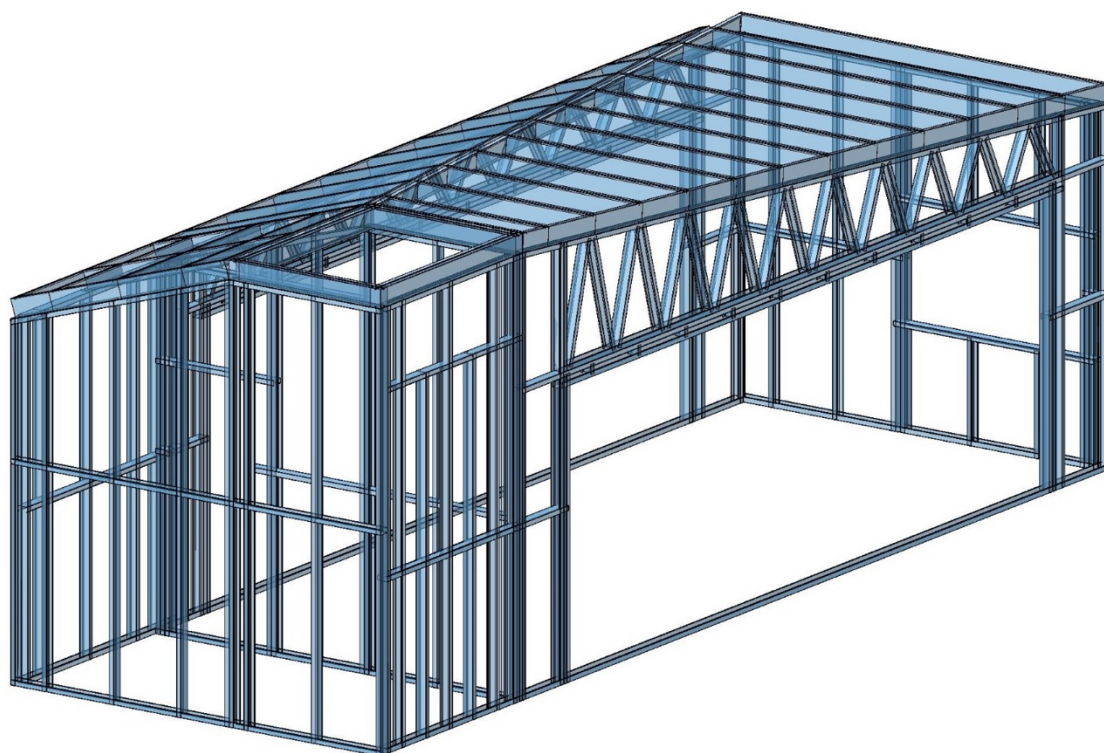


Figura 36 - Protótipo de construção modular. (Fonte: Autor)

#### 4.1.7.4 O aço galvanizado como elemento estrutural

Uma estrutura em *Light Steel Framing* (LSF) é constituída por perfis de aço galvanizado moldados a frio, organizados em painéis e vigas que formam o esqueleto resistente do edifício. O aço utilizado nestes sistemas distingue-se por apresentar uma relação resistência-peso muito favorável, o que permite recorrer a elementos com secções mais reduzidas para vencer os mesmos vãos que, em soluções tradicionais de betão armado ou alvenaria, exigiriam componentes mais volumosos. (Ferreira, 2014)

Esta elevada eficiência mecânica traduz-se numa menor quantidade de aço necessária por metro quadrado de construção, reduzindo o consumo de matéria-prima e facilitando o transporte e a montagem em obra. Ao mesmo tempo, o facto de os perfis serem produzidos industrialmente com grande precisão dimensional contribui para um melhor controlo de qualidade e para a minimização de desperdícios durante o processo construtivo. (Ferreira, 2014)

Nas estruturas em LSF, as chapas de aço são protegidas contra a corrosão através da aplicação de um revestimento de zinco, obtido habitualmente por galvanização por imersão a quente. Neste processo, os perfis são mergulhados num banho de zinco

fundido, formando-se uma camada metálica contínua e aderente que funciona como barreira física face à humidade e a agentes agressivos, e que ainda confere proteção catódica em caso de pequenas descontinuidades do revestimento. (Ferreira, 2014)

O aço utilizado nos perfis de estruturas LSF pertence, em regra, à família dos aços estruturais, caracterizados por um baixo teor de carbono, o que lhes confere maior ductilidade e capacidade de deformação antes da rotura. Esta característica é essencial em elementos enformados a frio, uma vez que o material é sujeito a processos de dobragem e perfuração que exigem boa aptidão ao conformado sem ocorrência de fissuração. (Ferreira, 2014)

Após a aplicação do revestimento de zinco por galvanização, o aço passa a ser identificado com uma designação em que surge a letra “G”, indicando precisamente que o material é galvanizado, e a letra “D”, associada ao facto de o revestimento ter sido aplicado de forma contínua por imersão a quente. Nas normas europeias que regulam os aços enformados a frio para a construção, como a EN 10147 (substituída posteriormente pela EN 10346), são definidas classes usuais para estruturas LSF, como S220GD, S250GD ou S280GD, estabelecendo para cada uma limites mínimos de resistência ao escoamento, resistência à tração e alongamento, bem como os requisitos mínimos de espessura do revestimento de zinco. (Ferreira, 2014)

Tabela 10 - Classe de aços estruturais usados em LSF (Ferreira, 2014)

<b>Classe de aço</b>	<b>Tensão de cedência</b>	<b>Tensão última</b>
<b>S220GD</b>	220 MPa	300 MPa
<b>S250GD</b>	250 MPa	320 MPa
<b>S280GD</b>	280 MPa	360 MPa
<b>S320GD</b>	320 MPa	390 MPa

#### **4.1.7.5 Desempenho térmico do LSF**

O desempenho térmico do *Light Steel Framing* (LSF) depende da forma como são combinados os perfis metálicos, os materiais de isolamento e as camadas de revestimento que constituem as paredes, pavimentos e coberturas. A estrutura metálica, por si só, tem uma elevada condutividade térmica, o que exige soluções cuidadas para controlar as pontes térmicas e garantir a estanqueidade do edifício. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011)

Nas paredes em LSF, o desempenho térmico resulta normalmente de um sistema multicamada, formado por perfis metálicos galvanizados, isolamento térmico (geralmente lã mineral ou lã de rocha), membranas corta-vento e barreiras de vapor, placas estruturais (como OSB, gesso cartonado ou fibrocimento) e revestimento

exterior ventilado ou contínuo. A presença de isolamento entre os perfis e, muitas vezes, de uma segunda camada contínua no exterior, permite atingir valores de transmitância térmica muito reduzidos, compatíveis com edifícios de elevado desempenho energético e até com padrões de construção quase nula ou passiva. A utilização de membranas de estanquidade ajuda ainda a reduzir infiltrações de ar, minimizando perdas energéticas. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011)

Contudo, a condutividade térmica do aço cria pontes térmicas lineares que, se não forem bem tratadas, podem comprometer o desempenho energético global e provocar condensações superficiais ou intersticiais. Por isso, o dimensionamento térmico em LSF exige: isolamento contínuo exterior, aplicação de rupturas térmicas nos perfis e verificação higrotérmica segundo metodologias regulamentares. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011)

Quando corretamente projetado, o LSF demonstra um elevado potencial para alcançar classes energéticas superiores, reduzindo necessidades de climatização e garantindo conforto térmico tanto no inverno como no verão. Em climas mais quentes, o sistema beneficia ainda da baixa inércia térmica, permitindo um arrefecimento mais rápido dos espaços. A estanquidade ao ar e o conforto higrotérmico são fatores essenciais, especialmente em edifícios de uso coletivo, contribuindo para a qualidade do ar interior. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011) (Fortidomus, s.d.)

Tabela 11 - Desempenho térmico do LSF

<b>Aspeto</b>	<b>Descrição</b>
<b>Estrutura metálica</b>	Elevada condutividade térmica, exige soluções para controlar pontes térmicas e garantir estanquidade.
<b>Isolamento</b>	Multicamada (lã mineral, lã de rocha, membranas, placas estruturais, revestimento exterior).
<b>Transmitância térmica</b>	Valores muito reduzidos ( $U < 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) compatíveis com edifícios de elevado desempenho energético.
<b>Pontes térmicas</b>	Devem ser tratadas com isolamento contínuo exterior, rupturas térmicas e verificação higrotérmica.
<b>Estanquidade</b>	Membranas de estanquidade reduzem infiltrações de ar e perdas energéticas.
<b>Conforto térmico</b>	Redução de necessidades de climatização, conforto térmico no inverno e verão, arrefecimento rápido em climas quentes.

#### **4.1.7.6 Desempenho acústico do LSF**

O comportamento acústico das construções em *Light Steel Framing* (LSF) depende sobretudo da seleção de materiais isolantes adequados e da forma como são concebidas as várias camadas da envolvente. Por natureza, estruturas leves tendem a transmitir mais vibração do que estruturas pesadas; contudo, no LSF essa fragilidade é compensada através de sistemas multicamada e da incorporação de elementos resilientes que interrompem os caminhos de transmissão do som. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011) (Monteiro da Silva & Guedes de Almeida, 2010) (Mazoni & Taborda dos Santos, 2024)

As paredes em LSF integram, em geral, duas ou mais camadas de placas de gesso cartonado, isolamento acústico em lã mineral, perfis metálicos afastados e, quando necessário, membranas acústicas adicionais. As cavidades preenchidas com lã mineral desempenham um papel fundamental na absorção do ruído aéreo, reduzindo a transmissão entre compartimentos e para o exterior. A separação entre camadas e o funcionamento do conjunto segundo o princípio “massa-mola-massa” permitem melhorar a atenuação sonora, alcançando níveis de isolamento acústico que podem atingir  $R_w > 50$  dB em paredes bem projetadas, superando frequentemente o desempenho de sistemas tradicionais em alvenaria. No caso dos pavimentos, o isolamento é reforçado com a utilização de bandas resilientes, mantas acústicas anti-impacto e, quando aplicável, betonilhas flutuantes desacopladas da estrutura. Estas soluções reduzem a transmissão de ruído de percussão entre pisos, contribuindo para cumprir os requisitos regulamentares relativos ao ruído de impacto em edifícios de habitação e serviços, podendo atingir valores de  $\Delta L_w > 25$  dB. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011) (Monteiro da Silva & Guedes de Almeida, 2010) (Mazoni & Taborda dos Santos, 2024) (Amorim Alves, 2024) (Mateus, 2025)

Quando bem projetado, o LSF é capaz de satisfazer as exigências regulamentares para ruído aéreo e de percussão, proporcionando níveis de conforto acústico adequados ao uso previsto; contudo, a qualidade final depende de forma determinante da execução em obra, em particular na selagem de juntas, nos pontos de fixação e nos encontros entre paredes, pavimentos e coberturas. O cumprimento das normas regulamentares, como o REH e a EN ISO 10140, é essencial para garantir a eficácia das soluções acústicas aplicadas. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Mateus, 2025) (Martins, 2024)

#### **4.1.7.7 Vantagens ambientais**

O aço utilizado nos perfis do LSF é totalmente reciclável, podendo ser reaproveitado inúmeras vezes sem perda significativa das suas propriedades mecânicas, o que contribui diretamente para a economia circular e reduz de forma substancial os resíduos em fim de vida. Além disso, a elevada precisão do fabrico industrial permite otimizar o consumo de materiais, gerando muito menos desperdício em comparação com sistemas tradicionais de construção. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011)

Outro fator relevante é a construção a seco, que reduz drasticamente os consumos de água, minimiza a geração de poeiras e limita os impactos ambientais durante a obra. A rapidez do processo construtivo também reduz o tempo de intervenção no local, limitando as emissões associadas ao transporte de materiais e ao funcionamento de equipamentos. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011)

No que respeita à operação do edifício, o LSF destaca-se pela sua capacidade de integrar elevados níveis de isolamento térmico, resultando em menores necessidades de energia para climatização e, portanto, menores emissões de CO<sub>2</sub> durante a vida útil do edifício. Esta combinação de reciclabilidade, otimização de recursos e eficiência energética posiciona o LSF como uma solução ambientalmente vantajosa face a sistemas tradicionais, contribuindo para a descarbonização do setor da construção. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011) (Fortidomus, s.d.) (Idealista, 2024) (Laranjeiro, 2014)

#### **4.1.7.8 Limitações ambientais**

Apesar das vantagens ambientais associadas ao *Light Steel Framing* (LSF), este sistema enfrenta também alguns desafios que limitam o seu desempenho global do ponto de vista ambiental. Em primeiro lugar, o fabrico do aço para os perfis metálicos implica uma elevada energia incorporada, com emissões consideráveis de gases com efeito de estufa, que devem ser tidas em conta na avaliação do ciclo de vida do sistema. Para além disso, a galvanização dos perfis e a aplicação de revestimentos anticorrosivos, essenciais para garantir a durabilidade do aço em condições ambientais agressivas, acrescentam consumos energéticos e utilização de matérias-primas, aumentando o impacto ambiental da fase de fabricação. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011)

Um outro desafio crítico é a necessidade de um controlo rigoroso das pontes térmicas, pois, dada a elevada condutividade do aço, qualquer falha neste aspeto pode comprometer seriamente a eficiência energética real do edifício, levando a perdas substanciais de calor e a potenciais problemas higrotérmicos. Por fim, os impactos associados à logística e transporte dos componentes podem ser significativos quando a produção dos elementos pré-fabricados está afastada do local da obra, aumentando a pegada de carbono na fase inicial do ciclo de vida. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011)

Contudo, quando o LSF é fabricado com aço reciclado e os princípios de conceção sustentável são integrados desde o projeto (nomeadamente o isolamento contínuo e a correta proteção da estrutura), os impactos negativos inerentes ao fabrico e logística são amplamente compensados pelos benefícios estruturais, pela redução da energia necessária para a climatização ao longo da vida útil do edifício, e pela durabilidade superior dos sistemas industrializados. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011)

#### **4.1.7.9 Considerações de Ciclo de Vida (ACV)**

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao *Light Steel Framing* (LSF) demonstra que este sistema pode alcançar uma pegada ecológica inferior à dos sistemas baseados em betão armado ou alvenaria pesada, sobretudo devido à redução de resíduos, à eficiência energética e à reciclabilidade dos materiais. Estudos europeus e nacionais mostram que o consumo de energia incorporada na fase de produção do aço é compensado pela durabilidade e pela possibilidade de reciclagem, que permite reintegrar o material na indústria siderúrgica sem perda de propriedades. As emissões associadas ao transporte são inferiores devido à leveza do material, o que reduz o impacto logístico. O desempenho térmico superior do LSF reduz os consumos na fase de uso, que é a etapa mais impactante do ciclo de vida dos edifícios. No fim de vida, o aço pode ser desmontado, separado e reintegrado na indústria siderúrgica, contribuindo para a economia circular. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011)

Deste modo, o LSF apresenta um perfil ambiental robusto, sendo reconhecido internacionalmente como um sistema adequado para edifícios sustentáveis e alinhado com políticas europeias de descarbonização e economia circular. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011) (Laranjeiro, 2014)

## **4.2 Impacto Social e Económico da escolha dos materiais sustentáveis**

A escolha de materiais sustentáveis na construção gera impactos sociais profundos, começando pela criação de emprego qualificado e dinamização de economias locais. Em Portugal, materiais como cortiça, madeira certificada (PEFC/FSC) e argila expandida (Leca) ativam fileiras produtivas regionais, gerando postos de trabalho diretos na extração, transformação e instalação. O setor da cortiça, por exemplo, emprega cerca de 8.000 pessoas diretamente e sustenta 40.000 empregos indiretos, com forte concentração no Alentejo, onde a fileira contribui com 200 milhões de euros anuais para a economia local através de salários, impostos e compras a fornecedores regionais. Sistemas pré-fabricados como Thermochip ou MultiZero exigem mão de obra especializada em montagem seca, criando oportunidades para formação profissional e reconversão de trabalhadores de alvenarias tradicionais, especialmente jovens e mulheres, num setor historicamente masculino. (Botelho Cardoso, José. 10/07/2024.) (COTEC Portugal, 2020) (Bragança, 2024)

No plano económico, os materiais sustentáveis implicam investimento inicial superior (20-40% mais caros que convencionais), mas geram retornos significativos ao longo do ciclo de vida através de poupanças operacionais e valorização patrimonial. Edifícios com certificação LEED/BREEAM ou materiais de baixo carbono valorizam-se 7-15% no mercado imobiliário português, conforme estudos e dados do mercado, onde imóveis eficientes energeticamente vendem mais depressa e com prémios de preço. A redução de consumos energéticos (até 50% em NZEB

com ICF ou MultiZero) baixa faturas de eletricidade em 300-500€/ano por fração, libertando rendimento disponível das famílias para consumo e poupança, com efeito multiplicador na economia. Além disso, a economia circular associada a estes materiais (reutilização de cortiça, reciclagem de EPS do ICF) gera 10-36 vezes mais emprego que aterramento de RCD, conforme dados europeus da Rreuse, criando 296 postos por tonelada de material reutilizado vs. 6 em aterro. (Botelho Cardoso, José. 10/07/2024.) (COTEC Portugal, 2020) (Bragança, 2024) (Koengkan et al., 2023)

Socialmente, estes materiais melhoram a qualidade de vida urbana através de conforto térmico/acústico superior e qualidade do ar interior. Painéis como ThermoChip TKH ou Multicover reduzem ruído entre frações ( $R_w > 55\text{dB}$ ), essencial em edifícios multifamiliares onde 30% das queixas urbanas relacionam-se com acústica, promovendo coesão social e reduzindo conflitos vizinhos. O conforto térmico estabilizado (ICF, cortiça) diminui stresses térmicos em populações vulneráveis (idosos, crianças), com estudos da UE a demonstrarem 20% menos internamentos por problemas respiratórios em edifícios eficientes. A proximidade de materiais locais (cortiça alentejana, Leca Aveiro) reforça identidade cultural e património, valorizando saberes tradicionais numa perspetiva moderna. (Laje, Nelson. 12/02/2025.)

Economicamente, os materiais sustentáveis catalisam inovação e competitividade empresarial. Programas como Portugal 2030 alocam 2,5 mil milhões de euros para transição verde na construção, financiando fábricas de pré-fabricação (Casais, Multipanel) e R&D em betão ecoeficiente, gerando 1.300 novos postos e 32 milhões de VAB adicional. A exportação de know-how português (cortiça para isolamento global, ICF para mercados emergentes) posiciona PMEs como Amorim ou Leca em cadeias de valor internacionais, diversificando risco e estabilizando emprego sazonal. No entanto, barreiras persistem: escassez de mão de obra qualificada (apenas 15% dos trabalhadores com formação em montagem seca) e dispersão normativa atrasam adoção, exigindo investimento público em FP e simplificação regulatória. (Botelho Cardoso, José. 10/07/2024.) (COTEC Portugal, 2020) (Bragança, 2024) (Portugal 2030, n.d.)

A longo prazo, a transição cria resiliência económica face a choques: dependência reduzida de importações fósseis (EPS, aço), exposição menor a flutuações de preços energéticos e alinhamento com taxonomia verde da UE, que direciona 40% dos investimentos sustentáveis para construção. Projetos como Terras da Comporta (CLT) ou Mjøstårnet (madeira) demonstram ROI de 10-12% superior em 20 anos, combinando valorização imobiliária com savings operacionais. Socialmente, promove equidade intergeracional ao preservar recursos para futuras gerações e inclusão laboral em regiões desfavorecidas (Alentejo cortiça, Trás-os-Montes madeira). Em síntese, materiais sustentáveis transformam a construção de setor intensivo em recursos num motor de desenvolvimento inclusivo, com impactos mensuráveis em emprego (direto e indireto), rendimento familiar, inovação e coesão

territorial. (Laje, Nelson. 12/02/2025.) (COTEC Portugal, 2020) (Bragança, 2024) (Koengkan et al., 2023)

### **4.3 Desafios e oportunidade para o futuro**

Os desafios e as oportunidades na adoção de materiais de construção sustentáveis estão hoje intimamente ligados às metas climáticas da União Europeia, à transição energética e à digitalização do setor. A construção é responsável por uma parte muito significativa do consumo de energia e das emissões, o que coloca uma enorme pressão regulatória sobre promotores, projetistas e fabricantes de materiais, mas também abre um espaço de inovação e diferenciação para quem se posicionar cedo. (Laje, Nelson. 12/02/2025.) (Frazão Pedroso, Marco (2024), n.d.) (Portugal 2030, 2023)

#### **4.3.1 Desafios regulatórios e de mercado**

Um primeiro desafio é o ritmo crescente das exigências legais: edifícios novos terão de ser de emissões quase nulas, com limites cada vez mais apertados para energia primária e carbono incorporado. Isto obriga a uma rápida atualização de normas, regulamentos nacionais e procedimentos de licenciamento, o que pode gerar incerteza e atrasos em projeto e obra se os intervenientes não estiverem preparados. Paralelamente, o mercado ainda é muito sensível ao custo inicial, sobretudo em habitação, o que dificulta a adoção de materiais sustentáveis quando o benefício se materializa sobretudo na fase de utilização, através de poupanças energéticas e maior durabilidade. (Botelho Cardoso, José. 10/07/2024.) (Laje, Nelson. 12/02/2025.) (Frazão Pedroso, Marco (2024), n.d.) (Portugal 2030, 2023)

Outro desafio é a fragmentação do setor: em Portugal predominam micro e pequenas empresas, com reduzida capacidade financeira e técnica para investir em I&D, certificações ambientais ou formação avançada em novas soluções construtivas. A escassez de mão de obra qualificada agrava o problema, porque sistemas como ICF, painéis pré-fabricados ou soluções Passivhaus exigem competências específicas em montagem seca, estanquidade ao ar e detalhe construtivo que muitos profissionais ainda não dominam. Sem um esforço consistente de qualificação, há risco de má aplicação dos materiais sustentáveis, o que compromete desempenho e gera desconfiança no mercado. (Laje, Nelson. 12/02/2025.) (Frazão Pedroso, Marco (2024), n.d.) (Notícias ao Minuto, 2025.)

#### **4.3.2 Desafios técnicos e de informação**

Do ponto de vista técnico, a avaliação do ciclo de vida e do desempenho real dos materiais continua a ser complexa. Faltam, muitas vezes, dados harmonizados sobre carbono incorporado, reciclabilidade e durabilidade em contexto português, o que dificulta comparações objetivas entre soluções. A ausência ou escassez de

declarações ambientais de produto (EPD) para algumas famílias de materiais cria assimetrias de informação e pode levar a decisões baseadas mais em marketing do que em indicadores robustos. (Bragança, 2024) (Martins, Lopes, & Mendes, 2023) (Portal da Construção Sustentável, n.d.)

Há ainda o desafio da integração sistémica: um material pode ter ótimo perfil ambiental isoladamente, mas comportar-se mal quando inserido num sistema construtivo mal dimensionado, com pontes térmicas, condensações ou fraco desempenho acústico. A necessidade de compatibilizar materiais tradicionais (como pedra ou adobe) com soluções inovadoras (painéis pré-fabricados, isolamentos de base biológica) exige conhecimento interdisciplinar e ferramentas digitais de apoio ao projeto, como BIM com dados ambientais integrados. (Portugal 2030, 2025) (Portal da Transparência, 2025) (Caniato et al., 2017.)

### **4.3.3 Oportunidades económicas e de inovação**

Em contrapartida, o contexto atual cria oportunidades económicas muito relevantes para quem investir em materiais sustentáveis. Programas como Portugal 2030 e sustentável 2030 mobilizam milhares de milhões de euros para projetos de descarbonização, economia circular e reabilitação do ambiente construído, incluindo o desenvolvimento industrial de novos materiais e sistemas construtivos. Projetos apoiados que apostam na digitalização dos materiais e na construção industrializada mostram que é possível reduzir custos de habitação e, ao mesmo tempo, melhorar o desempenho ambiental das soluções. (Portugal 2030, n.d.) (Portugal 2030, 2025) (COMPETE 2030, 2025) (Portugal 2030, 2023)

Empresas que desenvolvem materiais de baixo carbono, incorporando resíduos industriais ou recursos locais (como cortiça, fibras vegetais ou argilas leves), podem ganhar vantagem competitiva em mercados cada vez mais regulados por taxonomias verdes e critérios ESG de acesso a financiamento. A exportação de know-how e de produtos sustentáveis abre ainda novas cadeias de valor, posicionando o setor português como fornecedor especializado de soluções para mercados que também enfrentam metas de neutralidade carbónica. (COTEC Portugal, 2020) (Koengkan et al., 2023) (Frazão Pedroso, Marco (2024), n.d.) (Grupo casais, s.d.)

### **4.3.4 Síntese: de obrigação a oportunidades estratégicas**

Em conjunto, estes elementos mostram que a adoção de materiais sustentáveis enfrenta barreiras reais – regulamentares, económicas, técnicas e de capacitação – mas, ao mesmo tempo, representa uma oportunidade estratégica para transformar o setor num motor de inovação, emprego qualificado e competitividade internacional. Para quem projeta e constrói hoje, o desafio passa por antecipar as exigências de 2030–2050, usar ferramentas de avaliação do ciclo de vida e apostar em sistemas industrializados e circulares, convertendo aquilo que à primeira vista parece um custo

acrescido numa vantagem duradoura ao nível ambiental, económico e social. (Laje, Nelson. 12/02/2025.) (Frazão Pedroso, Marco (2024), n.d.) (Portugal 2030, 2023)

#### **4.4 Comparação de desempenho: Materiais tradicionais vs. Sustentáveis**

A comparação entre materiais de construção tradicionais e materiais sustentáveis não pode ser reduzida a uma oposição simples entre “antigo” e “moderno”, porque ambos os grupos apresentam vantagens e limitações que dependem do contexto climático, do tipo de edifício e da solução construtiva adotada. Materiais tradicionais como pedra, adobe, taipa, madeira maciça e alvenarias de tijolo estão associados a saber-fazer local, disponibilidade geográfica e forte enraizamento cultural, enquanto materiais considerados sustentáveis incluem, por exemplo, cortiça, madeiras, argila expandida, betões ecoeficientes, sistemas ICF e painéis pré-fabricados de alto desempenho. (Sigma Earth, n.d.) (Materiais para obras, s.d.) (Mello, Vieira, & Gitahy, 2019) (Bissoli-Dalvi, Martinez da Costa, Engel de Alvarez, & Gobbi, 2017)

A comparação entre materiais tradicionais e materiais sustentáveis não é linear, porque depende sempre do contexto (clima, função do edifício, disponibilidade local, solução construtiva), mas há padrões claros em termos de desempenho ambiental, térmico, acústico, estrutural e económico. (Sigma Earth, n.d.)

##### **4.4.1 Desempenho ambiental e ciclo de vida**

Do ponto de vista ambiental, muitos materiais tradicionais vernáculos apresentam energia incorporada relativamente baixa, sobretudo quando são extraídos e transformados localmente (pedra, terra crua, madeira serrada, cal aérea), reduzindo o impacto das fases de extração e transporte. Em contrapartida, materiais sustentáveis modernos, embora possam exigir processos industriais mais intensivos (por exemplo, painéis multicamada, agregados leves, ligantes modificados), tendem a ser otimizados à escala do ciclo de vida, permitindo reduções significativas do consumo energético na fase de utilização do edifício e maior reciclabilidade no fim de vida. Assim, materiais tradicionais podem beneficiar sobretudo as fases iniciais do ciclo de vida, enquanto materiais sustentáveis bem concebidos apresentam melhor desempenho global quando se considera também a operação e a desativação da construção. (Sigma Earth, n.d.) (Mello, Vieira, & Gitahy, 2019) (Bissoli-Dalvi, Martinez da Costa, Engel de Alvarez, & Gobbi, 2017) (Sousa, Nobre, Borges, & Andrade, 2023)

Os materiais sustentáveis tendem a apresentar melhor desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida, sobretudo quando são renováveis, reciclados ou de baixa energia incorporada. Materiais tradicionais industriais como o betão e o aço oferecem grande durabilidade e capacidade resistente, mas estão associados a emissões significativas de CO<sub>2</sub> na fase de produção, em especial devido ao fabrico

do cimento e à siderurgia. Já materiais sustentáveis como cortiça, madeira certificada, betões ecoeficientes com adições, argilas expandidas, painéis pré-fabricados de elevado desempenho e sistemas ICF podem reduzir a pegada de carbono incorporado e, sobretudo, diminuir consumos energéticos durante a vida útil do edifício, compensando impactos iniciais mais elevados em alguns casos. (Nudurabyconstreco, 2025) (Sigma Earth, n.d.) (Neves, 2011)

Ao nível da gestão de recursos, os materiais tradicionais de origem mineral (alvenarias pesadas, argamassas de cimento, cerâmicos convencionais) utilizam recursos não renováveis e geram resíduos pesados que nem sempre são reintegrados em cadeias de reciclagem. Os materiais sustentáveis, quando desenhados para desmontagem e reutilização, alinham-se com princípios de economia circular, permitindo reincorporar resíduos como matéria-prima (por exemplo, agregados reciclados, cortiça reciclada, EPS reciclado de sistemas ICF), reduzindo extração de inertes e deposição em aterro. (Bragança, 2024) (Sigma Earth, n.d.) (Bissoli-Dalvi, Martinez da Costa, Engel de Alvarez, & Gobbi, 2017) (Neves, 2011)

#### **4.4.2 Desempenho térmico**

Em termos de comportamento térmico, os materiais tradicionais pesados (pedra, taipa, adobe) oferecem elevada inércia térmica, contribuindo para amortecer variações de temperatura em climas quentes e secos, desde que associados a estratégias adequadas de sombreamento e ventilação. No entanto, o seu desempenho isolante é frequentemente insuficiente para cumprir os requisitos de edifícios de energia quase nula em climas onde o aquecimento ou o arrefecimento mecânico têm peso significativo. Os materiais sustentáveis contemporâneos, como isolamentos naturais (cortiça, fibras vegetais), argilas expandidas, sistemas ICF e painéis sanduíche, integram camadas de isolamento contínuo que reduzem perdas de calor no Inverno e ganhos no Verão, permitindo reduções de 20–50% no consumo de energia face a soluções tradicionais equivalentes, sobretudo em edifícios com padrões de conforto modernos. (Sigma Earth, n.d.) (Sousa, Nobre, Borges, & Andrade, 2023)

Em termos térmicos, muitos materiais tradicionais estruturais (betão, alvenaria vazada, aço) têm boa massa térmica, mas fraco comportamento isolante, exigindo camadas adicionais de isolamento para cumprir requisitos regulamentares atuais. Materiais vernáculos como adobe, taipa ou pedra podem garantir conforto aceitável em climas específicos graças à inércia térmica, mas, sem intervenção complementar, ficam aquém das exigências de edifícios de energia quase nula. Já materiais sustentáveis tipicamente integram funções estruturais e de isolamento (como sistemas ICF, painéis sanduíche, isolamentos naturais de cortiça, fibras vegetais, argila expandida), permitindo reduzir perdas e ganhos de calor e, em muitos casos, atingir poupanças de energia de 20–30% ou mais face a soluções tradicionais equivalentes. (Nudurabyconstreco, 2025) (Sigma Earth, n.d.) (Sousa, Nobre, Borges, & Andrade, 2023) (Neves, 2011)

A grande diferença está na continuidade do isolamento e no controlo de pontes térmicas. Sistemas sustentáveis pré-fabricados e industrializados tendem a garantir uma envolvente mais homogênea, com menos descontinuidades, ao contrário de alvenarias executadas em obra, onde erros de execução são frequentes. Assim, em edifícios com requisitos elevados (NZEB, Passivhaus), as soluções consideradas “sustentáveis” em termos de materiais tornam-se praticamente indispensáveis para atingir os níveis de desempenho energético pretendidos. (Sousa, Nobre, Borges, & Andrade, 2023) (Neves, 2011)

#### **4.4.3 Desempenho acústico**

Em acústica, materiais tradicionais pesados como pedra e betão continuam a oferecer desempenho muito bom em termos de isolamento a ruído aéreo, devido à sua massa, sendo frequentemente superiores a sistemas leves se estes não forem bem dimensionados. No entanto, estes materiais isolam menos bem o ruído de percussão e, quando associados a estruturas rígidas contínuas, podem transmitir vibrações de forma mais eficaz. Materiais sustentáveis e sistemas multicamada (painéis com isolantes fibrosos, cortiça, lã mineral, painéis acústicos de madeira, sistemas ICF com EPS) permitem afinar o desempenho acústico, combinando massa e absorção, o que pode levar a melhor compromisso entre ruído aéreo e de impacto. (Nudurabyconstreco, 2025) (Neves, 2011) (Monteiro da Silva & Guedes de Almeida, 2010)

A grande vantagem dos sistemas sustentáveis modernos está na possibilidade de ajustar o comportamento acústico com relativa facilidade (espessura, tipo de isolamento, camadas resilientes), enquanto as soluções tradicionais mais pesadas dependem sobretudo da massa de cada elemento, sendo menos flexíveis em reabilitação. Em edifícios multifamiliares ou em zonas ruidosas, as soluções baseadas em materiais sustentáveis bem detalhadas conseguem frequentemente cumprir regulamentos acústicos com menor espessura e peso global do que as soluções tradicionais equivalentes. (Nudurabyconstreco, 2025) (Mazoni & Taborda dos Santos, 2024) (Monteiro da Silva & Guedes de Almeida, 2010)

#### **4.4.4 Comportamento estrutural e durabilidade**

Do ponto de vista estrutural, materiais tradicionais como betão, aço e alvenaria continuam a ser referência em termos de capacidade resistente, comportamento previsível e regulamentação consolidada. A durabilidade destes materiais, quando bem especificados e mantidos, é elevada, embora possam exigir reparações significativas em caso de corrosão de armaduras ou degradação de rebocos. Materiais tradicionais vernáculos, como taipa ou adobe, têm durabilidade muito dependente de manutenção e de proteção contra humidade, mas podem ser extremamente duráveis em contextos adequados. (Mazoni & Taborda dos Santos, 2024) (Sousa, Nobre, Borges, & Andrade, 2023) (Neves, 2011)

Os materiais sustentáveis apresentam uma grande diversidade de desempenho estrutural: alguns, como a madeira trabalhada em ambiente fabril, como a CLT ou a MLC ou o bambu, são altamente resistentes e adequados a edifícios de maior altura; outros, como isolamentos naturais ou blocos leves, são pensados mais como elementos não estruturais. A durabilidade pode ser excelente (por exemplo madeira bem detalhada, painéis pré-fabricados, sistemas ICF) se houver projeto e manutenção adequados, mas a ausência de tradição local ou de mão de obra especializada pode comprometer o desempenho real em serviço. Assim, em termos estruturais, a comparação não é tanto “melhor” ou “pior”, mas sim “conhecido vs. novo”, com maior inércia regulamentar e cultural a favor dos materiais tradicionais. (Mazoni & Taborda dos Santos, 2024) (Neves, 2011)

#### **4.4.5 Custos, manutenção e desempenho económico**

Em custos, os materiais tradicionais tendem a ser mais baratos à cabeça, sobretudo quando há produção local consolidada (betão, alvenaria, aço) e quando a mão de obra está familiarizada com as técnicas de construção. No entanto, estes sistemas podem implicar custos operacionais mais elevados ao longo da vida útil, devido a menores níveis de isolamento, maiores consumos de energia, intervenções de reabilitação mais frequentes e, por vezes, menor flexibilidade de adaptação futura. (Sigma Earth, n.d.) (Materiais para obras, s.d.)

Os materiais sustentáveis costumam apresentar custos iniciais mais altos, associados à inovação, certificações e, em alguns casos, à escala de produção ainda limitada, mas vários estudos indicam que podem proporcionar poupanças significativas em energia, água e manutenção, resultando em retorno do investimento ao fim de alguns anos e em melhor desempenho económico a 20–30 anos. Além disso, edifícios com bom desempenho ambiental e materiais certificados tendem a valorizar-se mais no mercado, sobretudo em segmentos médio-alto e em contextos urbanos com utilizadores sensíveis a temas de conforto, saúde e sustentabilidade. (Koengkan et al., 2023) (Sigma Earth, n.d.) (Materiais para obras, s.d.)

#### **4.4.6 Síntese comparativa**

De forma geral, materiais tradicionais mantêm vantagens claras em familiaridade, regulamentação consolidada, robustez estrutural e, muitas vezes, custo inicial. Materiais sustentáveis destacam-se em desempenho ambiental (ciclo de vida), eficiência térmica, potencial acústico em sistemas multicamada e desempenho económico a longo prazo, especialmente em edifícios com elevados requisitos energéticos e de conforto. Em muitos casos, a solução mais interessante não é substituir integralmente os materiais tradicionais, mas combiná-los com materiais e sistemas sustentáveis – por exemplo, estrutura em betão com isolamento em cortiça ou sistemas ICF, alvenarias tradicionais melhoradas com argila expandida e isolamentos naturais – tirando partido dos pontos fortes de cada grupo de materiais no contexto específico de cada projeto. (Nudurabyconstreco, 2025) (Mazoni &

Taborda dos Santos, 2024) (Sigma Earth, n.d.) (Materiais para obras, s.d.) (Neves, 2011)

## **4.5 Casos de estudo de projetos sustentáveis**

A análise de 3 casos de estudo reais retirado de outros trabalhos permite evidenciar, de forma concreta, o impacto que a seleção de materiais sustentáveis pode ter no desempenho global dos edifícios, tanto em construção nova como em reabilitação. Os exemplos apresentados ilustram diferentes abordagens: a utilização de materiais tradicionais reinterpretados com critérios de sustentabilidade, a adoção de sistemas industrializados de elevado desempenho e a integração de materiais sustentáveis em intervenções de reabilitação. Estes casos demonstram que a escolha de materiais sustentáveis pode traduzir-se em reduções significativas do consumo energético, melhorias do conforto térmico e acústico, e valorização do património construído, reforçando a importância destas soluções para a sustentabilidade do setor da construção. (Plataforma para a Construção Sustentável, s.d.) (Teodoro, 2011) (Portal da Construção Sustentável, n.d.)

### **4.5.1 Edifício com isolamento em cortiça**

O primeiro caso de estudo analisa um edifício de habitação multifamiliar da década de 1980, implantado em contexto urbano na região Norte de Portugal, caracterizado por paredes em alvenaria simples, ausência de isolamento térmico e caixilharias com fraca estanquidade ao ar. Esta configuração construtiva conduzia a perdas térmicas significativas no inverno, sobreaquecimento no verão e consumos energéticos elevados, refletidos em faturas de energia e em queixas de desconforto por parte dos moradores. As simulações térmicas realizadas no âmbito do estudo apontavam para coeficientes de transmissão térmica da ordem de  $U \approx 1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  nas fachadas e necessidades anuais de aquecimento entre 120 e 140 kWh/m<sup>2</sup>.ano, valores típicos de edifícios desta época no Noroeste peninsular. Perante este cenário, foi realizado um estudo de reabilitação da envolvente opaca, com o objetivo de avaliar o potencial de diferentes soluções de isolamento exterior, privilegiando materiais com baixo impacto ambiental. (Gonçalves, 2018)

No âmbito do estudo, foram comparados vários sistemas ETICS, recorrendo a isolantes de origem petroquímica (como EPS ou XPS) e a materiais de base natural, em particular a cortiça expandida aglomerada. A cortiça foi selecionada por combinar uma condutividade térmica competitiva com uma energia incorporada reduzida e uma forte ligação à fileira florestal nacional, funcionando como recurso renovável e com capacidade de sequestro de carbono ao longo do ciclo de vida do montado. As simulações térmicas mostraram que, para uma espessura de isolamento de 8–10 cm, adequada às exigências atuais, a aplicação de painéis de cortiça permitiu

reduzir a transmitância térmica das fachadas para valores na ordem de  $U \approx 0,35\text{--}0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ , próximos dos valores exigidos em edifícios de energia quase nula (nZEB) em contexto de reabilitação. Em termos de desempenho sazonal, estimou-se uma diminuição das necessidades anuais de aquecimento em cerca de 40–50%, com reduções típicas para cerca de 70 kWh/m<sup>2</sup>.ano, dependendo do perfil de utilização e do sistema de climatização adotado. (Matos, 2015) (Amorim cork solutions, junho 2025.)

Paralelamente, foi realizada uma análise de ciclo de vida simplificada, comparando os impactos ambientais das diferentes soluções de isolamento. Os resultados indicaram que a cortiça apresentava menores emissões de CO<sub>2</sub> equivalente e menor energia incorporada, sobretudo quando se considerava a origem renovável da matéria-prima, o baixo nível de processamento industrial e a possibilidade de reutilização ou reciclagem no fim de vida. Valores típicos de energia incorporada da cortiça situam-se na ordem de 1,3–1,5 MJ/kg, inferiores aos de isolantes de base petroquímica, e o balanço de carbono torna-se particularmente favorável quando se inclui o sequestro associado ao montado de sobreiro. Em termos operacionais, a redução das necessidades de energia para climatização traduziu-se em diminuições estimadas de emissões anuais na ordem dos 20–30 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.ano, assumindo um mix energética corrente de eletricidade e gás natural. (Amorim cork solutions, junho 2025.) (Sequeira et al., n.d.)

Adicionalmente, a combinação da cortiça com a parede existente melhorou o isolamento acústico, reduzindo a transmissão de ruído exterior, e permitiu uma renovação estética da fachada sem recorrer a demolições significativas. A intervenção pelo exterior evitou a diminuição da área útil interior, reduziu o tempo de obra e minimizou o impacto sobre os ocupantes, aspetos particularmente relevantes em contextos de reabilitação em edifícios ocupados. Assim, este caso evidencia de forma clara a capacidade da cortiça para desempenhar um papel central em estratégias de reabilitação sustentável, conciliando melhoria do desempenho térmico e acústico, redução de impactos ambientais ao longo do ciclo de vida e valorização de recursos endógenos da indústria florestal nacional. (Amorim cork solutions, junho 2025.) (Sequeira et al., n.d.)



Figura 37 - Caso de estudo de moradia com revestimento em cortiça. (Amorim cork solutions, junho 2025.)

#### **4.5.2 Edifício com sistema industrializada (LSF)**

O segundo caso de estudo incide sobre um edifício de habitação projetado com sistema estrutural integral em *Light Steel Framing* (LSF), analisado em contexto universitário como alternativa a uma solução em betão armado e alvenaria tradicional. A estrutura é formada por uma malha tridimensional de perfis de aço galvanizado enformados a frio, dimensionados de acordo com normas específicas para elementos de parede fina, e organizada em painéis que são pré-fabricados em fábrica e posteriormente montados em obra. Sobre esta estrutura são aplicadas camadas de revestimento interior e exterior, bem como isolamentos térmicos e acústicos em lã mineral e outros materiais de elevado desempenho, constituindo sistemas multicamada que asseguram, em simultâneo, resistência mecânica, conforto higrotérmico e proteção acústica. (Rego, 2012) (CIQ, 2019)

A comparação entre o edifício em LSF e o edifício de referência em betão foi efetuada ao nível estrutural, térmico, acústico e ambiental. Do ponto de vista estrutural, verificou-se que, apesar da grande redução de peso próprio, o sistema em aço leve assegura níveis de segurança adequados, desde que sejam garantidas as condições de estabilidade local dos perfis e o correto contraventamento da estrutura. Estudos de caso indicam que a massa estrutural de um edifício habitacional em LSF pode situar-se na ordem dos 80–120 kg/m<sup>2</sup> de área de piso, face a 400–500 kg/m<sup>2</sup> numa solução equivalente em betão armado, o que corresponde a reduções de 70–80% no peso próprio da estrutura. Esta diminuição de massa permitiu otimizar o dimensionamento das fundações, reduzir o volume de escavações e o consumo de betão nessa fase, com reflexos positivos tanto no custo global da obra como no impacto ambiental associado à produção e transporte de materiais pesados. (CIQ, 2019)

No domínio térmico, foram estudadas diferentes configurações de parede e cobertura, incorporando isolamento nas cavidades entre perfis e isolamento contínuo pelo exterior, com o objetivo de minimizar pontes térmicas e infiltrações de ar. Para uma solução típica de parede exterior em LSF, com 120 mm de lã mineral entre perfis e 60–80 mm de isolamento térmico exterior, obtiveram-se valores de transmitância térmica da ordem de  $U \approx 0,18\text{--}0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ , significativamente inferiores aos de uma parede de referência em alvenaria simples ( $U \approx 0,90\text{--}1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) e comparáveis a soluções reforçadas em betão com isolamento exterior. As simulações energéticas realizadas no estudo apontaram para reduções das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento na ordem dos 30–40%, em função do clima e do perfil de utilização, traduzindo-se em melhorias claras do conforto térmico sazonal e em menores custos operacionais ao longo da vida útil do edifício. (Ganhão, 2011)

Do ponto de vista construtivo e logístico, a pré-fabricação dos painéis estruturais em ambiente fabril permitiu reduzir significativamente os prazos de execução, com ganhos de 30–40% no tempo necessário para a conclusão da estrutura e do fecho da envolvente, quando comparado com a solução tradicional em betão e alvenaria. A produção em série, com corte e furação automatizados, contribuiu para minimizar desperdícios, melhorar a precisão dimensional e facilitar a montagem em obra, recorrendo a equipas de menor dimensão e a meios de elevação de capacidade moderada. Em síntese, este caso de estudo demonstra que o sistema LSF, quando corretamente dimensionado e associado a soluções de envolvente bem isoladas e estanques, consegue conciliar uma expressiva redução de massa estrutural e de prazos de construção com um desempenho térmico e ambiental muito favorável, afirmando-se como alternativa credível aos sistemas convencionais em betão armado no contexto da construção habitacional sustentável. (Rego, 2012) (CIQ, 2019) (Ganhão, 2011)

#### **4.5.3 Reabilitação com materiais sustentáveis**

O terceiro caso de estudo centra-se na reabilitação de um edifício habitacional existente, representativo de grande parte do parque edificado português construído na segunda metade do século XX. Trata-se de um edifício multifamiliar em estrutura de betão armado e paredes de alvenaria simples, sem isolamento térmico, com caixilharias metálicas pouco estanques e uma cobertura com reduzida resistência térmica. Esta configuração traduzia-se em coeficientes de transmissão térmica elevados, com valores típicos da ordem de  $U \approx 1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$  para as paredes exteriores e  $U \approx 1,50 \text{ W/m}^2\text{K}$  para a cobertura, bem como em necessidades energéticas anuais para aquecimento e arrefecimento próximas de  $180 \text{ kWh/m}^2\text{.ano}$ . Em consequência, registavam-se problemas de condensações superficiais em zonas frias da envolvente e níveis de conforto térmico aquém do desejável, sobretudo nos pisos superiores e nas frações mais expostas ao vento. Estudos técnicos preliminares demonstraram que a demolição e reconstrução implicaria um custo económico e

ambiental substancialmente superior ao de uma reabilitação profunda orientada por critérios de sustentabilidade, nomeadamente devido ao volume de resíduos de construção e demolição gerados e à energia incorporada numa nova estrutura em betão. (Machado, 2014)

A intervenção proposta definiu como objetivos principais a melhoria do desempenho energético e higrotérmico, a redução das emissões associadas à fase de utilização e o prolongamento da vida útil do edifício, garantindo simultaneamente a preservação da sua imagem arquitetónica. Para tal, foi desenvolvida uma estratégia faseada que combinou três tipos de medidas: reforço da envolvente opaca com materiais de baixo impacto ambiental, melhoria da envolvente envidraçada e otimização de pontes térmicas e infiltrações de ar. Nas fachadas principais, optou-se por um sistema de isolamento térmico pelo exterior, recorrendo a isolantes de origem natural ou reciclada compatíveis com o suporte existente e com boa permeabilidade ao vapor de água, de forma a reduzir riscos de patologias futuras; com uma espessura da ordem dos 10–12 cm, a transmitância térmica das paredes foi reduzida para valores na ordem de  $U \approx 0,30\text{--}0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Na cobertura, introduziram-se camadas adicionais de isolamento com elevada resistência térmica, complementadas com uma membrana de estanquidade e proteção mecânica adequada às condições de exposição, permitindo atingir  $U \approx 0,20\text{--}0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . (Matos, 2015) (Sampaio, 2017)

Em paralelo, procedeu-se à substituição faseada das caixilharias antigas por sistemas com melhor desempenho térmico e acústico, integrando vidros duplos de baixa emissividade com coeficientes de transmissão da ordem de  $U_{\text{janela}} \approx 1,3\text{--}1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  e reforço da estanquidade perimetral. Particular atenção foi dada ao tratamento das pontes térmicas lineares em encontros de lajes com fachadas, recorrendo a soluções de isolamento exterior contínuo e a detalhes construtivos que minimizassem descontinuidades nas camadas térmicas e barreiras de vapor. A análise de desempenho pós-intervenção, realizada com recurso a simulações dinâmicas e verificação de conforto higrotérmico, demonstrou reduções significativas das necessidades anuais de energia para climatização, que passaram para valores da ordem dos 80–100 kWh/m<sup>2</sup>.ano, correspondendo a uma diminuição de cerca de 45–60% face à situação inicial. Registou-se ainda um aumento das temperaturas operativas interiores em 2–3 °C no inverno e uma redução de picos de sobreaquecimento no verão, bem como a quase eliminação de condensações superficiais em paredes e vãos, traduzindo-se numa melhoria sensível do conforto dos ocupantes. (Machado, 2014) (Sampaio, 2017)

Do ponto de vista ambiental, a opção pela reabilitação, associada à incorporação de materiais sustentáveis na envolvente, revelou-se claramente mais favorável do que um cenário de demolição e nova construção, quando analisada em termos de ciclo de vida. Para além de evitar a produção de grandes volumes de resíduos e a energia incorporada numa estrutura totalmente nova, a redução dos consumos energéticos na fase de utilização permitiu diminuir as emissões de gases com efeito de estufa em

cerca de 40–50% ao longo da vida útil remanescente do edifício, dependendo do vetor energético considerado. Este caso de estudo evidencia, assim, o papel estratégico da reabilitação sustentável na descarbonização do parque edificado e na valorização do património construído, demonstrando que intervenções criteriosas na envolvente podem conciliar eficiência energética, conforto e preservação arquitetónica com um perfil ambiental globalmente mais favorável. (Machado, 2014) (Sampaio, 2017)

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 Síntese dos principais resultados

A análise desenvolvida ao longo da dissertação permite concluir que os materiais de construção sustentáveis, tanto na vertente de soluções baseadas em recursos locais e tradicionais como na de sistemas industrializados de alto desempenho, constituem uma resposta consistente aos desafios ambientais, económicos e operacionais que hoje se colocam ao setor da construção. A caracterização dos materiais tradicionais demonstrou que muitos destes apresentam, por natureza, um perfil ambiental favorável, em particular ao nível da energia incorporada e da proximidade entre a extração e o local de utilização, evidenciando que a sustentabilidade não é um conceito exclusivamente associado a tecnologias recentes, mas também a práticas vernaculares que conciliam adaptação climática, identidade cultural e uso racional de recursos. Em paralelo, a revisão de soluções modernas — como a cortiça expandida, a Leca, os betões ecoeficientes e os sistemas em *Light Steel Framing* (LSF) — mostrou que a inovação tecnológica permite elevar o desempenho térmico, reduzir emissões e acelerar processos construtivos, respondendo simultaneamente à pressão para descarbonizar o parque edificado e à crescente escassez de mão de obra qualificada. (CIQ, 2019) (Nunes & Cruz, 2021)

Do ponto de vista ambiental, os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) discutida no capítulo 3 e aplicada, ainda que de forma simplificada, aos casos de estudo, evidenciam que a fase de produção dos materiais continua a representar uma parcela significativa dos impactos globais, sobretudo nos materiais baseados em cimento Portland e aço estrutural. No entanto, a incorporação de ligantes suplementares (cinzas volantes, escórias) nos betões ecoeficientes, a utilização de isolantes de origem natural, como a cortiça, e a valorização de agregados leves e reciclados, como a Leca, permitem reduzir de forma mensurável a energia incorporada e o potencial de aquecimento global por unidade funcional (por exemplo, por metro quadrado de parede). Os estudos analisados indicam reduções significativas da pegada de carbono quando se substitui parcialmente o clínquer por adições e quando se opta por isolantes renováveis, reforçando a ideia de que as escolhas de material ao nível da envolvente e da estrutura têm impacto direto na trajetória de descarbonização do setor. (CIQ, 2019) (Nunes & Cruz, 2021)

No plano do desempenho térmico e energético dos edifícios, os casos de estudo permitem traduzir em valores concretos o potencial destas soluções. No edifício com isolamento em cortiça, a aplicação de um sistema ETICS com 8–10 cm de cortiça expandida reduziu a transmitância térmica das fachadas de valores típicos na ordem de 1,20 W/m<sup>2</sup>K para cerca de 0,35–0,40 W/m<sup>2</sup>K, com diminuição das necessidades de aquecimento estimada em 40–50%. No caso do edifício em LSF, a combinação de cavidades preenchidas com lã mineral e isolamento exterior contínuo permitiu obter paredes com  $U$  na ordem de 0,18–0,22 W/m<sup>2</sup>K, acompanhadas de uma

redução de 30–40% nas necessidades de climatização face à solução de referência em betão armado. Na reabilitação com materiais sustentáveis, a intervenção na envolvente opaca e envidraçada conduziu a reduções globais de 45–60% no consumo de energia para aquecimento e arrefecimento, aproximando um edifício existente, originalmente ineficiente, dos patamares de desempenho hoje exigidos para edifícios de elevado desempenho energético. Em conjunto, estes resultados confirmam que a combinação entre uma envolvente bem isolada, materiais de baixa condutividade térmica e um desenho cuidado das camadas construtivas permite atingir reduções substanciais de consumos energéticos, com reflexos diretos nas emissões operacionais e nos custos de exploração. (CIQ, 2019) (Nunes & Cruz, 2021)

Outro aspeto central evidenciado pelos resultados é a importância da industrialização dos sistemas construtivos como resposta à escassez de mão de obra e à necessidade de maior previsibilidade em prazo e custo. O estudo do edifício em LSF mostrou que a massa estrutural por metro quadrado de piso pode ser reduzida em 70–80% relativamente a uma solução equivalente em betão armado, permitindo otimizar fundações, reduzir movimentos de terras e diminuir consumos de materiais pesados. Esta redução de peso, combinada com a pré-fabricação em ambiente fabril, traduziu-se em ganhos de 30–40% no tempo de execução da estrutura e do fecho de envolvente, ao mesmo tempo que se reduziu o volume de resíduos em obra e se aumentou o controlo de qualidade dimensional. Estes dados sugerem que sistemas como o LSF e os painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente não são apenas alternativas “mais verdes”, mas também soluções operacionais mais eficientes, capazes de responder às condicionantes atuais do mercado da construção, marcado por prazos apertados, falta de mão de obra especializada e necessidade de maior produtividade. (CIQ, 2019) (Nunes & Cruz, 2021)

Finalmente, a comparação entre construção nova e reabilitação sustentável mostrada no terceiro caso de estudo sublinha o papel estratégico da intervenção no edificado existente. A análise de cenários demonstrou que, em muitos casos, a reabilitação orientada por critérios de sustentabilidade — com reforço da envolvente, melhoria de caixilharias e tratamento de pontes térmicas — apresenta um balanço ambiental e económico mais favorável do que a demolição e reconstrução, sobretudo quando se consideram os impactos associados à produção de novos materiais estruturais e à gestão de resíduos de construção e demolição. A redução de 40–50% das emissões associadas à fase de utilização do edifício, obtida através de medidas relativamente simples na envolvente, confirma que a reabilitação energética com materiais sustentáveis é um instrumento poderoso para cumprir as metas de descarbonização e prolongar a vida útil do parque edificado, preservando simultaneamente o património construído e a identidade urbana. (CIQ, 2019) (Nunes & Cruz, 2021)

Em síntese, os resultados alcançados mostram que: (i) os materiais tradicionais mantêm relevância quando analisados numa perspetiva de ciclo de vida e integração territorial; (ii) os materiais sustentáveis modernos e os sistemas industrializados oferecem ganhos claros ao nível do desempenho térmico, da redução de emissões e

da eficiência construtiva; e (iii) a reabilitação sustentável, apoiada em critérios de ACV e em soluções técnicas adequadas, constitui uma via essencial para compatibilizar as exigências de conforto e desempenho atuais com a necessidade de preservar e transformar o parque edificado existente. (CIQ, 2019) (Nunes & Cruz, 2021)

## **5.2 Discussão crítica**

Os resultados obtidos permitem responder de forma direta aos objetivos definidos na introdução: caracterizar a sustentabilidade dos materiais tradicionais, comparar o seu desempenho com soluções modernas sustentáveis e avaliar o potencial de sistemas industrializados na redução do impacto ambiental e na melhoria do conforto térmico e acústico. A análise desenvolvida nos capítulos anteriores evidencia que estes objetivos são parcialmente complementares e, por vezes, tensionam-se entre si, o que torna a discussão das soluções particularmente relevante para a prática de projeto. (Matos, 2015) (CIQ, 2019)

A transição para materiais sustentáveis e sistemas industrializados não é apenas uma questão técnica, mas uma necessidade estratégica diante das tendências demográficas e económicas atuais. A escassez de mão de obra qualificada no setor da construção, agravada pela crise demográfica e pela migração de jovens para outras áreas, torna cada vez mais imperativo procurar alternativas que reduzam a dependência de técnicos especializados e permitam acelerar o processo de obra. (CIQ, 2019)

Em termos ambientais, os materiais tradicionais de base mineral ou terrosa, como granito, xisto, adobe, taipa e BTC, apresentam, em geral, baixa energia incorporada e reduzida pegada de carbono, sobretudo quando utilizados com matéria-prima local e técnicas vernaculares. Contudo, a sua aplicação exige mão de obra especializada, maior tempo de execução e, em muitos casos, dificuldades de compatibilização com as exigências regulamentares atuais de desempenho térmico e acústico. Já as soluções sustentáveis industrializadas analisadas – painéis em betão ecoeficiente, sistemas com cortiça, Leca, ICF e Light Steel Framing – tendem a ter impactos de produção mais elevados, mas compensam através de melhor desempenho global, maior controlo de qualidade e redução de desperdícios em obra. (Matos, 2015) (CIQ, 2019)

Os sistemas industrializados, como o LSF, mostram-se particularmente adaptados a este cenário, pois permitem a produção em série, a redução de erros construtivos e a padronização de processos, o que minimiza o risco de atrasos e falhas em obra. Além disso, a possibilidade de pré-fabricar elementos em ambiente fabril, com maior controlo de qualidade, contribui para a redução de custos e para a melhoria da eficiência energética dos edifícios. A integração de materiais sustentáveis, como a cortiça expandida e a Leca, reforça ainda mais estas vantagens, permitindo soluções construtivas que são ao mesmo tempo mais eficientes e mais amigas do ambiente. (Matos, 2015) (CIQ, 2019)

Os resultados também confirmam que a adoção de materiais sustentáveis enfrenta barreiras que não são apenas técnicas. O custo inicial mais elevado de algumas soluções, a falta de mão de obra familiarizada com sistemas como o LSF ou o ICF e a resistência à mudança por parte de promotores e proprietários limitam a sua difusão, mesmo quando o desempenho ao longo do ciclo de vida é claramente mais favorável. Em paralelo, a ausência de literacia em ferramentas como a ACV e a leitura crítica de DAP dificulta a utilização informada das normas e certificações ambientais como suporte à decisão. (Matos, 2015)

Por outro lado, programas e políticas recentes, como Portugal 2030, PRR, Sustentável 2030 e iniciativas de digitalização e industrialização da construção, apontam para um contexto cada vez mais favorável à adoção destes sistemas, ao incentivar soluções de baixo carbono, pré-fabricação e reabilitação com materiais de alto desempenho. Este enquadramento político e económico pode funcionar como catalisador para a passagem da lógica de casos pontuais para uma utilização mais generalizada de sistemas construtivos sustentáveis. (Matos, 2015)

Deste modo, não se trata de substituir indiscriminadamente os materiais tradicionais, mas de os integrar com sistemas contemporâneos que permitam cumprir requisitos de conforto e eficiência energética, preservando sempre que possível o valor cultural e identitário das soluções vernaculares. (Matos, 2015) (CIQ, 2019)

### **5.3 Implicações para o projeto e para a prática profissional**

A integração de materiais sustentáveis e sistemas industrializados nas práticas de projeto e execução de obras tem implicações profundas para a indústria da construção. Os projetistas e engenheiros devem adaptar-se a novos métodos de trabalho, com maior utilização de ferramentas digitais e de modelação BIM, para garantir a compatibilidade entre os diferentes elementos pré-fabricados e otimizar a coordenação entre os intervenientes do projeto. (CIQ, 2019)

Para a prática de projeto em engenharia civil e arquitetura, os resultados desta dissertação sugerem que as decisões sobre materiais devem ser tomadas numa lógica multicritério: desempenho estrutural, térmico e acústico, impactos de ciclo de vida, custo global e contexto sociocultural. Na habitação nova, os sistemas industrializados em LSF ou em betão ecoeficiente, combinados com isolamentos em cortiça ou Leca, surgem como soluções particularmente competitivas; na reabilitação, a integração de materiais de base natural e sistemas leves permite melhorar o desempenho energético com intervenções menos intrusivas e mais compatíveis com o edificado existente. (Matos, 2015)

Para os empreiteiros e construtores, a adoção destas soluções representa uma mudança de paradigma, com menor necessidade de mão de obra especializada e maior dependência de equipamentos mecânicos e logística de transporte. No entanto, esta transição pode ser facilitada pela formação contínua e pela criação de parcerias com empresas de pré-fabricação. A integração destas soluções exige

também uma mudança cultural, com maior valorização da inovação e da eficiência, e uma adaptação das práticas de gestão de obra para lidar com a complexidade dos sistemas industrializados. (CIQ, 2019)

Esta perspectiva reforça o papel do projetista como mediador entre inovação tecnológica, regulamentação e expectativas dos utilizadores, exigindo competências em análise de ciclo de vida, leitura de DAP e compreensão das condicionantes construtivas reais. (Matos, 2015)

#### **5.4 Limitações do estudo**

Apesar dos resultados positivos obtidos, é importante reconhecer as limitações do estudo. A análise focou-se principalmente em soluções industrializadas e materiais sustentáveis, mas não considerou todas as variáveis de mercado, como o custo inicial dos materiais, a disponibilidade de mão de obra qualificada para a montagem de sistemas industrializados e a aceitação do mercado imobiliário por estas soluções. (CIQ, 2019)

Além disso, a aplicação destas soluções pode ser limitada em contextos urbanos com restrições patrimoniais ou em edifícios de grande porte, onde as soluções tradicionais ainda são preferidas por razões estéticas ou de compatibilidade estrutural. A falta de dados detalhados sobre o desempenho a longo prazo destas soluções e a necessidade de mais estudos comparativos entre diferentes sistemas construtivos também representam limitações importantes. (CIQ, 2019)

#### **5.5 Trabalhos futuros**

Para além da continuação da investigação sobre novos materiais sustentáveis e sistemas industrializados, são necessários estudos mais aprofundados sobre a aceitação destas soluções pelo mercado, a formação de mão de obra especializada e a adaptação das políticas públicas para incentivar a sua adoção.

A análise comparativa entre diferentes sistemas construtivos, em termos de custo, desempenho e impacto ambiental, poderá contribuir para a definição de diretrizes mais claras para a indústria da construção, promovendo a transição para modelos mais sustentáveis e eficientes. A investigação sobre a integração de materiais sustentáveis em diferentes contextos geográficos e culturais, bem como a avaliação do impacto social e económico destas soluções, são também áreas promissoras para futuros trabalhos.

## **6 CONCLUSÃO**

Esta dissertação contribui para o debate sobre a sustentabilidade na construção ao apresentar uma análise comparativa detalhada entre materiais tradicionais e soluções sustentáveis modernas, integrando critérios ambientais, técnicos e práticos. A aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a discussão das normas e certificações ambientais permitem evidenciar não apenas as diferenças de desempenho, mas também os desafios e oportunidades associados à adoção de materiais mais sustentáveis no contexto português.

A dissertação aqui apresentada teve como objetivo principal analisar o papel dos materiais de construção sustentáveis no contexto atual da indústria da construção, explorando como a sua adoção pode contribuir para a eficiência, a redução do impacto ambiental e a resposta aos desafios do setor, especialmente a escassez de mão de obra qualificada. Ao longo do trabalho, foram caracterizados os materiais tradicionais e sustentáveis, avaliado o seu desempenho ambiental, social e económico, e analisados diversos sistemas construtivos, como o Light Steel Framing, painéis pré-fabricados em betão ecoeficiente e soluções com cortiça.

Os resultados obtidos evidenciam que os materiais e sistemas construtivos sustentáveis representam uma resposta estratégica aos desafios atuais do setor, permitindo a produção em série, maior controlo de qualidade, redução de desperdícios e execução mais rápida das obras, sem comprometer o desempenho estrutural, térmico ou acústico dos edifícios. A integração destas soluções contribui para a descarbonização do parque edificado, melhora o conforto dos ocupantes e aumenta a durabilidade dos edifícios, ao mesmo tempo que minimiza o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida.

Os resultados evidenciam que o projetista desempenha um papel fundamental na promoção da sustentabilidade, ao integrar critérios de ciclo de vida, ler e interpretar declarações ambientais de produto (DAP) e orientar decisões que conciliem desempenho técnico, impacto ambiental e exigências do mercado. Esta postura crítica e informada é essencial para impulsionar a transformação do setor.

A transição para materiais sustentáveis e sistemas industrializados não é apenas uma questão técnica, mas uma necessidade diante das tendências demográficas e económicas atuais. A falta de mão de obra qualificada, agravada pela crise demográfica e pela migração de jovens, torna cada vez mais imperativo procurar alternativas que reduzam a dependência de técnicos especializados e contribuam para uma execução mais célere.

A integração de materiais sustentáveis e sistemas industrializados nas práticas de projeto e execução de obras tem implicações profundas para a indústria da construção, exigindo a adaptação de métodos de trabalho, maior utilização de ferramentas digitais e de modelação BIM, e uma mudança cultural com maior valorização da inovação e da eficiência.

Apesar dos resultados positivos obtidos, é importante reconhecer as limitações do estudo, como a falta de dados detalhados sobre o desempenho a longo prazo destas soluções e a necessidade de mais estudos comparativos entre diferentes sistemas construtivos. Para além da continuação da investigação sobre novos materiais sustentáveis e sistemas industrializados, são necessários estudos mais aprofundados sobre a aceitação destas soluções pelo mercado, a formação de mão de obra especializada e a adaptação das políticas públicas para incentivar a sua adoção.

Como perspetivas de desenvolvimento futuro, recomenda-se aprofundar estudos de caso reais com aplicação de ACV a edifícios completos, explorar a digitalização e a automação de processos de avaliação ambiental e investigar o impacto social da adoção de materiais sustentáveis, especialmente em contextos de reabilitação urbana e habitação social. Estas linhas de investigação poderão contribuir para uma construção mais sustentável, eficiente e inclusiva, alinhada com os desafios globais do século XXI.

Em suma, a adoção de soluções sustentáveis na construção representa hoje um eixo estratégico fundamental para responder aos desafios ambientais, sociais e económicos que o setor enfrenta. Este estudo reforça a importância de integrar inovação, eficiência e princípios de sustentabilidade no setor, contribuindo para um futuro mais resiliente.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AICCOPN. (2022). *Manual de inovação e sustentabilidade – Materiais de construção avançados: Os desafios e as soluções na reabilitação urbana 4.0.*

Amaral, L. (2024). *Avaliação de ciclo de vida, circularidade e sustentabilidade: O caso da Materia.* Indústria e Ambiente. Recuperado em 14/12/2025, de <https://www.industriaeambiente.pt/noticias/avaliacao-ciclo-vida-circularidade-sustentabilidade-caso-materia/>

Amorim Alves, E. M. (2024). Mitos e verdades sobre a construção em Light Steel Frame. LinkedIn. Recuperado de <https://www.linkedin.com/pulse/mitos-e-verdades-sobre-constru%C3%A7%C3%A3o-em-light-steel-frame-iwvhf/>

APCMC. (2018). Gama: Agregados Leves LECA®. Recuperado de [https://app.apcmc.pt/wp-content/uploads/lcca-2018\\_LD.pdf](https://app.apcmc.pt/wp-content/uploads/lcca-2018_LD.pdf)

Argex - Argila Expandida S.A. (2019). Lightweight Expanded Clay Aggregate: Environmental Product Declaration (EPD). Recuperado de [https://www.daphabitat.pt/assets/Uploads/dap/pdfs/f65f00447b/EPD\\_EN\\_Argex\\_Lightweight-Expanded-Clay-Aggregate.pdf](https://www.daphabitat.pt/assets/Uploads/dap/pdfs/f65f00447b/EPD_EN_Argex_Lightweight-Expanded-Clay-Aggregate.pdf)

Associação Passivhaus Portugal. (2025). 13CPH25 – Multipanel – Workshop. Recuperado de [https://passivhaus.pt/wp-content/uploads/2025/10/22out\\_MANHA\\_D\\_3\\_multipanel.pdf](https://passivhaus.pt/wp-content/uploads/2025/10/22out_MANHA_D_3_multipanel.pdf)

Azevedo, H. D. de S. (2010). *Reforço de estruturas de alvenaria de pedra, taipa e adobe com elementos de madeira maciça* (Dissertação de mestrado)

Bairras, A. M. V. (2016). *Análise de ciclo de vida de betão com agregados reciclados para aplicação estrutural* (Dissertação de mestrado). Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

Balkan, E., Erkan, K., & Salk, M. (2017). *Thermal conductivity of major rock types in western and central Anatolia regions, Turkey*

Barbhuiya, S., & Das, B. B. (2023). *Life cycle assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making*

Barrigón Morillas, J. M., Maderuelo-Sanz, R., Atanasio-Moraga, P., Gómez Escobar, V., Vélchez-Gímez, R., Rey Gozalo, G., & Montes Gonzálves, D. (2020). Virgin cork, a possible environmentally friendly by-product of the cork with acoustic properties for its use inside dwellings?

Bissoli-Dalvi, M., Martinez da Costa, L., Engel de Alvarez, C., & Gobbi, M. E. (2017). *Avaliação comparativa do índice de sustentabilidade da cerâmica e das rochas*

ornamentais através da ferramenta ISMAS. *Revista Ambiente Construído*, 17(4), 113–128

Bragança, L. (2024). Acelerando a transição da construção para a economia circular. *Edifícios e Energia*. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://edificioseenergia.pt/noticias/acelerando-a-transicao-da-construcao-para-a-economia-circular/>

Bricobutikk. (s.d.). Painel multi-camada acústico – Danofon e Acustidan. Recuperado de <https://www.bricobutikk.pt/products/painel-multi-camada-acustico-danofon-acustidan>

Caniato, M., Bettarello, F., Ferluga, A., Marsich, L., Schmid, C., & Fausti, P. (2017). Thermal and acoustic performance expectations on timber buildings

Castanhas, T. A. Q. (2020). *Aldeias do Xisto – Estratégias construtivas bioclimáticas contemporâneas de reabilitação* (Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa).

Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro. (2012). *Estudo dos materiais utilizados no setor da construção em Portugal* (Relatório OERCO2). OERCO2. Disponível em [https://oerco2.eu/wp-content/uploads/2013/02/1.2.1.-Report-Construction-materials-in-Portugal\\_PT.pdf](https://oerco2.eu/wp-content/uploads/2013/02/1.2.1.-Report-Construction-materials-in-Portugal_PT.pdf)

CIQ. (2019). Light Steel Framing (LSF). Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://www.ciq.pt>

COMPETE 2030. (2025, 19 de novembro). Casa do Futuro: Revolução na construção com impressão 3D e sustentabilidade. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://www.compete2030.gov.pt/comunicacao/casa-do-futuro-revolucao-na-construcao-com-impressao-3d-e-sustentabilidade/>

Cordeiro, A. I., Matos, A., & Alves, M. (2020/2021). Utilização da cortiça na construção sustentável

Cosentino, L., Fernandes, J., & Mateus, R. (2024). Fast-Growing Bio-Based Construction Materials as an Approach to Accelerate United Nations Sustainable Development Goals

COTEC Portugal. (2020). Novo modelo industrial de produção e os impactos da economia circular. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://cotecportugal.pt/pt/2020/novo-modelo-industrial-de-producao-e-os-impactos-da-economia-circular/>

CYPE. (s.d.). Análise do ciclo de vida. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://info.cype.com/pt/tema/analise-do-ciclo-de-vida/~>

Danosa. (s.d.). DANOFON: Painel multicamada para isolamento acústico a ruído aéreo. Recuperado de <https://www.danosa.com/pt-pt/produto/danofon/>

Demertzi, M., Sierra-Pérez, J., Paulo, J. A., Arroja, L., & Dias, A. C. (2017). Environmental performance of expanded cork slab and granules through life cycle assessment

EM Living. (s.d.). M-Tek. Recuperado de <https://em-living.com/brand/m-tek/>

Farcha, B. S., & Santiago, P. de A. C. (2024). *Bioconstrução: Revisão bibliográfica das técnicas e materiais*

FCT UNL. (2025). Materiais sustentáveis na construção: Da tradição à vanguarda tecnológica. Recuperado de <https://www.fct.unl.pt/noticias/newsletter/materiais-sustentaveis-na-construcao-da-tradicao-vanguarda-tecnologica>

Fernandes, J. E. P. (2012). O contributo da arquitectura vernacular portuguesa para a sustentabilidade dos edifícios (Dissertação de mestrado)

Fernandes, J. E. P. (2020). *Modelling the life cycle performance of Portuguese vernacular buildings: Assessment and contribution for sustainable construction* (Tese de doutoramento)

Fernandes, M. da C. L. A. (2013). *A cultura construtiva do adobe em Portugal* (Dissertação de mestrado)

Fokaides, P. A. (2025). *Development of a heritage life cycle assessment (H-LCA) framework: Integrating sustainability metrics and cultural preservation in heritage buildings*

Fortidomus. (s.d.). Durabilidade do Light Steel Framing. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://www.fortidomus.com/light-steel-framing/durabilidade/>

Fortidomus. (s.d.). Light Steel Framing: Eficiência Energética. Recuperado de <https://www.fortidomus.com/light-steel-framing/eficiencia-energetica>

Fuchsl, S., Rheude, F., & Roder, H. (2022). Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review

Fuentes Pardo, J. M. (2023). Challenges and current research trends for vernacular architecture in a global world: A literature review.

Ganhão, A. M. G. D. (2011). Construção sustentável: Propostas de melhoria da eficiência energética em edifícios de habitação (Dissertação de mestrado). Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Gonçalves, C. I. P. (2018). Reabilitação térmica e acústica de um edifício da década de 1980 utilizando cortiça (Dissertação de mestrado). Universidade do Porto, Porto, Portugal

Gonçalves, H., & Graça, J. M. (2004). *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal*

Grupo Casais. (s.d.). Manifesto pela construção. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://casais.pt/inovacao/manifesto-pela-construcao/>

Hu, M. (2023). Exploring low-carbon design and construction techniques: Lessons from vernacular architecture

Iberdrola. (s.d.). *O que é um Edifício Verde + 10 Edifícios Sustentáveis*. Recuperado de <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/edificios-verdes-sustentaveis>

ICF Plastbau Portugal. (s.d.). Sistema Construção ICF Plastbau Portugal - Somos Fabricantes. Recuperado de <https://icf-plastbau.pt/>

Idealista. (2024, 20 de maio). Construção em aço leve: prós e contras deste modelo de construção. Idealista Notícias. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://www.idealista.pt/news/immobiliario/construcao/2024/05/20/63398-construcao-em-aco-leve-as-vantagens-deste-modelo-de-construcao>

Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (s.d.). *Normais climatológicas*. Recuperado em 14/12/2025, de <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>

JNS Construções. (2025). Construção sustentável em Portugal: Guia completo 2025. Recuperado de <https://jnsconstrucoes.pt/construcao-sustentavel-em-portugal-guia-completo-2025/>

Koengkan, M., Fuinhas, J. A., Oliveira, F. P., Ursava, s, U., & Moreno, N. (2023). Building a sustainable future: How eco-friendly homes are driving local economic development in Lisbon Metropolitan Area. *Journal of Sustainable Development*, 16(2), 1–18.

Kuyrukçu, Z., & Kuyrukçu, E. Y. (2015). *The potential of vernacular materials to sustainable building design: Experience of construction design with adobe material*

Laranjeiro, T. J. de S. (2014). Aplicação de ferramenta de avaliação do ciclo de vida (LCA) em habitações em aço leve (LSF) (Dissertação de mestrado). Universidade da Beira Interior, Portugal.

LECA Portugal S.A. (2002). Estudo de Impacte Ambiental da Ampliação das Instalações da LECA: Resumo Não Técnico. Recuperado de <https://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA1011/RNT1011.pdf>

LECA. (2021). Sustainable Brochure: Expanded Clay Lightweight Aggregate. Recuperado de [https://www.leca.com/sites/leca.com/files/pdf/2021\\_Sustainable%20brochure.pdf](https://www.leca.com/sites/leca.com/files/pdf/2021_Sustainable%20brochure.pdf)

LECA. (s.d.). Sustentabilidade. Recuperado de <https://www.leca.pt/sustentabilidade>

Lopes, F. (2017). *Materiais de construção civil I*

M-TEK. (s.d.). M-TEK: Soluções de isolamento térmico. Recuperado de <https://em-living.com/brand/m-tek/>

Machado, R. A. (2014). Reabilitação de edifícios visando a eficiência energética (Dissertação de mestrado). Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

Marques, A. C. A. S. (2010). *A tradição da madeira na actualidade – Noruega e Portugal* (Dissertação de mestrado)

Marques, L. M. da S. (2017). Construir em madeira. Uma proposta de habitação (Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa)

Martins, B., Lopes, J. C., & Mendes, I. (2023). Circular economy in the construction sector: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135678

Martins, G. (2024). Light Steel Framing: Construção sustentável em aço leve. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de [https://vidaimobiliaria.com/documents/314/Goncalo\\_MartinsLSF\\_100424\\_compressed.pdf](https://vidaimobiliaria.com/documents/314/Goncalo_MartinsLSF_100424_compressed.pdf)

Materiais para Obras. (s.d.). Comparando materiais tradicionais vs. materiais sustentáveis. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://materiaisparaobras.com.br/comparando-materiais-tradicionais-vs-materiais-sustentaveis-2/>

Mateus, D. (2025). Influência da aplicação de ETICS no reforço de isolamento acústico em fachadas. *Construção Magazine*. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://www.construcaomagazine.pt/noticias/aplicacao-de-etics-no-reforco-de-isolamento-acustico-em-fachadas/>

Mateus, R. (2004). *Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção*

Matos, V. C. G. N. D. (2015). Edifícios de energia quase zero: A cortiça como caso de estudo (Dissertação de mestrado). Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

Mazoni, I., & Tabora dos Santos, A. (2024). Comparação de materiais na engenharia civil: Desempenho e sustentabilidade de estruturas de concreto, metal e madeira

Mello, J. L. A., Vieira, L. M., & Gitahy, P. F. S. C. R. (2019). Uma comparação entre bioconstrução e construção tradicional: análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental. VII Encontro de Sustentabilidade em Projeto – UFSC, Florianópolis, 8–10 de maio. Recuperado de <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/244753>

Miranda, M. A. M. (2014). *Propriedades termofísicas em rochas graníticas – O caso da sondagem profunda de Almeida* (Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra).

Miscevic, L., Pecur, I. B., & Milovanovic, B. (s.d.). Passive House and Eco-Sandwich Eu Eco innovation Project for Facade Panels

Monteiro da Silva, S., & Guedes de Almeida, M. (2010). Thermal and acoustic comfort in buildings

Monteiro da Silva, S., & Guedes de Almeida, M. (2010). Thermal and acoustic comfort in buildings. *Building Research & Information*, 38(5), 517–526

Moreira, M. A. N. T. (2017). *Arquitetura e pré-fabricação – A expressividade dos sistemas construtivos em madeira maciça* (Dissertação de mestrado, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto)

Moura, A. C. (Ed.). (2000). *Granitos e rochas similares de Portugal*. Instituto Geológico e Mineiro.

Multipanel. (2019). MultiZero panel joining forces together with URSA XPS. Recuperado de <https://multipanel.es/en/blog/multizero-panel-joining-forces-together-with-ursa-xps/>

Multipanel. (2024). MultiZero - Multipanel. Recuperado de <https://multipanel.es/en/products/multizero/>

Multipanel. (s.d.). MultiCover. Recuperado de <https://multipanel.es/en/products/multicover/>

Nasir, O., & Kamal, M. A. (2021). *Vernacular architecture as a design paradigm for sustainability and identity: The case of Ladakh, India*

Nemcsics, Á., Urmos, A., & Groller, G. (2023). *Rethinking of the vernacular adobe architecture rehabilitations*

Neves, S. da C. de M. (2011). Estudo da aplicabilidade de sistemas construtivos no desempenho da sustentabilidade na engenharia civil (Dissertação de mestrado). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal

Nina, J. F., & Eires, R. M. G. (2022). *Durabilidade da construção em terra – Contributo para uma melhor aceitação deste material sustentável*

Nudurabyconstreco. (2025). *Materiais de Construção Sustentáveis: Tendências e Inovações*. Recuperado de <https://nudurabyconstreco.pt/blog/materiais-de-construcao-sustentaveis-2025/>

Nunes, Â., & Cruz, C. (2021). Avaliação do ciclo de vida de edifícios. *Revista Ambiente Construído*, 21(3), 1–20

Nunes, P. A. da P. (2015). *Afinal, o que é a sustentabilidade na construção?*

Nuno Filipe Godinho Teodoro. (2011). Contribuição para a Sustentabilidade na Construção Civil: Reciclagem e Reutilização de Materiais. Outubro 2011

Obras360. (s.d.). Painel Sandwich Cobertura Thermochip TAH Friso Abeto Sem Verniz (Natural). Recuperado de <https://www.obras360.pt/0190040024tc-painel-thermochip-tah-abeto-sem-verniz-natural>

Obras360. (s.d.). Painel Sandwich Cobertura Thermochip TKH Acústico com Aparas de Madeira e Magnesita. Recuperado de <https://www.obras360.pt/0190040003tc-painel-thermochip-tkh-acustico-com-apanas-de-madeira-e-magnesita>

Obras360. (s.d.). Painel Sandwich Thermochip. Recuperado de <https://www.obras360.pt/002019004-paineis-thermochip>

Oliveira, E. V. de, & Galhano, F. (2020). *Arquitetura tradicional portuguesa*

Ornek, E. (2019). *Sustainable characteristics of the vernacular house and its impact to the building physics*

Pacheco Torgal, F., & Jalali, S. (2010). *A sustentabilidade dos materiais de construção*

Pacheco Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Considerações sobre a sustentabilidade dos materiais de construção.

Pargana, N. G. S. C. (2012). Environmental impacts of the life cycle of thermal insulation materials of buildings.

Peixoto, M. A. M. (2008). *Avaliação do ciclo de vida de materiais e soluções construtivas utilizadas na construção tradicional portuguesa* (Dissertação de mestrado)

Pereira, M. L. F. (2015). *Caraterização térmica de soluções construtivas em xisto e em granito* (Dissertação de mestrado)

Plataforma para a Construção Sustentável. (s.d.). *Estudo de Mercado e Inovação sobre Materiais para a Construção Sustentável*

Poliespanso. (n.d.). Sistema Construtivo – ICF - Poliespanso®. Recuperado de <https://www.poliespanso.pt>

Portal da Construção Sustentável. (n.d.). Portal da Construção Sustentável. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://csustentavel.com/>

Portal da Construção Sustentável. (s.d.). Argila Expandida LECA. Recuperado de <https://csustentavel.com/leca-pt/ecoproduto/argila-expandida-leca/>

Portal da Construção. (s.d.). *Construção e Materiais – Volume VII – Materiais de construção*

Portal da Transparência. (2025). Projeto: Fabricação orientada para resiliência e modularidade arquitetônica. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://transparencia.gov.pt/pt/fundos-europeus/pt2030/beneficiarios-projetos/project/NORTE2030-FEDER-02698300/>

Portugal 2030. (2023, 29 de novembro). Apresentado o Sustentável 2030 com mais de 31 mil milhões de euros para a ação climática e sustentabilidade. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://portugal2030.pt/2023/11/29/apresentado-o-sustentavel-2030-com-mais-de-31-mil-milhoes-de-euros-para-a-acao-climatica-e-sustentabilidade/>

Portugal 2030. (2023, 29 de novembro). Apresentado o Sustentável 2030 com mais de 31 mil milhões de euros para a ação climática e sustentabilidade. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://portugal2030.pt/2023/11/29/apresentado-o-sustentavel-2030-com-mais-de-31-mil-milhoes-de-euros-para-a-acao-climatica-e-sustentabilidade/>

Portugal 2030. (n.d.). Programas. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://portugal2030.pt/programas/>

Portugal. Governo. *Estratégia Portugal 2030 – Documento de enquadramento estratégico.*

Portugal. Ministério do Ambiente. (2015, 25 de novembro). *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)*

Projeto EnerBuiLCA. (2012). Manual explicativo da avaliação de ciclo de vida aplicado ao setor da construção. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <http://www.interreg-sudoe.eu>

Projeto reVer. (s.d.). *Avaliação de ciclo de vida.* Recuperado em 14/12/2025, de <http://www.rever.pt/investigacao/avaliacao-de-curso-de-vida/>

Rego, D. J. M. (2012). *Light Steel Framing structures for buildings* (Dissertação de mestrado). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal

Sampaio, L. P. (2017). *A sustentabilidade na reabilitação de um edifício habitacional – caso de estudo* (Dissertação de mestrado). Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Santos, J. F. (2023). *Um projeto para Vila Nova de Cerveira: O percurso pela construção em madeira* (Dissertação de mestrado, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto)

Science Granting Councils Initiative in Sub-Saharan Africa. (s.d.). *Aproveitamento de materiais tradicionais para um desenvolvimento inteligente do ponto de vista climático no Gana*. Recuperado em 14/12/2025, de <https://sgciafrica.org/pt/aproveitamento-de-materiais-tradicionais-para-um-desenvolvimento-inteligente-do-ponto-de-vista-climatico-no-gana/>

SECIL. (s.d.). Sistema de Isolamento com Cortiça À Vista. Recuperado de <https://www.secil.pt/pt/solucoes/construcao-nova/isolamento-termico/sistema-de-isolamento-com-cortica-a-vista>

Sequeira, C., Miranda, I., Lourenço, A., Knapic, S., Skulska, I., Athayde, J., & Colaço, C. (n.d.). Fachadas de cortiça: desempenho, qualidade ambiental e perceção do público

SGA Ambiente. (s.d.). *Projetos sobre sustentabilidade no setor da construção: Proptech Innovation e Habitat Sustentável levam equipa do Programa Ambiente dos EEA Grants Portugal a Bergen, Noruega*. Recuperado de <https://www.sgambiente.gov.pt/projetos-sobre-sustentabilidade-no-setor-da-construcao-proptech-innovation-e-habitat-sustentavel-levam-equipa-do-programa-ambiente-dos-eea-grants-portugal-a-bergen-noruega/>

Sigma Earth. (n.d.). Materiais de construção tradicionais versus sustentáveis: custo e desempenho. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://sigmaearth.com/pt/traditional-vs-sustainable-building-materials-cost-and-performance/>

Silva, L. F. M. da, Alves, J. L., & Marques, A. T. (2023). *Materiais de construção – 2ª Edição*

Silva, M. F. C. G. da. (2015). *Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios* (Dissertação de mestrado)

Silvestre, J. D., Pargana, N., Brito, J. de, Pinheiro, M. D., & Durão, V. (2016). Insulation Cork Boards – Environmental Life Cycle Assessment of an Organic Construction Material

Sousa, D. L. P. de, Nobre, J. C. de A., Borges, L. dos S., & Andrade, L. C. F. (2023). Desempenho térmico de materiais tradicionais, ecológicos e alternativos para fins de climatização de ambientes. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 14(1), 1–15

Souza, G. T. de, & Oliveira, P. P. (2024). *Inovações e tendências de materiais sustentáveis na construção civil: Uma revisão bibliográfica*

Studio Nobel. (1994). Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente.

Supercasa. (2025). Construção sustentável em 2025: Principais tendências. Recuperado de <https://supercasa.pt/noticias/construcao-sustentavel-em-225-principais-tendencias/n6261>

Termobox. (n.d.). Sistema de Construção ICF - Termobox. Recuperado de <https://www.termobox.pt>

Thermochip. (2018). O primeiro painel sandwich pré-fabricado com fibra de madeira: Catálogo Thermochip WF. Recuperado de <https://www.thermochip.com/wp-content/uploads/2018/09/catalogo-thermochip-wf-pt.pdf>

Thermochip. (s.d.). THERMOCHIP TKH – Heráklit. Recuperado de <https://www.thermochip.com/pt/producto/tkh-heraklit/>

Thermochip. (s.d.). THERMOCHIP TOH – OSB3. Recuperado de <https://www.thermochip.com/pt/producto/toh-osb3/>

Thermochip. (s.d.). Thermochip: Soluções de isolamento térmico. Recuperado de <https://www.thermochip.com/pt/>

Torres, E. V. (2021). *Ligações estruturais de madeira segundo o novo Eurocódigo 5* (Dissertação de mestrado, Universidade do Minho)

Umbloco. (s.d.). *Processos e Sistemas para Inovação na Construção Civil*. Recuperado de <https://umbloco.com/f/innovative-construction-techniques-for-modern-projects>

Universidade do Minho. (2014). *Materiais de Construção Sustentáveis – Volume 3*

Vagtholm, R., Matteo, A., Vand, B., & Tupenaite, L. (2023). Evolution and current state of building materials, construction methods, and building regulations in the U.K.: Implications for sustainable building practices.

Varum, H., Costa, A., Silveira, D., Oliveira, C., & Figueiredo, A. (2010). *Caraterização mecânica e reforço de construção em alvenaria de adobe*

World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). *Our common future*. Oxford University Press.

Portugal. Ministério do Ambiente. (2013, 3 de dezembro). *Zoneamento climático*

Ferreira, M. S. M. (2014, janeiro). *O sistema construtivo com estrutura leve em aço*

Ferreira, J. V. (2015, julho). *Gestão Ambiental – Análise de Ciclo de Vida*

ADENE. (2020, março). *Guia SCE – Conceitos e Definições (REH)*

Município de Palmela. (2021, junho). *Manual da construção sustentável*.

Diasen. (12/01/2023). *Isolamento Cortiça: o material nobre do conforto*. Recuperado de <https://www.diasen.com/pt-pt/isolamento-cortica/>

LECA. (01/06/2023). *Argila expandida LECA*. Recuperado de <https://www.leca.pt/noticias/argila-expandida-leca>

Marques, S. (2023, 7 de fevereiro). *Casas: Vantagens de construir em aço leve / LSF (Light Steel Frame)*. O Sesimbrense. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://osesimbrense.pt/2023/02/07/casas-vantagens-de-construir-em-aco-leve-lsf-light-steel-frame/>

Porto, Rodolfo. (31/07/2023). *6 Materiais de Construção Inovadores*. Recuperado de <https://dtlx.pt/artigos/6-materiais-de-construcao-inovadores/>

Cardoso Botelho, José. (10/07/2024). *Revolução verde e digital no imobiliário: desafios e oportunidades de Portugal no horizonte 2030*. Imobiliário Público. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://imobiliario.publico.pt/opiniao/revolucao-verde-digital-imobiliario-desafios-oportunidades-portugal-horizonte-2030/>

LECA. (23/09/2024). *Argila expandida na construção civil*. Recuperado de <https://www.leca.pt/noticias/argila-expandida-construcao-civil>

Frazão Pedroso, Marco, (8/11/2024). *Construção sustentável: Um pilar estratégico para Portugal*. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://aecycle.pt/noticias/construcao-sustentavel-um-pilar-estrategico-para->

Lage, Nelson. (12/02/2025). *Construção sustentável: O caminho para um futuro resiliente e competitivo*. Imobiliário Público. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://imobiliario.publico.pt/opiniao/construcao-sustentavel-caminho-futuro-resiliente-competitivo/>

Notícias ao Minuto. (17/02/2025). Setor da construção enfrenta "desafios sem precedentes". Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://www.noticiasao minuto.com/economia/2729631/setor-da-construcao-enfrenta-desafios-sem-precedentes>

LECA. (19/03/2025). LECA: 55 anos de inovação e sustentabilidade na construção. Recuperado de <https://www.leca.pt/noticias/leca-55-anos-de-inovacao-e-sustentabilidade-na-construcao>

Amorim Cork Solutions, (junho 2025). Casa da Levada: Conceito de “Natural Construído” com cortiça expandida. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://amorimcorksolutions.com/pt/centro-de-informa%C3%A7%C3%A3o/casos-de-estudo/casa-da-levada-portugal/>

*Ecosativa. (2025, julho). Aditamento ao estudo de Impacte ambiental*

Portugal 2030. (2025, 8 de agosto). Next Generation MC: Aposta na digitalização dos materiais de construção para reduzir custos da habitação. Recuperado em 14 de dezembro de 2025, de <https://portugal2030.pt/2025/08/08/next-generation-mc-aposta-na-digitalizacao-dos-materiais-de-construcao-para-reduzir-custos-da-habitacao/>

Echave Arquitetura. (21/08/2025). Materiais ecológicos para construção. Recuperado de <https://echavearquitetura.pt/materiais-ecologicos-para-construcao/>





**Instituto Superior  
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra