Lusíada
Repositório das Universidades Lusíada

Universidades Lusíada

Augusto, Carlos Alberto de Oliveira 1962-

A arquitetura na transição para a construção circular em Portugal : teoria, metodologia e prática

http://hdl.handle.net/11067/8444

Metadados

Data de Publicação 2026-01-23

Resumo O paradigma da economia circular, apesar de já formalmente enunciado e adotado ao mais alto nível, não se encontra ainda satisfatoriamente disseminado e implementado. No caso concreto da arquitetura, o modo como concebemos, fabricamos e executamos os nossos materiais, edifícios e cidades reflete-se ainda na fraca qualificação do ambiente construído, em temos de energia incorporada e da eficiência energética, mas também no que respeita à temática da depleção dos recursos naturais, da poluição e d...

Although formally announced and adopted at the highest level, the circular economy paradigm has not yet been satisfactorily disseminated and implemented. In the specific case of architecture, the way we design, manufacture and execute our materials, buildings and cities is still reflected in the poor quality of the built environment, in terms of embodied energy and energy efficiency, but also in terms of the depletion of natural resources, pollution and associated waste, as well as the physical ...

Palavras Chave Edifícios Sustentáveis, Construção sustentável, Materiais de Construção - Aspectos Ambientais, Arquitectura sustentável, Desenvolvimento sustentável

Tipo doctoralThesis

Revisão de Pares Não

Coleções [ULL-FAA] Teses

Esta página foi gerada automaticamente em 2026-10-29T21:02:08Z com informação proveniente do Repositório

http://repositorio.ulusiada.pt

UNIVERSIDADE LUSÍADA

FACULDADE DE ARQUITETURA E ARTES

Doutoramento em ARQUITETURA

A arquitetura na transição para a construção circular em Portugal: teoria, metodologia e prática

Realizado por:
Carlos Alberto de Oliveira Augusto

Orientado por:
Professor Doutor Arqt. Alberto Cruz Reaes Pinto

Constituição do Júri:

Presidente:	Professor Doutor Afonso Filipe Pereira d'Oliveira Martins
Orientador:	Professor Doutor Arqt. Alberto Cruz Reaes Pinto
Arguente:	Professor Doutor Arqt. Miguel José das Neves Pires Amado
Arguente:	Professora Doutora Arqt.ª Teresa Marat-Mendes
Vogal:	Professor Doutor Arqt. Filipe Alexandre Duarte Gonzalez Migães de Campos
Vogal:	Professora Doutora Arqt.ª Helena Cristina Caeiro Botelho

Dissertação aprovada em: 23 de janeiro de 2026

Tese reformulada

Lisboa

2025

UNIVERSIDADE LUSÍADA

FACULDADE DE ARQUITETURA E ARTES

Doutoramento em Arquitetura

A arquitetura na transição para a construção circular em Portugal: teoria, metodologia e prática

Carlos Alberto de Oliveira Augusto

Tese reformulada
Lisboa

Setembro 2025

UNIVERSIDADE LUSÍADA

FACULDADE DE ARQUITETURA E ARTES

Doutoramento em Arquitetura

A arquitetura na transição para a construção circular em Portugal: teoria, metodologia e prática

Carlos Alberto de Oliveira Augusto

Tese reformulada
Lisboa

Setembro 2025

Carlos Alberto de Oliveira Augusto

A arquitetura na transição para a construção circular em Portugal: teoria, metodologia e prática

Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e Artes da Universidade Lusíada para a obtenção do grau de Doutor em Arquitetura.

Orientador: Professor Doutor Arqt. Alberto Cruz Reaes Pinto

Tese reformulada
Lisboa

Setembro 2025

FICHA TÉCNICA

Autor Carlos Alberto de Oliveira Augusto

Orientador Professor Doutor Arqt. Alberto Cruz Reaes Pinto

Título A arquitetura na transição para a construção circular em Portugal: teoria, metodologia e prática

Local Lisboa

Ano 2025

CASA DO CONHECIMENTO DA UNIVERSIDADE LUSÍADA - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

AUGUSTO, Carlos Alberto de Oliveira, 1962-

A arquitetura na transição para a construção circular em Portugal : teoria, metodologia e prática / Carlos Alberto de Oliveira Augusto ; orientado por Alberto Cruz Reaes Pinto. - Lisboa : [s.n.], 2025. - Tese de Doutoramento em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Artes da Universidade Lusíada.

I - PINTO, Alberto Reaes, 1932-

LCSH
1. Edifícios sustentáveis
2. Construção sustentável
3. Materiais de construção - Aspetos ambientais
4. Arquitetura sustentável
5. Desenvolvimento sustentável
6. Universidade Lusíada. Faculdade de Arquitetura e Artes - Teses
7. Teses - Portugal - Lisboa

1. Sustainable buildings
2. Sustainable construction
3. Building materials - Environmental aspects
4. Sustainable architecture
5. Sustainable development
6. Universidade Lusíada. Faculdade de Arquitetura e Artes - Dissertations
7. Dissertations, Academic - Portugal - Lisbon

LCC
1. TH880.A94 2025

AVISO LEGAL

O conteúdo desta tese reflete as perspetivas, o trabalho e as interpretações do autor no momento da sua entrega. Esta tese pode conter incorreções, tanto conceptuais como metodológicas, que podem ter sido identificadas em momento posterior ao da sua entrega. Por conseguinte, qualquer utilização dos seus conteúdos deve ser exercida com cautela. Ao entregar esta tese, o autor declara que a mesma é resultante do seu próprio trabalho, contém contributos originais e são reconhecidas todas as fontes utilizadas, encontrando-se tais fontes devidamente citadas no corpo do texto e identificadas na secção de referências. O autor declara, ainda, que não divulga na presente tese quaisquer conteúdos cuja reprodução esteja vedada por direitos de autor ou de propriedade industrial.

Esta tese foi realizada na qualidade de Bolseiro de Investigação e financiada pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P., no âmbito do Projeto <UIDB/04026/2020> com o identificador DOI <10.54499/UIDB/04026/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/04026/2020), da Unidade de Investigação CITAD – Centro de Investigação em Território, Arquitetura e Design e da Bolsa de Investigação Ref.ª BID_CITAD_UI4026/2020_ConstruçãoCircular, correspondente ao Projeto de Investigação “Construção Circular para a Sustentabilidade da Habitação em Portugal”.

- Este trabalho foi elaborado sem recorrer a Inteligência Artificial -

AGRADECIMENTOS

No decurso desta etapa gostaria de expressar a minha gratidão a todos aqueles que, de um modo ou outro, contribuíram para que este projeto se tornasse uma realidade

Em primeiro lugar, ao meu mentor e orientador Professor Doutor Arq. Alberto Reaes Pinto, responsável máximo pelo percurso académico que me trouxe até aqui, e sem o qual nada teria sido possível.

Este agradecimento é extensível à FCT- Fundação para a Ciência e Tecnologia, pela bolsa concedida no âmbito do Projeto de Investigação "Construção Circular para a Sustentabilidade da Habitação em Portugal", ao ILID – Instituto Lusíada de Investigação e Desenvolvimento, aos docentes do Curso Doutoral em Arquitetura e aos meus colegas do CITAD – Centro de Investigação em Território, Arquitetura e Design, pela ajuda prestada sempre que solicitado.

Um agradecimento muito especial à equipa da Casa do Conhecimento, da Universidade Lusíada, na pessoa do Dr. Hélder Machado e da Técnica de Informação e Referência Catarina Graça, pelo inestimável contributo e sem o qual o presente trabalho não poderia ter tomado a devida forma.

Finalmente à minha família, por toda a resiliência demonstrada ao longo destes últimos e difíceis anos, provando que o Amor é sempre mais forte! Do mesmo modo, uma menção a todos os familiares e amigos, que com o seu auxílio material, profissional ou anímico possibilitaram que, contra todas as expetativas, este projeto de vida fosse concluído.

“Mudam-se os tempos, mudam-se as vontades,
Muda-se o ser, muda-se a confiança:
Todo o mundo é composto de mudança,
Tomando sempre novas qualidades.”

Luís Vaz Camões

“The mission of an architect is to help people understand how to make life more beautiful, the world a better one for living in, and to give reason, rhyme, and meaning to life.”

Frank Lloyd Wright

“L'arquitecte del futur es basarà en la imitació de la naturalesa, perquè és la forma més racional, duradora i econòmica de tots els mètodes.”

Antoni Gaudí

APRESENTAÇÃO

A arquitetura na transição para a construção circular em Portugal: teoria, metodologia e prática

Carlos Alberto de Oliveira Augusto

O paradigma da economia circular, apesar de já formalmente enunciado e adotado ao mais alto nível, não se encontra ainda satisfatoriamente disseminado e implementado. No caso concreto da arquitetura, o modo como concebemos, fabricamos e executamos os nossos materiais, edifícios e cidades reflete-se ainda na fraca qualificação do ambiente construído, em temos de energia incorporada e da eficiência energética, mas também no que respeita à temática da depleção dos recursos naturais, da poluição e dos resíduos associados, assim como do bem-estar físico e mental dos utentes e habitantes.

A conceção e a construção de edifícios, para além do intemporal diálogo entre a arte e a técnica, deve respeitar também a dialética entre a Humanidade e a Natureza, como foi apanágio no passado e condição para o futuro, indo ao encontro dos princípios do desenvolvimento sustentável. É nossa intenção salientar a importância extrema dos atos de projetar, construir e desconstruir edifícios e infraestruturas para a saúde planetária, da qual depende a nossa qualidade de vida.

Gostaríamos que este documento pudesse ser útil para a arquitetura do nosso tempo, e no nosso país, para o qual este trabalho tem a veleidade de poder vir a ser um singelo contributo em relação a todos aqueles que entendam dever adaptar a sua atividade, com vista a integrar os princípios da sustentabilidade e da construção circular.

Palavras-chave: Arquitetura, Sustentabilidade, Construção circular, Materiais renováveis, Captura e armazenamento de carbono.

PRESENTATION

Architecture in the Transition to Circular Construction in Portugal: Theory, Methodology and Practice

Carlos Alberto de Oliveira Augusto

Although formally announced and adopted at the highest level, the circular economy paradigm has not yet been satisfactorily disseminated and implemented. In the specific case of architecture, the way we design, manufacture and execute our materials, buildings and cities is still reflected in the poor quality of the built environment, in terms of embodied energy and energy efficiency, but also in terms of the depletion of natural resources, pollution and associated waste, as well as the physical and mental well-being of users and inhabitants.

The design and construction of buildings, in addition to the timeless dialogue between art and technique, must also respect the dialectic between Humanity and Nature, as was the norm in the past and a condition for the future, in line with the principles of sustainable development. It is our intention to emphasise the extreme importance of the acts of designing, constructing and deconstructing buildings and infrastructure for the sake of the planetary health, on which our quality of life depends.

We hope that this document will be useful for the architecture of our time and in our country, for which this work aims to be a simple contribution to all those who understand that they must adapt their activity to integrate the principles of sustainability and circular construction.

Keywords: Architecture, Sustainability, Circular Construction, Renewable Materials, Carbon Capture and Storage

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 – Estrutura conceptual da tese. (Ilustração nossa, 2025) 47

Ilustração 2 – Diferenças fundamentais entre os conceitos de desenvolvimento sustentável e sustentabilidade. (Edwards, 2008, p. 11) 53

Ilustração 3 – Relação entre o Produto Interno Bruto Global e a Pegada Ecológica. (Bauwens, 2021, p. 2). 57

Ilustração 4 – As quatro dimensões do desenvolvimento sustentável, (König *et al.*, 2010, p. 9) 58

Ilustração 5 – Desenvolvimento sustentável e a sua relação com a arquitetura. (Edwards, 2008, p. 20) 60

Ilustração 6 – As três dimensões da sustentabilidade na prática do edificado. (Hegger *et al.*, 2008, p. 192) 61

Ilustração 7 – Logotipo dos ODS. ([Adaptado a partir de:] United Nations Global Compact, 2015, p. 1) 64

Ilustração 8 – Emissões de carbono equivalente passadas e projeções futuras. (ARUP e WBCSD, 2023, p. 10) 65

Ilustração 9 – Relação entre os ODS e as atividades da construção e do imobiliário. (Goubran, 2019, p. 18) 67

Ilustração 10 – A economia circular e a relação com a sustentabilidade. (Hysa *et al.*, 2020, p. 3) 70

Ilustração 11 – Economia circular e economia verde. ([Adaptado a partir de:] European Environment Agency *et al.*, 2016, p. 31) 71

Ilustração 12 –Butterfly Diagram (diagrama borboleta) do sistema da economia circular.(Ellen MacArthur Foundation, 2023) 72

Ilustração 13 – Diagrama de Sankey relativo ao fluxo de materiais na União Europeia (EU 27) em 2010, em milhares de toneladas. Em destaque a circularidade dos materiais. ([Adaptado a partir de:] Eurostat, 2023) 74

Ilustração 14 – Diagrama de Sankey relativo ao fluxo de materiais na União Europeia (EU 27) em 2021, em milhares de toneladas. Em destaque a circularidade dos materiais. ([Adaptado a partir de:] Eurostat, 2023) 74

Ilustração 15 – Fluxo de materiais na economia linear. (Anastasiades *et al.*, 2020, p. 3) 76

Ilustração 16 – Fluxo de materiais na economia circular (EC). (Anastasiades *et al.*, 2020, p. 3) 77

Ilustração 17 – Fluxo de materiais numa economia circular: a biosfera como fornecedora da tecnoesfera. (Geldermans, 2016, p. 302) 78

Ilustração 18 – Fluxo de materiais na economia circular *bio-based*. (Anastasiades *et al.*, 2020, p. 4) 79

Ilustração 19 – O Sol como fonte das energias primárias renováveis. (Behling e Behling, 2002, p. 28) 80

Ilustração 20 – O papel das energias renováveis no sistema da economia circular. (Palmitessa, 2019) 81

Ilustração 21 – Torres eólicas fabricadas com madeira LVL. (Modvion, 2023) 82

Ilustração 22 – Ecopolis: o papel das energias renováveis numa cidade regenerativa. (Girardet, 2023, p. 7)..... 84

Ilustração 23 – Biomimética, biomorfismo e bioutilização como variantes do *bioinspired design*. (The Biomimicry Institute, 2023) 85

Ilustração 24 – O fémur humano foi a inspiração para a estrutura dos pilares principais da Torre Eiffel. (Jamei e Vrcelj, 2021, p. 14). 86

Ilustração 25 – Uma esponja marinha como inspiração para The Gherkin. ([Adaptado a partir de:] Biju, 2022)..... 87

Ilustração 26 – Modelo de arrefecimento e ventilação natural no Eastgate Centre. ([Adaptado a partir de:] Biju, 2022; Pearce, 2021) 87

Ilustração 27 – Estado das políticas e estratégias de desenvolvimento da bioeconomia na Europa Ocidental em 2017. ([Adaptado a partir de:] Birner, 2018, p. 21) 89

Ilustração 28 – Principais tipos de matérias-primas utilizadas pelo setor da construção em alguns países da UE e UK, incluindo Portugal (Herczeg *et al.*, 2014, p. 22) 89

Ilustração 29 – Materiais de construção provenientes da biomassa como produtos inovadores e de valor acrescentado.(Maximo *et al.*, 2022, p. 5) 90

Ilustração 30 – Vários tipos de madeira engenheirada ou *engineered wood*. ([Adaptado a partir de:] Verkerk *et al.*, 2021, p. 19)..... 91

Ilustração 31 – Construção em CLT do edifício principal da Redbridge School, em Lisboa. (Ilustração nossa, 2018)..... 92

Ilustração 32 – Ecoeficiência: correlação negativa entre recursos naturais e qualidade de vida. (Lehni, 2001, p. 23) 93

Ilustração 33 – Os três níveis da EI e respetivas ferramentas e iniciativas. (Lifset e Graedel, 2002, p. 10)..... 94

Ilustração 34 – As características da i5.0. (Breque, De Nul e Petridis, 2021, p. 13)... 98

Ilustração 35 – Construção 4.0 e a economia circular (Craveiro *et al.*, 2019, p. 253) 101

Ilustração 36 – A abordagem de ciclo de vida aplicada ao ambiente contruído. (Sustainable Facilities Tool, 2023)..... 102

Ilustração 37 – Esquema simplificado da abordagem de ciclo de vida de um edifício. (Feller, 2017) 103

Ilustração 38 – A importância da abordagem de ciclo de vida na avaliação ambiental de edifícios. (Crawford, 2011, p. 75) 104

Ilustração 39 – Relação entre fases de ciclo de vida e o conceito *Cradle-to-Cradle*. (Bragança e Mateus, 2011, p. 11)..... 105

Ilustração 40 – *Cradle-to-Cradle* como agente central da economia circular e da Indústria 5.0. (EPEA GmbH, 2023) 106

Ilustração 41 – Os ciclos biológico e técnico segundo o modelo C2C. ([Adaptado a partir de]: William McDonough + Partners, 2023)..... 107

Ilustração 42 – As cinco categorias e os Five Goods da certificação C2C. ([Adaptado de:] Rangel, 2020; Schickedantz, 2019, p. 3)..... 108

Ilustração 43 - Edifícios como árvores. (William McDonough + Partners, 2023) 108

Ilustração 44 – Principios C2C aplicados no Grünewald District. (William McDonough + Partners, 2020, pp. 27, 28) 109

Ilustração 45 – LCSA como apoio à tomada de decisão entre dois sistemas estruturais. ([Adaptado de:] Tokede *et al.*, 2022, p. 7) 111

Ilustração 46 – Percentagem das emissões de carbono incorporado do setor da construção, face às emissões globais.(One Click LCA, 2021, p. 6)..... 112

Ilustração 47 – Ciclo de vida do ambiente construído no contexto da economia circular. (Haoran Lei *et al.*, 2021, p. 9) 114

Ilustração 48 – Adaptação do modelo linear da LCA à economia circular. (Lausselet *et al.*, 2023, p. 5)..... 116

Ilustração 49 – *Green Architecture:* sustentabilidade – ecologia – desempenho. ([Adaptado a partir de:] Attmann, 2009, pp. 40, 41) 118

Ilustração 50 – O processo de construção sustentável. (Amado *et al.*, 2015, p. 71) 120

Ilustração 51 – il Bosco Verticale em Milão, Itália: um exemplo de inspiração biofílica. ([Adaptado de:] ArchDaily, 2015) 122

Ilustração 52 – *Render* de uma suite num apartamento do il Bosco Verticale. (Lubell, 2020) 123

Ilustração 53 – Diversos níveis de construção sustentável e regenerativa. (International Living Future Institute, 2019, p. 12)..... 125

Ilustração 54 – Quadro sinóptico dos requisitos LBC 4.0. (International Living Future Institute, 2019, p. 19) 126

Ilustração 55 – As seis camadas (*layers*) de um edifício e respetivo tempo de vida útil. (Schut, Crielaard e Mesman, 2015, p. 46)..... 129

Ilustração 56 – As quatro categorias de estratégias da EC e o modelo de Brand. ([Adaptado a partir de:] Nußholz *et al.*, 2023, p. 6)..... 130

Ilustração 57 – Estratégias de construção circular (Nußholz *et al.*, 2023, p. 2)..... 130

Ilustração 58 – Potencial de redução de carbono incorporado pela adoção de materiais e processos mais circulares. [Adaptado a partir de:] Bron *et al.*, 2022)..... 133

Ilustração 59 – Estratégias de desconstrução de componentes de edifícios. (Heinrich e Lang, 2019, p. 22)..... 134

Ilustração 60 – As duas categorias de reversibilidade e as três dimensões de transformação. [Adaptado a partir de:] Durmisevic, 2019, pp. 38, 39)..... 135

Ilustração 61 – Âmbito da avaliação ambiental *versus* avaliação de sustentabilidade de edifícios. (Ebert, Essig e Hauser, 2011, p. 27) 137

Ilustração 62 – Influência da adoção atempada da certificação nos custos e na sustentabilidade do projeto. (Ebert, Essig e Hauser, 2011, p. 80)..... 138

Ilustração 63 – Impacto da certificação de avaliação de sustentabilidade no valor do imobiliário. (Ebert, Essig e Hauser, 2011, p. 106) 139

Ilustração 64 – Exemplos de sistemas de certificação de sustentabilidade de edifícios. (Heinrich e Lang, 2019, p. 43)..... 140

Ilustração 65 – Visão esquemática da ferramenta CBA. (Buildings As Materials Banks, 2018) 144

Ilustração 66 – Versão simplificada de um Passaporte de Materiais num edifício residencial. (Blok, Schouten e Dasnois, 2020) 144

Ilustração 67 – O triângulo de valores do NBE. (União Europeia. Comissão, 2021, p. 5) 146

Ilustração 68 – Arquitetos e engenheiros entre os profissionais mais participativos no NBE. (União Europeia. Comissão, 2021, p. 14) 148

Ilustração 69 – Três áreas do Pacto Ecológico Europeu relacionadas com a descarbonização da economia e dos edifícios. ([Adaptado a partir de:] Hayes *et al.*, 2022, p. 4) 149

Ilustração 70 – Vaga de Renovação na Europa. ([Adaptado a partir de:] União Europeia. Conselho, 2021) 150

Ilustração 71 – Ações nacionais, setoriais e regionais no PAEC-PT. ([Adaptado de:] Portugal. Grupo Interministerial Economia Circular, 2017, p. 19) 156

Ilustração 72 – "The Crystal Palace". (Tietz, 2008, p. 7) 162

Ilustração 73 – Gropius. Bauhaus. Nassau, Alemanha (1926). (Zevi, 1955, p. 98) .. 164

Ilustração 74 – Maison Dom-ino e os 5 pontos da nova arquitetura. (Gans, 1988, p. 18) 165

Ilustração 75 – "Fallingwater". (Frank Lloyd Wright Foundation, 2023) 167

Ilustração 76 – "Villa Mairea". (Alvar Aalto Foundation, 2023) 169

Ilustração 77 – Villa Mairea: detalhes da utilização de materiais naturais: bambu e madeira. ([Adaptado de:] Mairea Foundation, 2023) 170

Ilustração 78 – "Design Seminar 2022: biomaterials, innovations and regenerative design." (Scandinaviandesign.com, 2022) 171

Ilustração 79 – Frank Gehry e Zaha Hadid*:* Walt Disney Concert Hall e Changsha Meixihu International Culture & Arts Centre. ([Adaptado a partir de:] Sokol, Mafi e McLaughlin, 2023; Zaha Hadid Architects, 2023) 172

Ilustração 80 – Tadao Ando e Shigeru Ban: Pulitzer Arts Foundation e Aspen Arts Center. ([Adaptado a partir de:] Rosenfield, 2014; Shigeru Ban Architects, 2014) 172

Ilustração 81 – Norman Foster e Rem Koolhaas: Alif - The Mobility Pavillion e Casa da Música. ([Adaptado a partir de:] Foster + Partners, 2023; Arquitectura Viva, 2023) .. 173

Ilustração 82 – Renzo Piano: Marunouchi Tokio Marine: supraestrutura de madeira e jardim-floresta na cobertura. ([Adaptado a partir de:] Ward, 2022) 174

Ilustração 83 – Tadao Ando: ampla janela ovalada em Il Teatro at Aljada, Sharjah (EAU). (Carlson, 2023) 176

Ilustração 84 – Áreas interiores iluminadas, amplas e funcionais. (Owoo, 2023) 177

Ilustração 85 – Logistics Center West (Países Baixos): cobertura verde, *deck* e envolvente natural. (Charles, 2023) 178

Ilustração 86 – Homogeneização e globalização. (Erandole, 2020) 181

Ilustração 87 – Fachada do Guggenheim Museum. (Sokol, Mafi e McLaughlin, 2023) 183

Ilustração 88 – Alçado principal do Heydar Aliyev Cultural Centre – Baku, Arzeibeijão. (Zaha Hadid Architects, 2023) 184

Ilustração 89 – Vista geral do edifício da sede da CCTV – Pequim, China. (OMA OFFICE WORK, 2023) 185

Ilustração 90 – Os sete países europeus com maior procura de materiais de construção. (Haisma *et al.*, 2023, p. 8)..... 187

Ilustração 91 – Procura de materiais de construção por unidade de massa (Kg), camada construtiva e tipologia de edifícios na UE27+UK. ([Adaptado a partir de:] Haisma *et al.*, 2023, pp. 9, 10)..... 188

Ilustração 92 – Relação ente ambiente construído e natureza. (A collaboration of leading figures in the built environment, 2023, pp. 8, 9) 189

Ilustração 93 – A importância dos materiais renováveis *bio-based* e das cidades na sequestração de carbono da atmosfera. ([Adaptado de:] Churkina *et al.*, 2020, p. 270) 190

Ilustração 94 – A tríade vitruviana e a tripla linha de base da sustentabilidade. (Edwards, 2008, p. 161) 191

Ilustração 95 – Diagrama representativo da relação entre a economia circular e o ambiente construído. (A collaboration of leading figures in the built environment, 2023, pp. 6, 7) 192

Ilustração 96 – Fluxos de recursos (*Inputs*) e produtos (*Outputs*) no ambiente construído. (Yeang, 2007, p. 46)..... 194

Ilustração 97 – Impacte ambiental padrão de edifícios residenciais novos na UE 25. (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 60) 196

Ilustração 98 – Contribuição relativa para o impacte ambiental dos edifícios na UE25 de acordo com a tipologia. (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 62)..... 197

Ilustração 99 – Contribuição dos elementos construtivos para o impacte ambiental da fase de construção (*Energia Primária*) para construção nova, na UE 25, em conformidade com a zona geográfica e a tipologia. (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 66) 199

Ilustração 100 – Relação entre massa, GWP e ECI para diferentes materiais de construção na UE27+UK. (Haisma *et al.*, 2023, p. 10)..... 200

Ilustração 101 – *S-layers* e a sua relação com a massa, GWP e ECI na UE27+UK. ([Adaptado de:] Haisma *et al.*, 2023, pp. 10, 29)..... 201

Ilustração 102 – As quatro funções de uma casa e a sua relação com o corpo humano.(Snell e Callahan, 2009, p. 16)..... 202

Ilustração 103 – Exemplo parcial de uma HPD v2.3 de um produto de construção. ([Adaptado a partir de:] dormakaba, 2024)..... 205

Ilustração 104 – Os 10 parâmetros do sistema WELL v2™. (International WELL Building Institute, 2024)..... 206

Ilustração 105 – Os nove fundamentos dos edifícios saudáveis. ([Adaptado de:] (Allen *et al.*, 2017, p. 4)..... 208

Ilustração 106 – O decálogo da arquitetura saudável. ([Adaptado a partir de:] Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 16)..... 209

Ilustração 107 – Os cinco princípios da arquitetura saudável. (Healthy Architecture & City, 2024) 210

Ilustração 108 – Mapa de suscetibilidade ao radão e variação da concentração sazonal e diurna nos edifícios. ([Adaptado a partir de:] Agência Portuguesa do Ambiente, 2021) 212

Ilustração 109 – "Proporção (%) da população incapaz de manter a habitação devidamente aquecida em Portugal, União Europeia e outros países europeus, 2014 e 2019". ([Adaptado a partir de:] Freitas, 2022, p. 169)..... 214

Ilustração 110 – Mortalidade associada ao calor e frio extremos como um problema de saúde de baixa ou nula magnitude e elevado potencial de risco. ([Adaptado a partir de:] Freitas, 2022, p. 37)..... 215

Ilustração 111 – Impactos anuais de mortalidade na Europa (por 100.000 pessoas/ano) atribuível ao frio (azul) e calor (vermelho), em ambiente urbano, com base na taxa de excesso de mortalidade padronizada (em cima) e na taxa bruta de excesso de mortalidade (em baixo). ([Adaptado de:] Masselot *et al.*, 2023, pp. e277, e278)..... 216

Ilustração 112 – "Intensidade de efeitos adversos à saúde de acordo com a umidade relativa do ar e agentes causais". (Sterling, Collett e Rumel, 1991, p. 60) 217

Ilustração 113 – O nexo entre construção sustentável, saúde global e ODS. (Allen *et al.*, 2024, p. 21)..... 218

Ilustração 114 – Álvaro Siza: a Quinta da Malagueira como exemplo de racionalismo crítico. (Frampton, 2016)..... 221

Ilustração 115 – Fluxo global de materiais usados na construção, em 1945 e em 2015. ([Adaptado a partir de:] Dyson *et al.*, 2023, p. 3)..... 222

Ilustração 116 – A dependência de materiais não-renováveis ao longo do tempo. (Ashby, 2013, p. 7) 223

Ilustração 117 – A abordagem *Avoid-Shift-Improve* para a descarbonização de edifícios e do setor. (Dyson *et al.*, 2023, p. 14)..... 224

Ilustração 118 – As dez categorias de materiais. ([Adaptado a partir de:] Dyson *et al.*, 2023, pp. xvi, xvii)..... 225

Ilustração 119 – Emissão de GEE e geração de RCDs aquando da demolição de um edifício. (Brownell, 2023) 226

Ilustração 120 – Demolição *versus* desconstrução. (Dyson *et al.*, 2023, p. 20) 228

Ilustração 121 – A abordagem ADD e respetivas consequências ambientais. (Metin e İpekç, 2015, p. 524)..... 230

Ilustração 122 – A energia incorporada e as respetivas emissões ao longo do ciclo de vida de um edifício. (Magwood, Huynh e Olgyay, 2023, p. 16)..... 230

Ilustração 123 – Ações a implementar e substituição de materiais com vista à redução de carbono incorporado nos edifícios. ([Adaptado a partir de:] Jungclaus *et al.*, 2021, p. 6; Magwood, Huynh e Olgyay, 2023, p. 22) 232

Ilustração 124 – Classificação da pegada de carbono e ambiental de um edifício em função dos impactes e das fases do ciclo de vida considerados. (Huynh *et al.*, 2023, p. 31) 234

Ilustração 125 – Integração da tecnologia solar com a arquitetura. (Hegger *et al.*, 2008, p. 109) 237

Ilustração 126 – Exemplos de placas de aquecimento I.V. de baixo carbono Sunlife ART. ([Adaptado a partir de:] Ekosen, 2021) 238

Ilustração 127 – Cronograma de implementação dos edifícios NZEB segundo a DEE (reformulada). (D'Agostino e Zangheri, 2016, p. 2) 239

Ilustração 128 – Os artigos 2º e 9º na definição de NZEB segundo a diretiva DEE. (Erhorn e Erhorn-Kluttig, 2018, p. 2) 240

Ilustração 129 – Cronograma legislativo europeu e nacional, relacionado com a EPBD (DEE). (ADENE – Agência para a Energia, 2024)..... 241

Ilustração 130 – Número total de edifícios NZEB e respetiva quota no mercado da construção português (2012-2016). (Esser *et al.*, 2019, p. 95)..... 242

Ilustração 131 – Vários exemplos de integração de tecnologia solar fotovoltaica em edifícios (BIPV). (Boyd e Coonick, 2018, p. 5) 243

Ilustração 132 – Fachada BIPV no edifício da Câmara Municipal de Friburgo, Alemanha. (Corti *et al.*, 2020, p. 24) 245

Ilustração 133 – Carbono incorporado de alguns materiais de construção. (Giddings *et al.*, 2021, p. 19)..... 247

Ilustração 134 – As quatro fases de descarbonização do edificado. ([Adaptado a partir de:] Besana e Tirelli, 2022, p. 10) 248

Ilustração 135 – O carbono biogénico e as fases de ciclo de vida de um edifício na abordagem -1 / +1. (Andersen *et al.*, 2021, p. 3)..... 250

Ilustração 136 – Carbono incorporado e carbono biogénico numa construção convencional *versus* construção com materiais *bio-based*. (Hart e Firth, 2021, pp. 50, 51) 251

Ilustração 137 – A sequestração de carbono nos materiais de construção como um novo paradigma. ([Adaptado a partir de:] Huynh *et al.*, 2023, p. 58) 252

Ilustração 138 – Revestimento de pavimento flutuante a partir de madeira de cânhamo. ([Adaptado a partir de:] Gibson, 2023) 252

Ilustração 139 – Painéis OSB obtidos a partir de fibras de cânhamo. ([Adaptado a partir de:] Lotus, 2021)..... 253

Ilustração 140 – Bambu estrutural e bambu compósito como armadura de betão. ([Adaptado a partir de:] Souza, 2023; Brownell, 2015)..... 253

Ilustração 141 – Vo Trong Nghia: "Bamboo Dome". (Fairs, 2014) 255

Ilustração 142 – Blocos de micélio como envolvente exterior. (Fairs, 2021) 256

Ilustração 143 – Variação da temperatura (T) exterior (laranja) e interior (azul), num compartimento (*koele berging*) de um edifício de habitação com paredes de painéis preenchidos com betão de cânhamo. (Ma Yixiao, 2016, p. 5)..... 262

Ilustração 144 – Variação do teor de humidade relativa (rH) no exterior (laranja) e interior (azul), num compartimento de um edifício de habitação com paredes de painéis preenchidos com betão de cânhamo. (Ma Yixiao, 2016, p. 8)..... 264

Ilustração 145 – Provetes de ensaio com isolamento na cavidade à base de flocos de palha e de mistura seca de cânhamo. (Ilustração nossa, 2023)..... 267

Ilustração 146 – Características técnicas dos provetes isolados com flocos de palha (Painel 1) e mistura seca de cânhamo (Painel 2). ([Adaptado de:] Coelho e Simões, 2023, p. 1; Coelho e Simões, 2023, p. 1) 268

Ilustração 147 – A construção circular é um paradigma para a captura e armazenamento de carbono nos edifícios. (Ecotiv, 2024) 271

Ilustração 148 – Aplicação de conchas como base drenante e isolamento térmico de uma betonilha de betão de cânhamo. (Ecoshelp, 2024) 272

Ilustração 149 – Utilização de madeira como material estrutural e de acabamento interior no edifício InnoRenew CoE (Izola, Eslovénia). (Cortesia do Professor Doutor Arqt. Alberto Reaes Pinto, 2023) 273

Ilustração 150 – Estrutura reticulada e lajes de betão armado com preenchimento de panos de alvenaria em Vila Nova de Gaia, Portugal. (Ilustração nossa, 2024) 274

Ilustração 151 – Complexo residencial de Santo António dos Cavaleiros, Portugal. (Pinto, 2023, p. capa) 275

Ilustração 152 – Reabilitação com sistema aligeirado de aço em Lisboa, Portugal. (Blinkhouse, 2022) 275

Ilustração 153 – Fases de aplicação de fundações helicoidais numa obra em Vila Nova de Famalicão, Portugal.(Ilustração nossa, 2023) 276

Ilustração 154 – Fundações helicoidais aplicadas numa obra em Vila Nova de Famalicão, Portugal. (Ilustração nossa, 2023) 277

Ilustração 155 – Edifício residencial em Sintra, Portugal, pré-fabricado com painéis SIP de madeira preenchidos com flocos de palha. ([Adaptado a partir de:] Ecotiv, 2024) 278

Ilustração 156 – Estrutura híbrida de betão armado e CLT no edifício Hotel Antas Garden, no Porto, Portugal. ([Adaptado a partir de:] Ordem dos Engenheiros Região Norte. Delegação Vila Real, 2023) 279

Ilustração 157 – Paredes exteriores em CLT no edifício Hotel Antas Garden no Porto, Portugal. (Ilustração nossa, 2023) 280

Ilustração 158 – As coberturas e as paredes verdes como ferramentas arquitetónicas para a obtenção de cidades circulares. (Pearlmutter *et al.*, 2021) 281

Ilustração 159 – Atenuação do pico do caudal pluvial devido ao efeito de retenção de uma cobertura verde. (Valle, 2022, p. 18) 282

Ilustração 160 – Achatamento da curva do caudal de escoamento, devido a uma cobertura verde com efeito adicional de detenção. (Detention Roof, 2024) 282

Ilustração 161 – As diferenças entre uma cobertura verde com retenção e outra com retenção + detenção. ([Adaptado a partir de:] Zakrisson, 2022) 283

Ilustração 162 – Alguns sistemas de paredes exteriores de edifícios.([Adaptado a partir de:] McMorrough, 2014, pp. 94, 95) 284

Ilustração 163 – Parede interior de alvenaria de tijolo furado e respetivos resíduos originados pela abertura de roços. (Meireles *et al.*, 2024, p. 8) 284

Ilustração 164 – Construção tradicional desenvolvida e prefabricação como variantes da construção industrializada. ([Adaptado a partir de:] Pinto, 2023, p. 27) 286

Ilustração 165 – Prefabricação de painéis exteriores resistentes em betão armado: fabrico, armazenamento e aplicação em obra. ([Adaptado de:] Pinto, 2023, pp. 64, 78 , 96) 286

Ilustração 166 – Painel de fachada prefabricado leve com caixilharia e revestimentos integrados. ([Adaptado de:] Grupo Casais, 2024) 287

Ilustração 167 – Painéis prefabricados de terra batida e a sua circularidade. ([Adaptado a partir de:] Erden, 2018) 288

Ilustração 168 – Os oito grupos estratégicos para a implementação do PACCO. ([Adaptado de:] Fonseca *et al.*, 2022, p. 49) 290

Ilustração 169 – Os quatro princípios do projeto circular. ([Adaptado a partir de:] Thung *et al.*, 2024, p. 7) 291

Ilustração 170 – Diagrama da circularidade na construção. (Fonseca *et al.*, 2022, p. 9) 293

Ilustração 171 – Potencial de armazenamento de carbono de materiais de construção. (Pomponi *et al.*, 2020, p. 158) 294

Ilustração 172 – Diagramas de edifícios contemporâneos utilizando materiais naturais. (Salihbegovic e Salihbegovic, 2020, p. 3) 295

Ilustração 173 – Classificação de materiais de acordo com o seu potencial de aquecimento global (net-GWP). ([Adaptado a partir de:] Carcassi *et al.*, 2022, p. 5214) 295

Ilustração 174 – As sete (6 +1) camadas construtivas constituintes de um edifício. (Thung *et al.*, 2023, p. 20) 296

Ilustração 175 – Diagrama da estrutura do Master em Engineering and Architectural Design. (Oliveira *et al.*, 2021, p. 1256) 299

Ilustração 176 – A pala de betão armado pré-esforçado do Pavilhão de Portugal (Lisboa, Portugal). (Marina Parque das Nações, 2021) 300

Ilustração 177 – “Conceito de Sistema Integrado/Projeto Integrado”. ([Adaptado de:] Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 2) 300

Ilustração 178 – A curva de Macleamy representando o fluxo de esforço de atividades na fase inicial do projeto, tornando-o mais eficiente e menos oneroso. (The American Institute of Architects, 2007, p. 21) 301

Ilustração 179 – "Esquema de um processo integrado". (Ribeiro, 2012, p. 23) 302

Ilustração 180 – Algumas funcionalidades do BIM e interoperabilidade entre elas. (Krygiel e Nies, 2008, p. 52) 305

Ilustração 181 – Gráfico de co-ocorrência dos termos BIM e economia circular. (Delgado e Oyedele, 2020, p. 1273) 307

Ilustração 182 – Hierarquia de parâmetros de desempenho para envolventes de edifícios. (Kesik, 2019) 311

Ilustração 183 – Quadro de objetivos de desempenho em edifícios. (Kesik, 2019) . 312

Ilustração 184 – O ambiente construído do futuro será projetado de modo a possibilitar a desconstrução e a reutilizar os seus componentes e materiais de modo eficaz e eficiente. (Architects Climate Action Network, 2024, p. 16) 313

Ilustração 185 – Projetar para a desconstrução. (Architects Climate Action Network, 2024, p. 28) 313

Ilustração 186 – Edifício circular capta mais valor económico e ambiental que o edifício linear. (Thung *et al.*, 2023, p. 73) 316

Ilustração 187 – Exemplo da nova versão do Passaporte de Materiais BC MP (Nuo Zhang, Qi Han e de Vries,2021, p. 11)..... 317

Ilustração 188 – Os ciclos circulares presentes no conceito BC. (Nuo Zhang, Qi Han e Vries, 2021, p. 6) 318

Ilustração 189 – Fluxograma de modelos de negócio circulares em função de três fases do ciclo de vida: conceção, operacional e fim de vida. (Jonker, Faber e Haaker, 2022, p. 26) 322

Ilustração 190 – Tipos de sinergias operacionais no âmbito da SI (Planelles Aragó *et al.*, 2021, p. 26)..... 325

Ilustração 191 – Processo de fabrico de elementos cerâmicos a partir de matérias-primas secundárias e de água residual tratada. (Planelles Aragó *et al.*, 2021, p. 28) 327

Ilustração 192 – Pormenor da estrutura conceptual da tese referente ao capítulo 4. (Ilustração nossa, 2025) 329

Ilustração 193 – Estrutura conceptual do capítulo 4. (Ilustração nossa, 2025)..... 331

Ilustração 194 – Alçado do Edifício Norte. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)..... 333

Ilustração 195 – Estrutura principal e secundária do último piso. (Diário Imobiliário, 2019) 334

Ilustração 196 – Laje de CLT a ser colocada na estrutura de suporte. (Ilustração nossa, 2018) 335

Ilustração 197 – Ligação entre a estrutura de madeira lamelada e a de betão armado. (Cortesia ARX Portugal Arquitectos, 2018) 335

Ilustração 198 – Isolamento XPS na fachada e revestimento em gesso cartonado pelo interior. (Cortesia ARX Portugal Arquitectos, 2018) 336

Ilustração 199 – Revestimento com madeira nos espaços do último piso. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024) 336

Ilustração 200 – Revestimento metálico exterior, caixilharias e envidraçados em alçado. FG + SG – Fotografia de Arquitectura ([Adaptado a partir de:] ARX Portugal Arquitectos, 2024) 337

Ilustração 201 – Integração do Edifício Norte com o ambiente construído existente. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024) 337

Ilustração 202 – Alçados Nascente e Norte. (ARX Portugal Arquitectos, 2024) 338

Ilustração 203 – O sistema construtivo possibilita a adaptabilidade, flexibilidade, reversibilidade e desconstrução. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)..... 338

Ilustração 204 – A utilização da madeira como material estrutural e de acabamento. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024) 339

Ilustração 205 - A estrutura permite flexibilidade e adaptabilidade. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024) 340

Ilustração 206 – Escada em betão armado. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)..... 341

Ilustração 207 – *Masterplan* Casas da Chaminé. (Vanguard Properties, 2024)..... 344

Ilustração 208 – Painel autoportante de madeira (*woodframing*). (Kozowood Industries, 2024) 345

Ilustração 209 – Painel CLT de 5 camadas. ([Adaptado de:] Stora Enso Wood Products GmbH, 2017, p. 5) 345

Ilustração 210 – Fundação helicoidal. (Gentilmente cedido por Projectus, 2024) 346

Ilustração 211 – Corte esquemático da parede exterior e da cobertura plana. (Gentilmente cedido por Projectus, 2024) 347

Ilustração 212 – *Render* das paredes exteriores revestidas com sistema RDA. (Vanguard Properties, 2024) 348

Ilustração 213 – *Render* das Casas da Chaminé. ([Adaptado a partir de:] Vanguard Properties, 2024) 348

Ilustração 214 – *Render* do edifício de dois pisos da segunda fase do empreendimento Muda Resort. ([Adaptado a partir de:] (Vanguard Properties, 2024)..... 349

Ilustração 215 – *Render* da capela do Muda Resort. (Vanguard Properties, 2024) . 349

Ilustração 216 – Utilização da madeira nas várias componentes do edifício. (Gentilmente cedido por Projectus, 2024) 350

Ilustração 217 - *Renders* da área social de um edifício do Muda Resort. ([Adaptado a partir de:] Vanguard Properties, 2024) 351

Ilustração 218 – Plantas do piso térreo e do piso superior de um edifício das Casas da Chaminé. ([Adaptado a partir de:] Vanguard Properties, 2024) 351

Ilustração 219 – Pormenor das ligações entre as paredes divisórias e a laje do piso superior. (Gentilmente cedido por Projectus, 2024) 352

Ilustração 220 – Sistema prefabricado à base de conexões mecânicas. (Kōzōwood, 2024) 352

Ilustração 221 – Complexo Rocket & Tigerli. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024) 355

Ilustração 222 – Estrutura de madeira engenheirada do complexo Rocket & Tigerli. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024) 356

Ilustração 223 – Fachada em sistema prefabricado de terracota. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024) 357

Ilustração 224 – Pormenor da fachada num edifício do complexo. ([Adaptado a partir de:] (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024) 358

Ilustração 225 – Pátio comum de acesso aos edifícios. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)..... 359

Ilustração 226 – Aspeto geral e tonalidade do conjunto. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)..... 359

Ilustração 227 – Tipos de lajes de pavimento em função da altura do edifício e do vão. ([Adaptado a partir de:] Implenia Holzbau, 2025)..... 360

Ilustração 228 – Lajes HVFD: modelo, montagem de conectores e produto final. ([Adaptado a partir de:] Implenia Holzbau, 2025)..... 361

Ilustração 229 – Tipos de acabamentos na face inferior das lajes HVFD. (Implenia Holzbau, 2025) 361

Ilustração 230 – Pormenor do *render* de dois alçados do edifício Rocket. ([Adaptado de:] Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024) 362

Ilustração 231 – Flexibilidade em ação: diferentes combinações de plantas arquitetónicas potencializada pela estrutura. (Implenia Holzbau, 2025) 363

Ilustração 232 – *Render* do interior de um fogo residencial da torre Rocket. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024) 364

Ilustração 233 – Esquema do processo de construção/desconstrução dos elementos de terracota prefabricados. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024) 364

Ilustração 234 – *Renders* dos edifícios analisados dos três estudos de casos. (Ilustração nossa, 2025) 367

Ilustração 235 – Representação cromática das nove posições da Matriz Grau de Circularidade $K_{1.}$ (Ilustração nossa, 2025) 370

Ilustração 236 – Representação cromática das nove posições da Matriz Grau de Circularidade $K_{2.}$ (Ilustração nossa, 2025) 371

Ilustração 237 – Representação cromática das nove posições da Matriz Grau de Circularidade $K_{3.}$ (Ilustração nossa, 2025) 372

Ilustração 238 – Representação cromática dos valores médios das matrizes K_1, K_2 e K_3. (Ilustração nossa, 2025) 374

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 63

Tabela 2 – Metas ODS direta ou indiretamente dependentes das atividades da construção e do imobiliário. 66

Tabela 3 – Economia circular como vetor de crescimento económico sustentável. 70

Tabela 4 – Circularidade do fluxo de materiais na UE 27. 75

Tabela 5 – Principais vantagens das torres eólicas de LVL. 83

Tabela 6 – Os Princípios de Hannover. 96

Tabela 7 – Classificação e integração em clusters das tecnologias da i4.0. 98

Tabela 8 – Fases do ciclo de vida de um edifício. 104

Tabela 9 – Indicadores de sustentabilidade de edifícios segundo ISO/TC 21929-1) 111

Tabela 10 – Potenciais impactes ambientais derivados do edificado. 119

Tabela 11 – Aspetos da economia circular ao longo do ciclo de vida de um edifício. 128

Tabela 12 – Exemplos de aplicação de estratégias circulares de renovação em Portugal e o respetivo potencial de descarbonização. 131

Tabela 13 – Matriz geral de conceção de um projeto de construção circular. 132

Tabela 14 –Os 55 benefícios mais reconhecidos da construção circular. 136

Tabela 15 - As categorias ambientais consideradas no BIU Version 6. 141

Tabela 16 – Estratégias e subestratégias de circularidade de materiais no BIU Version 6. 142

Tabela 17 – Critérios e principais objetivos relacionados com a economia circular no LiderA V4.0. 142

Tabela 18 – Critérios e objetivos de circularidade da gestão das águas residuais e dos resíduos no LiderA V4.0. 143

Tabela 19 – Esquema parcial da proposta de agenda setorial para o setor da Construção no PAEC-PT. 157

Tabela 20 – Quantidades médias de materiais (kg/m^2 área piso bruta) utilizados em diferentes tipologias de edifícios. 195

Tabela 21 – Substâncias perigosas presentes em materiais e produtos de construção. 204

Tabela 22 – Diferenças dos sintomas e da etiologia entre BRI (específico) e SBS (vago). 207

Tabela 23 – Período para a compensação dos impactes adversos resultantes de construção nova 227

Tabela 24 – "Requisitos NZEB20 em edifícios de habitação". 241

Tabela 25 – Classes de elementos técnicos de edifícios e respetivas aplicações de BIPV. 244

Tabela 26 – Medidas com vista à redução a curto e médio prazo do carbono incorporado no edificado. 249

Tabela 27 – Comparação das características mecânicas da madeira, aço e bambu.254

Tabela 28 – Categorias de materiais biogénicos e minerais sequestradores de carbono 258

Tabela 29 – Valores da densidade e da condutividade térmica (λ) de alguns materiais renováveis e não-renováveis. 265

Tabela 30 – Valores R_t e U conforme relatório OEF089/23 (Painel 1). 268

Tabela 31 – Valores R_t e U conforme relatório OEF090/23 (Painel 2). 268

Tabela 32 – Fator de decremento e atraso térmico do Painel 1 e Painel 2. 268

Tabela 33 – Características técnicas referentes a blocos de cânhamo..... 269

Tabela 34 – Características técnicas referentes a placas de XPS. 270

Tabela 35 – A prefabricação como catalisador das estratégias de construção circular 285

Tabela 36 – Materiais naturais e respetivas características para aplicação em arquitetura contemporânea. 294

Tabela 37 - As sete (6 +1) camadas construtivas de um edifício. 297

Tabela 38 – Diferenças principais entre a metodologia IPD e o paradigma dominante de entrega de projetos. 303

Tabela 39 – Usos do BIM e seus diferentes propósitos e objetivos. 306

Tabela 40 – Parâmetros de edificabilidade. 308

Tabela 41 – Exigências de desempenho, respetivas exigências construtivas e correspondentes critérios de dimensionamento. 309

Tabela 42 – Os fenómenos físicos e a sua relação com os materiais, componentes e sistemas. 309

Tabela 43 – Tempo de vida útil de diferentes elementos e as diferentes camadas construtivas do edifício. 315

Tabela 44 – Passaportes de materiais como instrumento dos projetistas (*Design & Build Team*) para a criação de bancos de materiais. 320

Tabela 45 – Adequação do modelo PaaS às diferentes camadas construtivas. 323

Tabela 46 – Análise SWOT do Edifício Norte Redbridge School. 343

Tabela 47 – Análise SWOT dos edifícios MUDA Reserve. 354

Tabela 48 – Análise SWOT do edifício Rocket (Rocket & Tigerli). 366

Tabela 49 – Matriz do Grau de Circularidade de um edifício 368

Tabela 50 – Classificação dos Fatores de Projeto de um edifício 369

Tabela 51 – Classificação do Potencial de Circularidade de um edifício..... 369

Tabela 52 – Classificação *Fp* e *Pc* do Caso 1 (k_1) 370

Tabela 53 – Matriz Grau de Circularidade do Caso 1 (K_1) 370

Tabela 54 – Classificação *Fp* e *Pc* do Caso 2 (K_2) 371

Tabela 55 – Matriz Grau de Circularidade do Caso 2 (k_2)..... 371

Tabela 56 – Classificação *Fp* e *Pc* do Caso 3 (K_3) 372

Tabela 57 – Matriz Grau de Circularidade do Caso 2 (K_3) 372
Tabela 58 – Tabela sinóptica do valore das nove posições *Gc* das matrizes K_1, K_2 e K_3. 373
Tabela 59 – Valores do Grau de Circularidade (G_{ck}) dos três casos de estudo 374

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Capacidade de armazenamento de humidade (MBV) 263

Equação 2 – “Equação de projeto”. 308

Equação 3 – Grau de circularidade de um edifício 368

Equação 4 – Fatores de projeto 369

Equação 5 – Potencial de circularidade 369

Equação 6 – Equação do valor do Grau de Circularidade de um edifício com n x m variáveis 373

Equação 7 – Equação do valor do Grau de Circularidade de um edifício com 3 x 3 variáveis 373

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

A.P. - Acordo de Paris
ACV - Avaliação de Ciclo de Vida
ADD - Architectural Deconstruction Design
AEC - Arquitetura, Engenharia e Construção
AFM - Análise de Fluxo de Materiais
AIA - American Institute of Architects
Al - Alumínio
APA - Agência Portuguesa do Ambiente
AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
B.A. - Betão Armado
B.C. - Betão de Cânhamo
BAMB - Building as Material Banks
BAPV - Building Applied Photovoltaics
BC - Building Circularity
BIM - Building Information Modelling
BIPV - Building Integrated Photovoltaics
BREEAM - Building Research Establishment Environmental Assessment
BRI - Building Related Illness
C2C - Cradle to Cradle
CAD - Computer-Aided Design
CBA - Circular Building Assessment
CBM - Circular Business Models
CE - Circular Economy
CIB - Conseil International du Batiment
CLB - Cross Laminated Bamboo
CLT - Cross Laminated Timber
CO_2 - Dióxido de carbono
COM - Comissão Europeia
COVs - Compostos Orgânicos Voláteis
Cu - Cobre
DAP - Declaração Ambiental de Produto
DB - Design-Build
DBB - Design-Bid-Build

DEE - Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios
DfD - Design for Deconstruction
DfE - Design for Environment
DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachaltiges Bauen
DRE - Doenças Relacionadas com Edifícios
EC - Economia Circular
ECI - Environmental Cost Indicator
EI - Ecologia Industrial
ELMs - Engineered Living Materials
EMF - Ellen MacArthur Foundation
EPBD - Energy Performance Building Directive
EPD - Environmental Product Declaration
EPS - Poliestireno Expandido
ESAC - Estratégia para a Sustentabilidade do Ambiente Construído
ETH - Swiss Federal Institute of Technology of Zürich
EU - European Union
EU25 - União europeia a 25 países
EU27 - União Europeia a 27 países
FaaS - Façade-as-a-Service
FBCF - Formação Bruta de Capital Fixo
Fe - Ferro
GEE - Gases com Efeito de Estufa
GFM - Gestão de Fluxo de Materiais
GLB - Glue Laminated Bamboo
GWP - Global Warming Potential
HPD - Health Product Declaration
HQE - Haute Qualité Environnementale
I.V. - Infravermelho
I4.0 - Indústria 4.0
I5.0 - Indústria 5.0
IAF - Integração Arquitetónica Fotovoltaica
IPD - Integrated Project Delivery
KBBE - Knowledge-Based Bio-Economy
KETs - Key-Enabling Technologies
LaaS - Light-as-a-Sevice

LBC - Living Building Challenge
LBMs - Living Building Materials
LCA - Life Cycle Assessment
LCSA - Life Cycle Sustainability Assessment
LEED - Leadership in Energy and Environmental Design
LGMs - Lab-Grow Materials
LiderA - Liderar pelo Ambiente
LSF - Light Steel Framing
LVL - Laminated Veneer Lumber
LWF - Light Wood Framing
MBV - Moisture Buffer Value
MFA - Material Flow Analysis
MFM - Material Flow Management
MgO - Óxido de magnésio
MPSC - Materiais, Produtos e Sistemas Construtivos
N - Nitrogénio
NBE - Novo Bauhaus Europeu
NEB - New European Bauhaus
NO_x - Nitrogénio
nPAEC - Novo Plano de Açãp para a Economia Circular
NZEB - Nearly Zero Energy Building
ODM - Objetivos de Desenvolvimento do Milénio
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS - Organização Mundial de Saúde
OSB - Oriented Strand Board
PaaS - Product-as-a-Service
PACCO - Plano de Ação para a Circularidade na Construção
PAEC - Plano de Ação para a Economia Circular
PAEC-PT - Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal
PAG - Potencial de Aquecimento Global
PAP - Pegada Ambiental de Produto
PEE - Pacto Ecológico Europeu
PEE - Pacto Ecológico Europeu
PEF - Product Environmental Footprint
PEI - Parque Eco-Industrial
PIB - Produto Interno Bruto

PIR - Poliisocianurato
PM - Passaporte de Materiais
PNS - Plano Nacional de Saúde
PRR - Plano de Recuperação e Resiliência
PTC - Pegada Total de Carbono
PUR - Poliuretano
QAI - Qualidade do Ar Interior
RBD - Reversible Building Design
RBDP - Reversible Building Design Protocol
RCDs - Resíduos de Construção e Demolição
RFID - Radio-Frequency Identification
RIBA - Royal Institute of Brithish Architects
RJUE - Regime Jurídico da Urbanização e Edificação
Rn - Radão
RSUs - Resíduos Sólidos Urbanos
Rt - Resistência térmica
SBS - Sick Building Syndrome
SBtoolPT - Sustainable Building Tool Portugal
SDGs - Sustainable Development Goals
SED - Síndroma do Edifício Doente
SI - Simbiose Industrial
Si - Silício
SI - Simbiose Industrial
SIA - Societé Suisse des ingénieurs et des architects
SIP - Structural Insulated Panel
S-layers - Seis camadas construtivas de Brand
SNBS - Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz
SUI - Simbiose Urbana Industrial
SWOT - Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
U - Coeficiente de transmissão térmica
UE - União Europeia
UE - União Europeia
UE27+UK - União Europeia a 27 países + Reino Unido
VITO - Flemish Institute for Technological Research NV
VRE - Vaga de Renovação na Europa
VUB - Vrije Universiteit Brussel

WBCSD	-	World Business Council on Sustainable Development
WBLCA	-	Whole Building Life Cycle Assessment
WCED	-	World Commission on Environment and Development
WGBC	-	World Green Building Council
WLCA	-	Whole Life Carbon Assessment
WLCC	-	Whole Life Cycle Carbon
WLCF	-	Whole Life Carbon Footprint
XPS	-	Poliestireno Extrudido
ZEB	-	Zero Emissions Building

SUMÁRIO

1. Introdução 43
   1.1. Motivações e problemas 43
   1.2. questões e objetivos da investigação 45
   1.3. Metodologia de investigação e organização do trabalho 46
2. Sustentabilidade e economia circular 49
   2.1. Desenvolvimento sustentável 50
      2.1.1. Desenvolvimento (in)sustentável 51
         2.1.1.1. Estado estacionário 52
         2.1.1.2. Desenvolvimento sustentável e sustentabilidade 53
         2.1.1.3. Desenvolvimento sustentável e construção 58
      2.1.2. Agenda 2030 e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 62
         2.1.2.1. Agenda 2030: um compromisso inadiável 62
         2.1.2.2. Ambiente construído e sua relação com os ODS 64
         2.1.2.3. Arquitetura, engenharia e construção 68
      2.1.3. Sustentabilidade e economia circular 69
         2.1.3.1. Dois conceitos, um objetivo 69
         2.1.3.2. A inter-relação 70
         2.1.3.3. A economia circular como conceito capacitante 71
   2.2. Economia circular 72
      2.2.1. O modelo conceptual 73
         2.2.1.1. Economia linear e economia circular 75
         2.2.1.2. Biosfera e tecnoesfera 77
         2.2.1.3. As energias renováveis 80
      2.2.2. Conceitos estruturantes e tecnologias capacitantes 84
         2.2.2.1. Biomimética e bioeconomia 85
         2.2.2.2. Ecoeficiência, ecologia industrial e indústria 5.0 92
         2.2.2.3. As tecnologias de largo espectro 99
      2.2.3. Abordagem de ciclo de vida 102
         2.2.3.1. Fases do ciclo de vida 102
         2.2.3.2. O conceito Cradle-to-Cradle 105
         2.2.3.3. Avaliação de ciclo de vida 109
   2.3. Construção circular 116
      2.3.1. Construção sustentável e circular 116
         2.3.1.1. Construção sustentável: conceitos fundamentais 117
         2.3.1.2. Construção circular: o desafio 126
         2.3.1.3. Sistemas de avaliação de sustentabilidade de edifícios 137

2.3.2. O Pacto Ecológico Europeu 145
2.3.2.1. Objetivos principais 145
2.3.2.2. O Novo Bauhaus Europeu 146
2.3.2.3. Descarbonização e eficiência energética de edifícios 148
2.3.3. O Plano de Ação para a Economia Circular 153
2.3.3.1. O novo Plano de Ação Europeu 154
2.3.3.2. O Plano de Ação Português 155
2.3.3.3. Consequências para o setor ACE 158
3. Economia circular e construção contemporânea 161
3.1. Arquitetura contemporânea 162
3.1.1. Caracterização 171
3.1.1.1. Principais características estético-construtivas 175
3.1.1.2. O contexto socioeconómico 179
3.1.1.3. Projetos de referência 182
3.1.2. Arquitetura, sustentabilidade e ambiente 186
3.1.2.1. Sustentabilidade: um novo pressuposto 189
3.1.2.2. Impacte ambiental de edifícios 193
3.1.2.3. Edifícios e saúde humana 201
3.1.3. A materialização como construção 219
3.1.3.1. Ideia, conceito, fenómeno 220
3.1.3.2. Os materiais 222
3.1.3.3. Construir e reabilitar: o todo e as partes 226
3.2. Energia, materiais e sistemas 230
3.2.1. Edifícios de baixo-carbono 231
3.2.1.1. A diretiva de desempenho energético de edifícios 235
3.2.1.2. Edifícios de energia quase-nula 238
3.2.1.3. Energia incorporada, carbono incorporado e biogénico 246
3.2.2. Materiais renováveis e biogénicos 251
3.2.2.1. Definição e tipologias 256
3.2.2.2. Vantagens técnicas e ambientais 259
3.2.2.3. Aplicações em construção circular 270
3.2.3. Principais sistemas construtivos de edifícios 273
3.2.3.1. Sistemas de estruturas de pequeno porte 276
3.2.3.2. Sistemas de estruturas de médio e grande porte 278
3.2.3.3. Sistemas de paredes interiores e exteriores 283
3.3. Projeto circular de edifícios 288
3.3.1. A conceção 290
3.3.1.1. Adaptabilidade, durabilidade e reutilização 292

3.3.1.2. Seleção de materiais e produtos 293
3.3.1.3. As diferentes camadas construtivas 296
3.3.2. Integração da arquitetura e da engenharia 298
3.3.2.1. Integrated Project Delivery 302
3.3.2.2. Building Information Modelling 304
3.3.2.3. Ciência da Construção 307
3.3.3. A desconstrução 312
3.3.3.1. Projetar para desconstruir 313
3.3.3.2. O edifício como um banco de materiais 316
3.3.3.3. Novos modelos de negócio e simbioses industriais 321
4. Casos de estudo 329
4.1. Metodologia 329
4.2. Estudo de casos 333
4.2.1. Caso 1 – Redbridge International School (Lisboa, Portugal) 333
4.2.1.1. Fatores de projeto 334
4.2.1.2. Potencial de circularidade 339
4.2.1.3. Análise SWOT 342
4.2.2. Caso 2 – MUDA Reserve (Comporta, Portugal) 344
4.2.2.1. Fatores de projeto 345
4.2.2.2. Potencial de circularidade 350
4.2.2.3. Análise SWOT 353
4.2.3. Caso 3 – Rocket & Tigerli (Zurique, Suíça) 355
4.2.3.1. Fatores de projeto 356
4.2.3.2. Potencial de circularidade 360
4.2.3.3. Análise SWOT 365
4.3. Síntese 367
5. Considerações finais 375
5.1. Considerações 375
5.2. Conclusões 388
5.3. Desenvolvimentos futuros 390
Referências 393

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÕES E PROBLEMAS

A evidência que o mundo atual caminha para um acentuar da crise económica, social e ambiental não constitui propriamente uma novidade, sendo que os problemas endémicos e sistémicos não só subsistem, como se agravam, pondo em causa, não só a biodiversidade, mas também a própria existência de sociedades humanas prósperas e saudáveis.

Trata-se de uma situação que tem sido abundantemente descrita, com projeções de cenários mais ou menos catastróficos, mas onde se destaca o limite preferencial de acréscimo da temperatura média global em +1,5ºC até ao final do século, conforme as metas estabelecidas no Acordo de Paris (COP 21).

Tal pressuposto parte do princípio que será realizada uma alteração substancial no modo como a sociedade produz os bens e serviços de que necessita, ou seja, que será efetuada uma transição (mais ou menos acelerada) de um modelo de economia linear para um outro, ecoeficiente e circular, sendo este, o principal fator de motivação para a realização deste trabalho.

A indústria da construção assume um papel predominante na pegada ecológica global, na medida em que mais de um terço do consumo global de recursos naturais, energia, poluição e resíduos são derivados desta atividade. Urge, pois, adotar medidas mitigadoras e corretivas em todo o ciclo de produção, desde o projeto à desconstrução.

Uma dessas medidas é a adoção de materiais, produtos e sistemas construtivos, comprovadamente de reduzido impacte ambiental, alinhados com os conceitos de sustentabilidade e da economia circular, o que implicará a implementação de um sistema de produção concebido a partir de matérias-primas renováveis, na reutilização de partes e componentes (tendencialmente sem resíduos), alimentado por energias renováveis e baseado em novos modelos de negócio.

A arquitetura – entendida concomitantemente como arte e técnica – não pode passar ao lado desta temática, tendo em conta a sua relevância e interação em todo o processo construtivo. A fase de conceção é aquela onde ganha forma a futura materialização e desconstrução do projeto, em estreita ligação com a engenharia, com vista à realização da obra.

É precisamente na conceção, mais do que em qualquer outra fase do ciclo de vida, que se determina não apenas a qualidade técnica, funcional e estética de um projeto, mas também a ambiental, característica indispensável que deve acompanhar o valor económico e social do edifício.

O destaque que a sustentabilidade tem vindo a assumir na valorização do edificado, concretizada na prática através da "tripla-linha-de-base" (económico, social e ambiental), tem sido realçada pela difusão e adesão gradual por parte dos projetistas, aos vários sistemas de avaliação de sustentabilidade, influenciando cada vez mais a conceção de edifícios de referência.

Nesse sentido, também a questão da viabilidade técnica e económica é assaz pertinente, na medida em que esta pode comprometer a concretização de um projeto baseado em princípios sustentáveis e circulares, assim como o grau de desenvolvimento e de maturidade de um mercado através da disponibilidade, variedade e preço, no âmbito de modelos de negócio circulares.

Pode também questionar-se se as vantagens teóricas relacionadas com a utilização de materiais, produtos e sistemas construtivos circulares (como os materiais renováveis), conduzem, efetivamente, a construções com menor impacte ambiental e com benefícios do ponto de vista da saúde dos ocupantes e da eficiência energética, entre outras. Nesse caso, como avaliar?

A capacitação dos projetistas e técnicos também é fundamental para a implementação da construção circular, quer ao nível dos *curricula* académicos, quer de cursos específicos de curta duração (p.e, microcredenciais), a serem efetivados por entidades formadoras acreditadas.

Apesar de a sustentabilidade ser um tema cada mais recorrente na formação de base de arquitetos e engenheiros, existe a perceção generalizada que uma larga faixa destes profissionais do país ainda não foi abrangida, não está sensibilizada ou não sabe como atuar.

Sendo uma premissa que a transição para um paradigma circular no setor da construção é condição necessária para atingir os objetivos do Acordo de Paris, então, a arquitetura, como determinante da qualidade do projeto, assume um papel de extrema relevância na correta conceção do edificado.

Através da compilação de diverso material teórico e técnico, o autor da investigação pretendeu agregar informação para facilitar o seu acesso, de modo a poder constituir um contributo para uma metodologia de seleção e aplicação de soluções técnicas circulares, a ser utilizada por arquitetos e demais projetistas.

Consequentemente, e como resultado dos materiais e métodos aplicados, fará sentido explicitar um conjunto de princípios práticos gerais de projeto e de construção, suscetíveis de serem utilizados, de modo a poder implementar a circularidade na construção, em concordância com as orientações que constam do Plano de Ação para a Circularidade na Construção (2021) e no Novo Plano de Ação para a Economia Circular 2023-2027.

1.2. QUESTÕES E OBJETIVOS DA INVESTIGAÇÃO

Perante a problemática acima descrita, colocam-se as seguintes questões de investigação:

1. É viável projetar e construir com materiais, produtos e sistemas sustentáveis e circulares como alternativa aos convencionais?

2. Pode a construção sustentável e circular efetivamente contribuir para um edificado mais saudável e eficiente em termos ambientais e energéticos?

3. Existe um efetivo conhecimento e capacitação técnica por parte dos diversos atores do meio técnico nacional, nomeadamente dos arquitetos, para a implementação dos princípios da economia circular na construção, em Portugal?

Tendo em conta o acima exposto, enumeram-se os principais objetivos deste trabalho:

1. Demonstrar a importância da mudança de paradigma no setor da construção, em geral, e na arquitetura, em particular.

2. Desenvolver a capacidade de identificar materiais, produtos e sistemas construtivos inovadores e compatíveis com o conceito de construção circular.

3. Estabelecer princípios gerais de construção circular para aplicação em arquitetura.

1.3. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O ponto de partida da metodologia exploratória de um trabalho de investigação é, regra geral, uma avaliação do estado da arte, tendo em vista o seu futuro aprofundamento e atualização.

Essa primeira etapa é conseguida através da revisão bibliográfica, análise documental e análise temática, efetuadas de forma manual e computadorizada, através de bibliotecas físicas e virtuais (p.e., B-On, Google Academics).

A pesquisa abrangeu livros; documentos, artigos e revistas técnicas e científicas; comunicações em conferências e congressos, assim como plataformas virtuais, nacionais e estrangeiras. Tendo a investigação incidido sobre documentos editados em várias línguas, optou -se por apresentar as citações no idioma original, de modo a evitar distorções ou erros de tradução.

O autor partiu do princípio de que a linha teórica de investigação, explanada principalmente nos capítulos 3 e 4, teria de ser marcadamente validada pelas fontes documentais, o que conduziu a uma ampla revisão bibliográfica.

Complementarmente, outros métodos exploratórios foram implementados no decurso da investigação, nomeadamente ensaios laboratoriais de provetes (capítulo 3), além de estudo de casos (capítulo 4) que incluíram entrevistas não estruturadas e análises documental e temática de documentos das empresas relacionadas.

Foram, ainda, realizadas análises SWOT (*Strenghts, Weaknesses, Opportunities, Threats*) no âmbito dos estudos de caso, técnica sobejamente conhecida e que contrasta os pontos fortes e fracos, bem como as oportunidades e ameaças relacionadas com uma pessoa, projeto ou organização.

Reconhece-se que teria sido importante realizar um inquérito nacional sobre esta temática junto de *stakeholders* relevantes. Contudo, admitiu-se a sua inexequibilidade em tempo útil, seja pelos elevados custos logísticos que acarretaria, como pela dificuldade em conseguir uma amostra populacional de dimensão e representatividade adequadas.

Todavia, no decurso da investigação, foi identificado um inquérito realizado sobre o tema, no âmbito de uma dissertação de mestrado (Campino,2022).

A tese desenvolve-se ao longo de cinco capítulos, onde, além do introdutório, os dois seguintes incluem a exposição ordenada e detalhada da informação recolhida (estado da arte). O quarto e quinto capítulos são dedicados à descrição e análise dos casos de estudo, e à síntese dos resultados do projeto (Considerações finais).

O capítulo 1 – **Introdução** – introduz os motivos e os problemas relacionados com o tema e para os quais a tese pretende contribuir, projeta as questões de investigação e os objetivos a que se propõe. De igual modo, refere a metodologia utilizada, principais obstáculos e limitações, assim como a organização do documento, resumida numa ilustração esquemática (Ilustração 1).

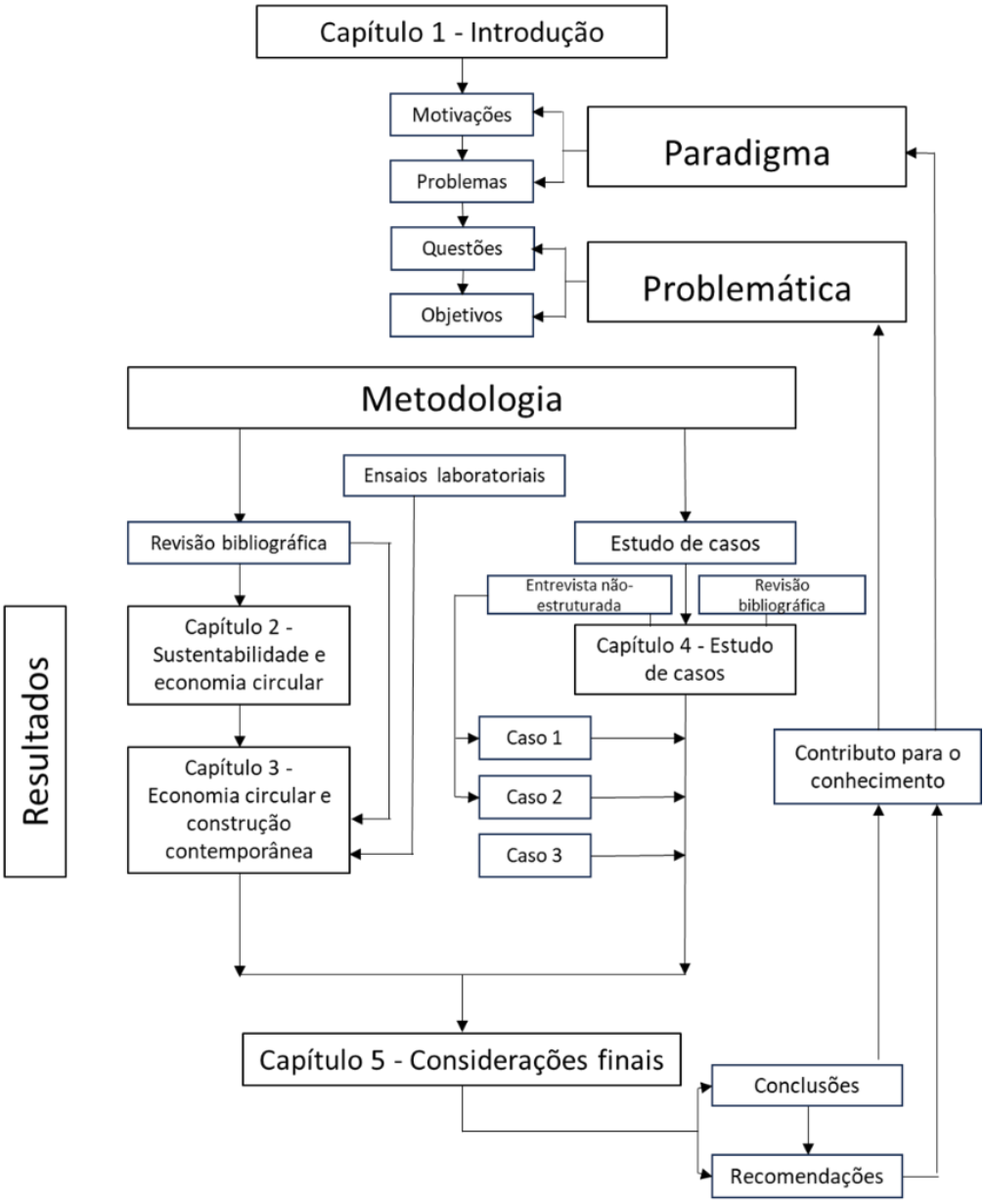


Ilustração 1 – Estrutura conceptual da tese. (Ilustração nossa, 2025)

O capítulo 2 – **Sustentabilidade e economia circular** – elenca as relações existentes entre estes dois conceitos nucleares e a necessidade da transição de um paradigma extractivista, baseado em materiais e produtos de base mineral, para um outro de materiais renováveis inspirados na bioeconomia, com vista à prossecução dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e das mais recentes diretrizes nacionais e europeias.

O capítulo 3 – **Economia circular e construção contemporânea** – aborda a influência, o reconhecimento e a relação entre a construção circular e a arquitetura desde a era moderna, realçando o papel da prefabricação, das novas tecnologias e dos materiais renováveis para a obtenção de um edificado saudável e eficiente do ponto de vista ambiental e energético, a par da qualidade estética e funcional.

O capítulo 4 – **Casos de estudo** – apresenta a descrição e a análise de três casos (dois em território nacional e um internacional) de edifícios com diferentes tipologias, funções e objetivos, e que tenham sido projetados e construídos (ou em fase de execução) de acordo com princípios de circularidade relacionados com as camadas construtivas mais impactantes, nomeadamente a estrutura e o envelope. Os pontos mais fortes, e os suscetíveis de melhoria, estão patentes numa análise SWOT efetuada para cada um dos casos.

O capítulo 5 **– Considerações finais** – apresenta as respetivas conclusões e sugere recomendações para o futuro, dando resposta às perguntas de investigação e indo ao encontro dos objetivos inicialmente traçados para a tese, nomeadamente, a necessidade de uma mudança de paradigma na construção, e, por inerência, na arquitetura, na direção da sustentabilidade e da economia circular.

Ao longo do trabalho foram sendo justificadas e validadas as premissas iniciais, tornando clara a evidência da transição já em curso. A importância da adoção de novas abordagens teóricas e práticas pelo setor é cada vez mais evidente, tendo ficado patenteada numa primeira fase como adaptação à realidade (p.e., escassez e volatilidade de matérias-primas, impacte ambiental dos materiais e produtos, combate às alterações climáticas antropogénicas, etc.) e, posteriormente, numa segunda etapa, em direção à construção regenerativa.

2. SUSTENTABILIDADE E ECONOMIA CIRCULAR

O desenvolvimento sustentável é um conceito que relaciona o impacto da atividade humana com os limites da biosfera no longo prazo. A sustentabilidade, como *praxis*, emerge para reestruturar, para alterar essa relação, com a finalidade de viabilizar e promover a sua implementação.

Globalmente, o setor da construção é um dos mais impactantes e, por isso, crucial para a prossecução do desenvolvimento sustentável. Como tal, o advento da construção sustentável, visando harmonizar o capital natural (biosfera) com o ambiente construído (tecnosfera), é um passo fundamental nessa direção. Também a Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) refletem a necessidade imperiosa do setor em se adaptar a este novo contexto.

A economia circular surge como um conceito capacitante do desenvolvimento sustentável, em contraponto ao paradigma vigente da economia linear, e onde as energias renováveis são parte integrante. Outros conceitos como bioeconomia, biomimética, ecoeficiência, abordagem de ciclo de vida e Indústria 4.0 estão também intimamente relacionados com a economia circular.

A este respeito, a mudança de um paradigma construtivo baseado em materiais e produtos de base mineral (p.e., cimento, aço, betão) para um outro que utiliza predominantemente biomateriais (p.e., madeira, cortiça, cânhamo, bambu, micélio) não só permite a inflexão no consumo de recursos não renováveis, como possibilita a captura e armazenamento de carbono nos elementos construtivos.

A construção circular é sinteticamente caracterizada como a aplicação dos princípios da economia circular ao setor da construção, com vista à mitigação ou eliminação dos diversos tipos de impactes ambientais e à promoção de edifícios saudáveis, adaptáveis, flexíveis e desmontáveis.

Este conceito encontra-se cada vez mais presente nos diversos sistemas de certificação de edifícios, mas também nos novos documentos e diretrizes europeias e nacionais como o Plano de Ação para a Economia Circular, o Pacto Ecológico Europeu e o Novo Bauhaus Europeu, entre outros.

2.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

As origens de um conceito embrionário relacionado com a atual definição de sustentabilidade na Europa remontam ao séc. XVII, através da legislação sobre boas práticas de gestão sustentável de florestas, com a finalidade de assegurar a cadeia de abastecimento a longo prazo de madeira, em termos de quantidade e qualidade (König *et al.*, 2010, p. 8).

Mais tarde e ainda relacionada com a desflorestação e a gestão responsável da floresta alemã, Hans Carl von Carlowitz (1713) sugere a utilização do termo *nachaltende Nutzung* (utilização sustentável) dos recursos, o que implicava a manutenção de um equilíbrio entre as arvores abatidas e as que eram plantadas, em sua substituição (Du Pisani, 2007, p. 85).

Esta característica (uma perspetiva de longo prazo em detrimento do imediato) é um traço distintivo da sustentabilidade, através da preservação dos recursos naturais, levando em linha de conta o seu valor económico e social, assim como a equidade intergeracional (König *et al.*, 2010, p. 8).

De acordo com a definição da Comissão Brundtland (1987), enunciada quando da apresentação das conclusões da World Comission on Environment and Development (WCED), a questão essencial aponta para a capacidade em satisfazer as necessidades do mundo atual, sem comprometer o futuro: “Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” (World Commission on Environment and Development, 1987, p. 16).

O **Relatório Brundtland** exprimia a convicção que a equidade social, o crescimento económico e o equilíbrio ambiental eram simultaneamente possíveis, realçando as três dimensões fundamentais do desenvolvimento sustentável (Ilustração 1) – sociedade, economia e ambiente – posteriormente conhecidas como a tripla linha de base (*triple bottom line*) (Du Pisani, 2007, p. 92).

Anteriormente vistos como antagónicos e conflituantes, os termos *desenvolvimento* (exploração dos recursos) e *conservação* (proteção dos recursos) emergem como interdependentes, sob a designação de desenvolvimento sustentável (Du Pisani, 2007, p. 91), cunhado pela primeira vez, nos inícios dos anos 70 do século passado, pela

economista Barbara Ward, fundadora do International Institute for Environment and Development (Du Pisani, 2007, p. 91; International Institute for Environment and Development, 2024).

2.1.1. DESENVOLVIMENTO (IN)SUSTENTÁVEL

O falhanço da economia do pós-guerra na redistribuição justa e equitativa da riqueza assim como a emergente crise climática global , em consequência do progresso científico e tecnológico (desenvolvimento insustentável) tornaram inevitável a necessidade de uma nova abordagem que tivesse como objetivo a resolução ou a mitigação destes problemas (Du Pisani, 2007, p. 94)

Os riscos e as ameaças ao ambiente, cada vez mais divulgadas e do conhecimento geral, foram criando um corpo cada vez mais extenso de literatura e conhecimento sobre o assunto, resultado do receio que "[…] economic growth might endager the survival of the human race and the planet." (Du Pisani, 2007, p. 89), ou seja, a expectativa de uma eminente catástrofe ambiental estimulou um novo modelo de pensamento, como alternativa ao crescimento económico ilimitado (Du Pisani, 2007, p. 89).

Apesar de o ponto de vista antropocêntrico normalmente se sobrepor ao ecocêntrico, o desenvolvimento sustentável, apesar de conter uma contradição existencial entre os seu termos, almeja combinar os conceitos de progresso, sustentabilidade, crescimento e desenvolvimento (Du Pisani, 2007, p. 94).

O conceito de desenvolvimento sustentável implica conhecer os limites naturais da capacidade da biosfera em absorver os efeitos da atividade humana, eventualmente conduzindo a uma alteração do atual modelo de desenvolvimento, através da gestão adequada da tecnologia e da organização social, de modo a criar um nova era de desenvolvimento económico (World Commission on Environment and Development, 1987, p. 16).

No entanto, sendo ainda hoje a principal referência, este conceito sofre de imprecisão, levando amiúde a várias interpretações, alguma vezes contraditórias, pelo que haverá a necessidade imperiosa de especificar e detalhar para cada área ou setor (Edwards, 2008, p. 20).

De facto, a esmagadora maioria da população mundial e a própria ciência económica não levam em linha de conta qualquer tipo de restrição ao crescimento, intrinsecamente associada a uma ideia de progresso e bem-estar. Tal apenas seria possível num mundo virtual, totalmente desmaterializado, o que, obviamente não é possível, devido aos limites materiais impostos pela biosfera (Santos, 2012, p. 149, 150).

2.1.1.1. ESTADO ESTACIONÁRIO

O crescimento económico sem precedentes dos meados do século XX criou a expetativa de um crescimento económico ilimitado, facto corroborado pelos economistas da escola neoclássica ortodoxa, os quais, como Sir John Hicks (1941), apesar de consciente que o consumo excessivo de recursos criaria problemas ambientais, rejeitava o conceito de "estado estacionário" em favor de uma "economia progressiva" (Du Pisani, 2007, pp. 87, 88).

É matematicamente demonstrável que o crescimento exponencial da economia é insustentável, conduzindo a uma rutura a médio-longo prazo, pelo que será necessário encontrar um outro modelo de desenvolvimento, compatível com a litosfera e a biosfera, na qual a economia se baseia e onde opera (Santos, 2012, pp. 150, 151).

> Consideremos um exemplo concreto. Os países mais industrializados têm frequentemente como objetivo assegurar um crescimento anual da economia de pelo menos 3%. As economias emergentes ambicionam manter crescimentos anuais superiores, como é o caso da China, que nos últimos trinta anos teve um crescimento médio anual de 10%. Imaginemos, porém, que se elege como objetivo um crescimento anual da economia mundial de 3%, o que, tendo em conta as tendências e expectativas recentes, é bastante modesto. Se fosse possível manter este crescimento exponencial indefinidamente, a produção económica duplicaria todos os 24 anos. No ano de 2084, a produção económica global seria oito vezes maior do que em 2011. Será isto credível? (Santos, 2012, p. 150)

A este novo modelo económico e financeiro, que, enquanto assegura e promove a justiça e equidade social, também deverá ser compatível a médio e longo prazo com os ecossistemas, designamos de *estado estacionário* (Santos, 2012, pp. 152, 153), ou segundo a definição de Georgescu-Roegen (1906-1994): […] sistema económico em que unidades económicas invariáveis (mas não necessariamente idênticas entre si) prosseguem à mesma taxa, dia após dia, a produção e o consumo." (Georgescu-Roegen, 2008, p. 128)

2.1.1.2. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E SUSTENTABILIDADE

Sustentabilidade é um conceito que tem a ver com o reestruturar da relação entre as necessidades humanas num determinado contexto temporal e o ambiente social e biofísico, com vista à prossecução do desenvolvimento sustentável.

Tornou-se corrente que a sustentabilidade assenta em três pilares ou dimensões: o ambiental, o económico e o social, tratando-se afinal, de combinar num mesmo modelo de desenvolvimento os valores ecológicos (salvaguarda dos recursos naturais e preservação da natureza), económicos (satisfação das necessidades humanas e implementação da eficiência económica) e sociais (justiça distributiva, combate à pobreza e à exclusão social, e desenvolvimento do potencial humano) (Augusto, 2011, p. 37; Branco-Teixeira (Coord.) *et al.*, 2023, p. 46)

Ambas os conceitos são, por vezes, usados de forma indistinta e pouco cuidada por parte de vários atores políticos, institucionais e sociais: desenvolvimento sustentável é um objetivo que se materializa através da sustentabilidade, num processo dinâmico e complexo, que engloba os princípios válidos numa determinada época e num contexto social específico (Ilustração 2) (Edwards, 2008, p. 11; Rodrigues, 2009, p. 143).

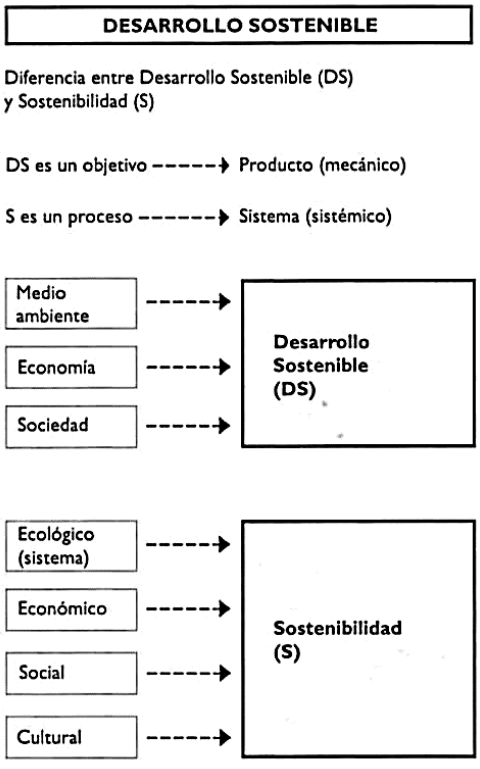


Ilustração 2 – Diferenças fundamentais entre os conceitos de desenvolvimento sustentável e sustentabilidade. (Edwards, 2008, p. 11)

Contudo, o que se tem verificado em maior ou menor grau, é que o modelo de desenvolvimento à escala global se encontra desequilibrado tendo em conta a dominância da componente económica face às restantes, principalmente, em relação à vertente ambiental.

Esta assimetria coloca em causa o desenvolvimento sustentável das nações e pode, inclusive, colocar seriamente em risco as gerações futuras, sendo este o fator crítico da equação tríplice da sustentabilidade: ambiente – economia – sociedade.

Este aspeto, designado como o *tripple bottom line*, comporta implicitamente o princípio dos limites de crescimento de acordo com as capacidades do planeta: "Isto sugere que o desenvolvimento apenas pode ser mantido por uma sociedade global que reconhece a impossibilidade de expandir a sua população e a sua economia de uma forma indefinida." (Rodrigues, 2009, p. 39).

O primeiro economista a chamar a atenção para esta evidência foi Georgescu-Roegen, ao demonstrar a relação existente entre a economia e o ambiente (facto controverso, que à época (1971) lhe valeu o anátema dos seus pares), bem como a importância da 2ª lei da termodinâmica[1] (lei da entropia) na gestão do fluxo de materiais (matérias-primas, produtos e resíduos), e que constituíram o ponto de partida para a designada economia ecológica, precursora da economia circular (Cechin e Veiga, 2010, p. 446, 448).

Em breves palavras, a entropia representa o grau de dissipação de energia no interior ou no ambiente externo, para que um determinado sistema funcione. Tratando-se de um sistema isolado, a entropia – grau de disfunção ou desordem de um sistema – não pode nunca diminuir, e em todo o processo natural produz-se um aumento da mesma (Yeang, 2007, p. 26).

Apesar da dificuldade em definir de um modo completo, intemporal e objetivo o desenvolvimento sustentável, de modo a poder integrar as suas múltiplas dimensões, é de salientar o contributo de Richard Heinberg (2008), ao enunciar os "cinco axiomas da sustentabilidade" (Heinberg, 2007, p. 5; Rodrigues, 2009, p. 17):

1. Tainter's Axiom: Any society that continues to use critical resources unsustainably will collapse. Exception: A society can avoid collapse by finding

[1] A entropia de um sistema isolado aumenta durante as transformações reais por ele sofridas e permanece constante no equilíbrio.

replacement resources. Limit to the exception: In a finite world, the number of possible replacements is also finite.

2. Bartlett's Axiom: Population growth and/or growth in the rates of consumption of resources cannot be sustained.

3. To be sustainable, the use of renewable resources must proceed at a rate that is less than or equal to the rate of natural replenishment.

4. To be sustainable, the use of non-renewable resources must proceed at a rate that is declining, and the rate of decline must be greater than or equal to the rate of depletion. The rate of depletion is defined as the amount being extracted and used during a specified time interval (usually a year) as a percentage of the amount left to extract

5. Sustainability requires that substances introduced into the environment from human activities be minimized and rendered harmless to biosphere functions, In cases where pollution from the extraction and consumption of non-renewable resources that has proceeded at expanding rates for some time threatens the viability of ecosystems, reduction in the rates of extraction and consumption of those resources may need to occur at a rate greater than the rate of depletion.(Heinberg, 2007, pp. 6–13).

Os axiomas acima enunciados, que pretendem dar uma definição mais palpável e concreta de desenvolvimento sustentável, são validados pelo aplicação do método científico, não abrangendo a vertente social, a qual por razões éticas se encontra limitada em termos de experimentação e teste (Rodrigues, 2009, p. 18).

Podemos revisitá-los, de modo a aprofundar o assunto:

1. Qualquer sociedade, que use continuamente recursos críticos de modo insustentável, entrará em colapso. 2. O crescimento populacional e/ou o crescimento das taxas de consumo dos recursos não é sustentável.3. Para ser sustentável, o uso dos recursos renováveis deve seguir uma taxa que deverá ser inferior ou igual à taxa de reposição. 4. Para ser sustentável, o uso de recursos não renováveis tem de evoluir a uma taxa em declínio, e a taxa de declínio deve ser maior ou igual à taxa de esgotamento. 5. A sustentabilidade requer que as substâncias introduzidas no ambiente pela atividade humana sejam minimizadas e tornadas inofensivas para as funções da biosfera (Caporal, 2016, p. 394).

Os limites ao consumo ou a não capacidade de renovação dos recursos planetários (água, solo, matérias-primas, energia, etc.) são o reflexo de um planeta finito, cuja exaustão poderá conduzir ao colapso. A insustentabilidade é atingida se a sua utilização não for inferior ao rácio de substituição, e se as substâncias, assim como a energia,

introduzidas pela tecnologia nesse processo, não forem minimizadas e compatíveis com a biosfera.

No caso do ambiente edificado, o consumo intensivo de energia fóssil e de minérios como o Ferro (Fe), Nitrogénio (N) ou Cobre (Cu), entre outros, utilizados no processo de fabrico de materiais e de construção, aceleraram o aumento da entropia dos ecossistemas por via da sua utilização massiva, a um ritmo superior da capacidade de reposição do Planeta.

O acima exposto vai totalmente ao encontro da evidente dicotomia existente a capacidade da biosfera em satisfazer as necessidades humanas básicas e o estado de desenvolvimento técnico e social que permite a sua efetiva gestão, com vista ao desenvolvimento sustentável (Yeang, 2007, p. 26, 27).

Já em 1972, o primeiro relatório do Clube de Roma (**Relatório Meadows**) chamava a atenção para o esgotamento a prazo das matérias-primas e combustíveis fósseis, fator que na época era mais o preocupante, pelo seu impacto económico e social, conforme explanado pelos autores, citados por Du Pisani (2007):

> If the present growth trends in world population, industrialization, pollution, food production, and resource depletion continue unchanged, the limits to growth on this planet will be reached sometime within the next one hundred years. The most probable result will be a rather sudden and uncontrollable decline in both population and industrial capacity (Du Pisani, 2007, p. 90).

Contudo, vinte anos mais tarde (1992), o segundo relatório com o mesmo nome (e que paradoxalmente teve pouca projeção pública), enfoca a urgência do tema dos resíduos e da poluição associada, na medida em que constata a ultrapassagem dos "[…] limites de capacidade de carga da Terra […]" (Grinevald e Rens, 2008, p. 18), e que o processo entrópico e linear da economia não se adequa ao funcionamento circular da biosfera:

> Desde os tempos pré-históricos, o desenvolvimento da cultura material das sociedades humanas está associado a essa exploração da matéria mineral concentrada localmente em jazidas excecionais que ocupam um volume ínfimo relativamente às enormes massas da crusta terrestre. Durante milénios, essa exploração mineira permaneceu muito marginal relativamente aos recursos naturais renováveis de origens vegetais e animais. Mas, desde a revolução termoindustrial do seculo XIX, o extraordinário crescimento industrial das nações ditas modernas ou desenvolvidas depende de uma excecional abundância mineral, inseparável do fantástico progresso científico e técnico da civilização capitalista ocidental. Todavia, é uma ilusão do pensamento linear, da mitologia moderna do progresso e do desenvolvimento, acreditar que essa abundância

> é desprovida de consequências ecológicas e não tem limites (Grinevald e Rens, 2008, p. 15,16).

Já o relatório **Factor Four: doubling wealth halving resource use** (1997) elaborado por um grupo de peritos do Rocky Mountain Institute, coloca o foco na ecoeficiência, salientando "[…] que é mesmo possível a humanidade duplicar o seu bem-estar reduzindo simultaneamente para metade a pressão sobre os recursos naturais disponíveis." (Rodrigues, 2009, p. 40)

Ou seja, pela primeira vez é apontada a possibilidade de uma dissociação (*delink)* entre o crescimento económico (bem-estar) e a poluição associada (recursos naturais, energia e resíduos) (Rodrigues, 2009, p. 40; Augusto, 2011, p. 49; Edwards, 2008, p. 7). No entanto, as evidências demonstram que o crescimento económico tem estado intrinsecamente associado com a respetiva pegada ecológica (Ilustração 3), pelo que, sendo o *delink* uma característica da economia circular, tal ainda está longe de constituir uma realidade (Bauwens, 2021, p. 1).

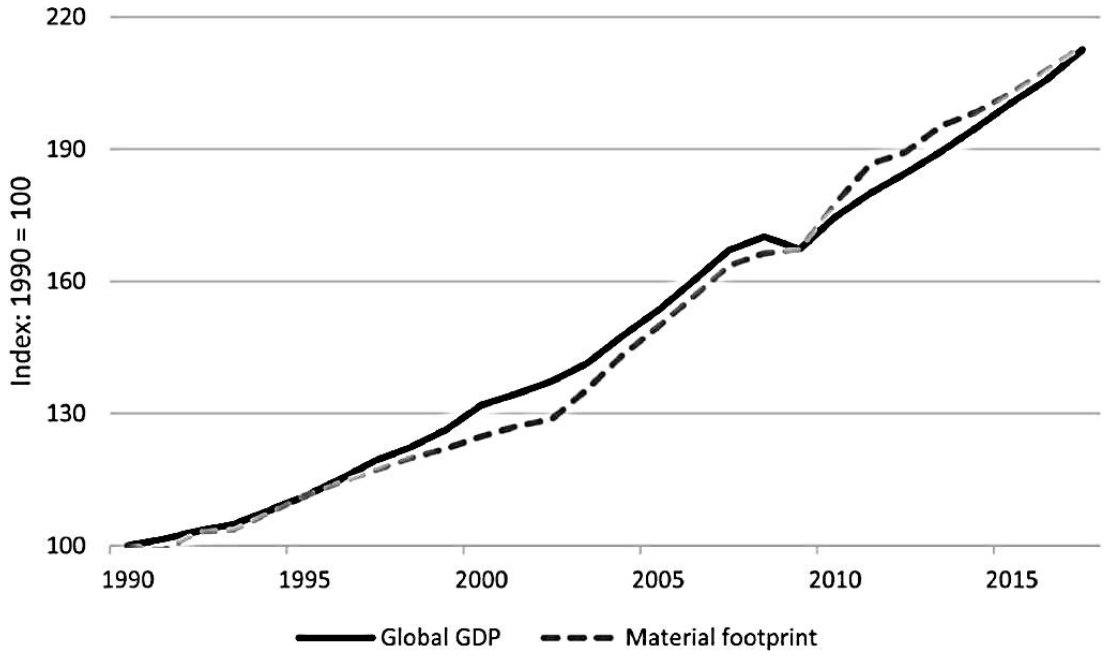


Ilustração 3 – Relação entre o Produto Interno Bruto Global e a Pegada Ecológica. (Bauwens, 2021, p. 2).

Nesta temática, assume especial pertinência a questão da reciclagem, tantas vezes exaltada e identificada com os princípios da economia circular: de acordo com a lei da entropia (2ª lei da termodinâmica) será impossível a reciclagem completa dos nutrientes técnicos, tendo em conta os limites termodinâmicos e o problema da qualidade residual dos materiais sucessivamente reciclados, fenómeno, que no nosso entender, não tem sido devidamente considerado (Augusto, 2011, p. 53; Cechin e Veiga, 2010, p. 446).

Na mesma linha, e de modo inequívoco, o Professor Charles J. Kibert (1947-2021) afirma: “Because recycling is not thermodynamically efficient, dissipation of residue into the biosphere is inevitable (Kibert, 2008, p. 7).

Não que a reciclagem seja técnica ou eticamente inútil, impossível ou desnecessária, todavia, não é possível eliminar por inteiro a baixa entropia associada ao processo industrial de matérias primas minerais e de materiais sintéticos (Grinevald e Rens, 2008, p. 28), pelo que um sistema económico orientado para a sustentabilidade, tal como o preconizado no conceito de economia circular, terá necessariamente de ser baseado em matérias-primas e produtos renováveis e compostáveis, que possam ser gerados e absorvidos pela biosfera.

2.1.1.3. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E CONSTRUÇÃO

O conceito de construção sustentável deriva diretamente da matriz do desenvolvimento sustentável, integrando harmoniosamente as vertentes económica, social e ambiental da sustentabilidade, num processo holístico que visa estabelecer um equilíbrio dinâmico entre o capital natural e o ambiente construído.

Contudo, no caso específico do edificado, alguns autores são da opinião que faz sentido adicionar uma quarta categoria: a vertente cultural., tendo em conta a preservação e transmissão do património e dos valores culturais às futuras gerações (Ilustração 4):

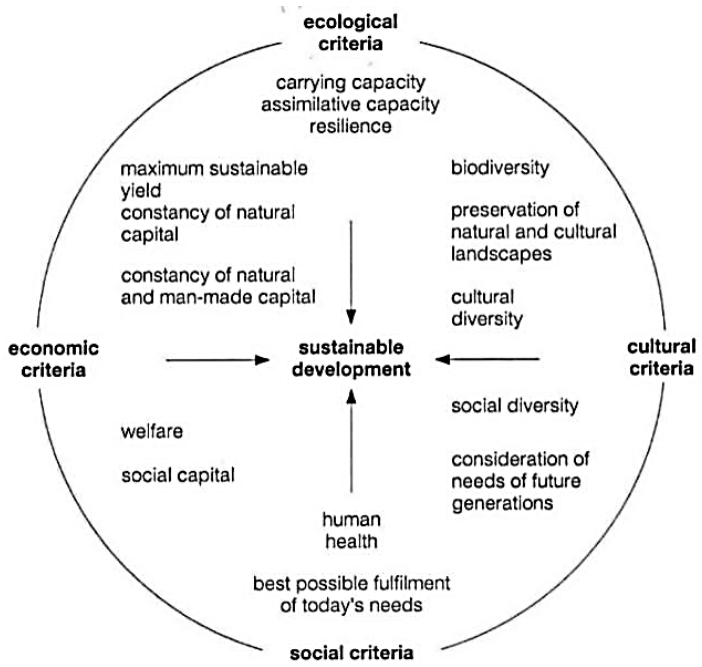


Ilustração 4 – As quatro dimensões do desenvolvimento sustentável, (König *et al.*, 2010, p. 9)

> When addressing the built environment, a further important dimension is added to the normal three dimensions mentioned above; the conservation of non-material, cultural values for future generations. Cultural diversity is as essential for the identity of societies as biodiversity is for nature, It is not just a matter of listed monuments and ensembles, but rather the built environment as the product of human history. As architectural heritage, it represents a now-renewable resource (König *et al.*, 2010, p. 8).

A sua definição foi pela primeira vez enunciada em 1994, por Kibert , no âmbito da conferência do Conseil International du Batiment (CIB) da seguinte forma: "[…] creating and operating a healthy built environment based on resource efficiency and ecological design" (Kibert, 2008, p. 6).

Nessa mesma conferência, foram enunciados sete princípios orientadores para a Construção Sustentável, nomeadamente: 1. Redução do consumo de recursos naturais 2. Reutilização de recursos 3. Utilização de recursos reciclados 4. Proteção da Natureza 5. Eliminação de tóxicos 6. Aplicação da análise de Custos de Ciclo de Vida na tomada de decisão 7. Orientação para a Qualidade (Kibert, 2008, p. 7; Pinto e Inácio, 2018, p. 40, 41; Augusto, 2011, p. 59).

Importa realçar que Kibert já menciona o fecho do ciclo dos materiais (*cloosing loops*), com a finalidade de evitar resíduos e emissões poluentes, numa antevisão dos princípios da economia circular aplicados à construção:

> Sustainable construction considers the role and potential interface of ecosystems to provide services in a synergistic fashion. With respect to materials selection, closing materials loops and eliminating solid, liquid, and gaseous emissions are key sustainable objectives. *Closed loops* describes a process of keeping materials in productive use by reuse and recycling rather than disposing of them as waste at the end of product or building life cycle. Products in closed loops are easily disassembled, and the constituent materials are capable and worthy of recycling (Kibert, 2008, p. 7).

No atual paradigma, a indústria da construção tem um papel relevante na economia e na sociedade, com forte contribuição para o Produto Interno Bruto (PIB) e para o emprego, entre outros indicadores económicos e sociais. Contudo, as consequências ambientais são caracterizadas por um forte impacte negativo, o qual deverá ser devidamente avaliado, mitigado e minimizado, sendo responsável, à escala global, pela afetação de cerca de 50% dos recursos naturais não renováveis, pela geração de 40% dos resíduos sólidos e das emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) (Amado *et al.*, 2015, pp. 23, 24).

Uma característica específica do sector é a geração de riqueza pela Formação Bruta de Capital Fixo[2] (FBCF) pelo que faz todo o sentido, no atual contexto de transição, que os aspetos ambientais do edificado sejam devidamente equacionados desde o princípio, como forma de acrescentar valor ao capital gerado.

Edifícios projetados e construídos com critérios de sustentabilidade (Ilustração 5) serão, seguramente, investimentos mais seguros comparativamente a outros energeticamente ineficientes ou pouco saudáveis (Edwards, 2008, pp. 24, 25).

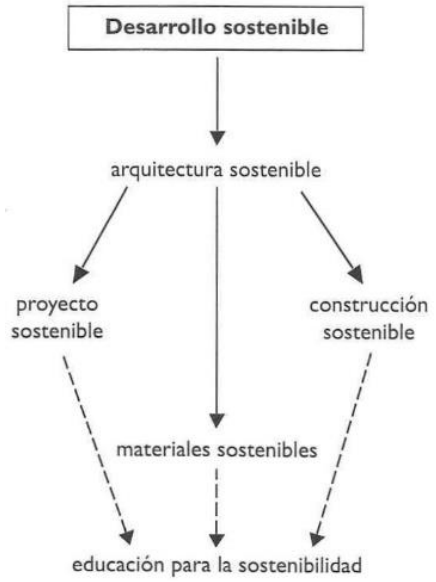


Ilustração 5 – Desenvolvimento sustentável e a sua relação com a arquitetura. (Edwards, 2008, p. 20)

Num sentido estrito e simplista, grande parte do trabalho relacionado com o projeto e a arquitetura sustentáveis estão, em ultima análise, relacionadas com aspetos ambientais à escala global, nomeadamente através da diminuição do carbono operacional e do carbono incorporado, por via da implementação de medidas ativas e passivas de eficiência energética e de critérios de seleção de materiais, com vista a manter o valor económico e social ao longo do tempo (Edwards, 2008, p. 3).

[2] A Formação Bruta de Capital Fixo engloba as aquisições líquidas de cessões, efetuadas por produtores residentes, de ativos fixos durante um dado período e ainda determinados acréscimos ao valor de ativos não produzidos obtidos através da atividade produtiva de unidades de produção ou institucionais. Os ativos fixos são ativos produzidos utilizados na produção durante mais de um ano. Compreende valores quer positivos quer negativos. Com valores positivos destacam -se: (i) ativos fixos adquiridos, novos ou existentes; (ii) ativos fixos novos ou existentes adquiridos pelo utilizador através de um contrato de locação financeira; (iii) melhoramentos substanciais em ativos fixos e monumentos históricos existentes; (iv) crescimento natural dos ativos naturais de produção continuada. Com valores negativos, identificam-se as alienações de ativos fixos, que são registadas como aquisições negativas (Conselho das Finanças Públicas, 2015, p. 18).

Neste contexto, os arquitetos (e demais agentes do setor) têm um importante papel a desempenhar rumo a um mundo mais sustentável. Por essa razão, é importante tornar tangível e suscetível de aplicação os três pilares da sustentabilidade à arquitetura e à indústria da construção (Ilustração 6).

Uma das maneiras é mediante a publicação de guias práticos ou recomendações, como **a Recomendação**[3] **112/1**, da Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), de forma a auxiliar clientes e projetistas a selecionarem critérios de sustentabilidade no edificado, com vista à sua efetiva implementação e quantificação (Hegger *et al.*, 2008, p. 191).

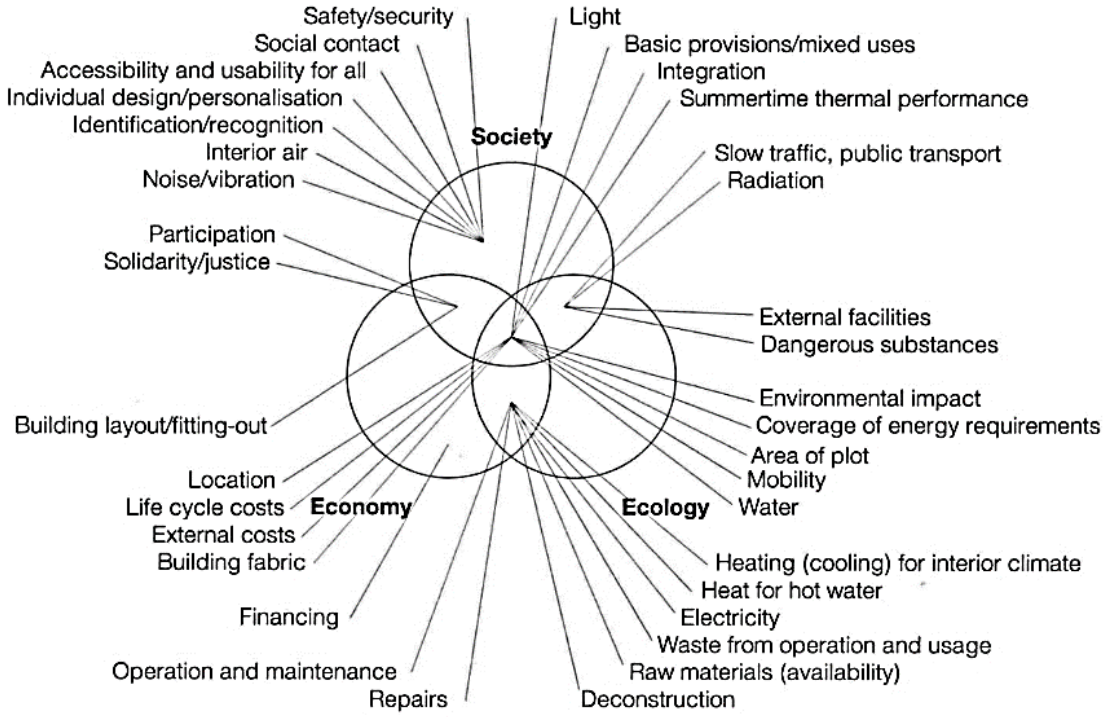


Ilustração 6 – As três dimensões da sustentabilidade na prática do edificado. (Hegger *et al.*, 2008, p. 192)

Para além de outros instrumentos cada vez mais divulgados e recorrentes, a existência de guias ou recomendações de sustentabilidade aplicadas ao edificado, adaptados ao contexto e devidamente atualizados, constituem na nossa opinião uma ferramenta prática indispensável à implementação de boas práticas no setor Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), Portugal, à semelhança de outros países.

[3] Recommendation SIA 112/1, sustainable construction – buildings (2004)

2.1.2. AGENDA 2030 E OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A designada **Agenda 2030 – Resolução A/RES/70/1 – Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**, foi aprovada na Cimeira da Organização das Nações Unidas a 25 de setembro de 2015, tendo entrado em vigor em 2016:

> This Agenda is a plan of action for people, planet and prosperity. It also seeks to strengthen universal peace in larger freedom. We recognize that eradicating poverty in all its forms and dimensions, including extreme poverty, is the greatest global challenge and an indispensable requirement for sustainable development. All countries and all stakeholders, acting in collaborative partnership, will implement this plan. […] We are determined to take the bold and transformative steps which are urgently needed to shift the world on to a sustainable and resilient path. […]. The 17 Sustainable Development Goals and 169 targets which we are announcing today demonstrate the scale and ambition of this new universal Agenda. They seek to build on the Millennium Development Goals and complete what they did not achieve. […]. They are integrated and indivisible and balance the three dimensions of sustainable development: the economic, social and environmental. The Goals and targets will stimulate action over the next 15 years in areas of critical importance for humanity and the planet (United Nations. General Assembly, 2015, p. 1,2).

Constituída por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Tabela 1), interligados e globais, 169 metas e mais de 200 indicadores, representam uma evolução face aos Objetivos de Desenvolvimento do Milénio (ODM) 2000-2015, que foi considerado demasiado restrito e orientado para os países em via de desenvolvimento, sem considerar devidamente o papel dos vários *stakeholders,* envolvidos (United Nations. General Assembly, 2015, p. 1,2; Alves e Fernandes, 2020, p. 10).

2.1.2.1. AGENDA 2030: UM COMPROMISSO INADIÁVEL

De facto, para além de outros aspetos, a ausência de integração e interação entre os governos, empresas e sociedade civil veio a revelar-se insuficiente no passado, pelo que a Agenda 2030, através da enunciação, implementação e monitorização aos diversos níveis, veio introduzir uma nova dinâmica de parcerias, com vista à efetiva introdução das mudanças necessárias. De realçar, que esta posição é tida como um fator crítico para a prossecução dos ODS:

> Governments have responsibility to lead the way by setting national implementation plans, taking action to prepare the enabling environment and letting their constituents know that this agenda is important. At the same time, business will be indispensable in achieving the SDGs. Private sector action will be key to the success of each goal – through responsible business operations, new business models, investment, innovation and technology, and collaboration (United Nations Global Compact, 2015, p. 2).

Tabela 1 – Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Goal 1.	End poverty in all its forms everywhere
Goal 2.	End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture
Goal 3.	Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages
Goal 4.	Ensure inclusive and equitable quality education and promote lifelong learning opportunities for all
Goal 5.	Achieve gender equality and empower all women and girls
Goal 6.	Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all
Goal 7	Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all
Goal 8.	Promote sustained, inclusive and sustainable economic growth, full and productive employment and decent work for all
Goal 9.	Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation
Goal 10.	Reduce inequality within and among countries
Goal 11.	Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable
Goal 12.	Ensure sustainable consumption and production patterns
Goal 13.	Take urgent action to combat climate change and its impacts*
Goal 14.	Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources for sustainable development
Goal 15.	Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss
Goal 16.	Promote peaceful and inclusive societies for sustainable development, provide access to justice for all and build effective, accountable and inclusive institutions at all levels
Goal 17.	Strengthen the means of implementation and revitalize the Global Partnership for Sustainable Development

Fonte: [Adaptado a partir de:] United Nations. General Assembly (2015, p. 14)

Para esse efeito foi criado o UN Global Compact, uma plataforma local e global, que integra todas as empresas que desejem implementar os ODS (Ilustração 7) no seu modelo de negócio e nos contributos para a sociedade. Tais intenções são materializadas em dez princípios nas áreas dos direitos humanos, trabalho, ambiente e

corrupção (United Nations Global Compact, 2015, p. 9), refletidos no seu logotipo (Ilustração 7).



Ilustração 7 – Logotipo dos ODS. ([Adaptado a partir de:] United Nations Global Compact, 2015, p. 1)

2.1.2.2. AMBIENTE CONSTRUÍDO E SUA RELAÇÃO COM OS ODS

O ambiente construído representa cerca de 40% do consumo global de energia e das respetivas emissões de carbono equivalente, cifrando-se anualmente em cerca de 15 gigatoneladas (Gt CO_2e) (ARUP e WBCSD, 2023, p. 10), sendo por isso um fator crítico e incontornável para o cumprimento dos objetivos do Acordo de Paris [4] (AP) (Augusto, 2018, p. 22; Laski e Burrows, 2017, p. 7; Goubran, 2019, p. 7).

Há ainda a acrescentar que, globalmente, o setor da construção consome aproximadamente 12% da água potável, 30% das matérias-primas, gerando concomitantemente 20% dos efluentes líquidos e 40% dos resíduos levados a aterro (Goubran, 2019, p. 7).

Sendo a descarbonização uma condição necessária para implementação do desenvolvimento sustentável, e tendo em conta a relevância do ambiente construído, a meta da limitação do aumento da temperatura em 2ºC (preferencialmente 1,5ºC) até final do século, apenas poderá ser alcançada por via da redução para metade do

[4] O Acordo de Paris visa alcançar a descarbonização das economias mundiais e estabelece como um dos seus objetivos de longo prazo limitar o aumento da temperatura média global a níveis bem abaixo dos 2ºC acima dos níveis pré-industriais e prosseguir esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5ºC, reconhecendo que isso reduzirá significativamente os riscos e impactos das alterações climáticas.” (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021)

carbono envolvido (incorporado e operacional) até 2030, tendo em vista a neutralidade carbónica do setor em 2050 (Ilustração 8) (ARUP e WBCSD, 2023, p. 10).

Tomar ações com vista à obtenção da eficiência carbónica e energética em todas as fases do ciclo de vida do edificado, por via da conceção e construção de edifícios *net-zero* ou de baixo-carbono é, indubitavelmente, uma das medidas mais eficazes para atingir a neutralidade carbónica e combater a poluição associada à escala global, além de representar uma oportunidade em termos económicos, sociais e ambientais, indo ao encontro do preconizado nos ODS (Augusto, 2018, p. 22).

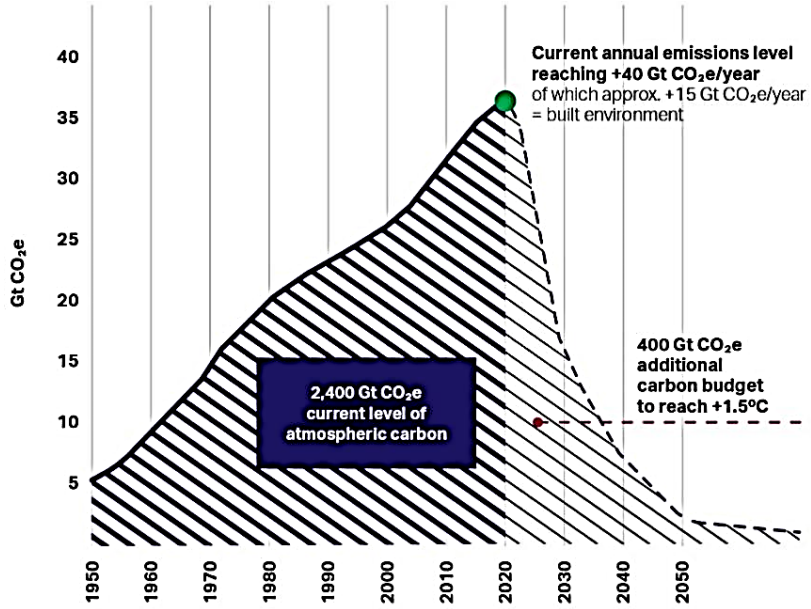


Ilustração 8 – Emissões de carbono equivalente passadas e projeções futuras. (ARUP e WBCSD, 2023, p. 10)

Segundo o World Green Building Council (WGBC), uma rede global de organizações (conselhos) nacionais que agrupam vários agentes do setor AEC com vista a promover a sustentabilidade na construção, existem nove ODS com especial relevância para o setor: 3, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15 e 17, que abarcam várias dimensões, tais como saúde, distribuição da riqueza, coesão social e utilização sustentável de recursos naturais (economia circular), entre outros (Layla *et al.*, 2019, p. 18; Augusto, 2018, p. 22), tal como apontado por Czerwinska (2023):

> While many might look at a building and see only an inanimate structure, we look at buildings and see both the physicality *and* the process by which they are created – an opportunity to not only save energy, water and carbon emissions but to educate, create jobs, strengthen communities, improve health and wellbeing, and much, much more. Green building is a true catalyst for addressing some of the world's most pressing issues. […] When it comes to the remaining SDGs, direct links between them and green buildings may be less explicit, but that's not to say they don't exist at all. […] For all of these

> reasons, we believe that the green building movement will mean significant progress in decoupling economic growth from climate change, poverty and inequality, helping to achieve the goals and creating a greener world that we can all be proud to call home (Czerwinska, 2023).

Assim, apesar de se poder discutir sobre o maior ou menor impacto do setor – ambiental, social, económico e cultural – não restam dúvidas que existe, ao dia de hoje, um vasto consenso no sentido de alinhar a indústria da construção e, necessariamente, a arquitetura, pelos princípios da sustentabilidade e de esta se assumir como um agente ativo para a prossecução do desenvolvimento sustentável.

Tal pode ser comprovado pela análise de conteúdo das 169 metas em que se dividem os 17 ODS, e onde se constata que 74 delas (44%) são dependentes (de forma direta ou indireta) da construção e do imobiliário, em maior ou menor percentagem, com destaque para o ODS 7 – Energia Limpa e Acessível, ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis, ODS 6 – Água Limpa e Saneamento e ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestruturas (Tabela 2).

De notar que a indústria da construção influencia todos os ODS e, em nove deles, com uma percentagem igual ou superior a 50% das metas, o que demonstra a sua relevância (Tabela 2) (Goubran, 2019, pp. 14, 15).

Tabela 2 – Metas ODS direta ou indiretamente dependentes das atividades da construção e do imobiliário.

Sustainable Development Goal	Dependence on construction and real estate activities			Percent of total targets
	Direct	Indirect	Prevailing dependence *	
7: Affordable and clean energy	2	3	Indirect	100%
11: Sustainable cities and communities	8	1	Direct	90%
6: Clean water and sanitation	4	3	Direct	88%
9: Industry, innovation and infrastructure	2	3	Indirect	63%
13: Climate action	1	2	Indirect	60%
8: Decent work and economic growth	0	7	Indirect	58%
12: Responsible consumption and production	1	5	Indirect	55%
15: Life on land	4	2	Direct	50%
2: Zero hunger	1	3	Indirect	50%
14: Life below water	2	2	Direct	40%
4: Quality education	1	3	Indirect	40%
3: Good health and well-being	2	2	Indirect	31%
1: No poverty	1	1	Direct	29%
5: Gender equality	0	2	Indirect	22%
17: Partnerships for the goals	0	4	Indirect	21%
10: Reduced inequalities	0	1	Indirect	10%
16: Peace, justice and strong institutions	0	1	Indirect	8%

Fonte: Goubran (2019, p. 15)

De igual modo, a ilustração 9 representa visualmente a dependência dos ODS relativamente às atividades da construção e do imobiliário: o tamanho do logotipo indica uma maior dependência (quanto maior, mais dependente) a localização no quadrante está correlacionada com o tipo de metas prevalecente, segundo as categorias de Engberg-Pedersen (*People* – *Environment* – *Society* – *Means*), e a distância ao centro indica o grau de relação direta (quanto mais ao centro, mais direta a ligação) (Goubran, 2019, p. 18).

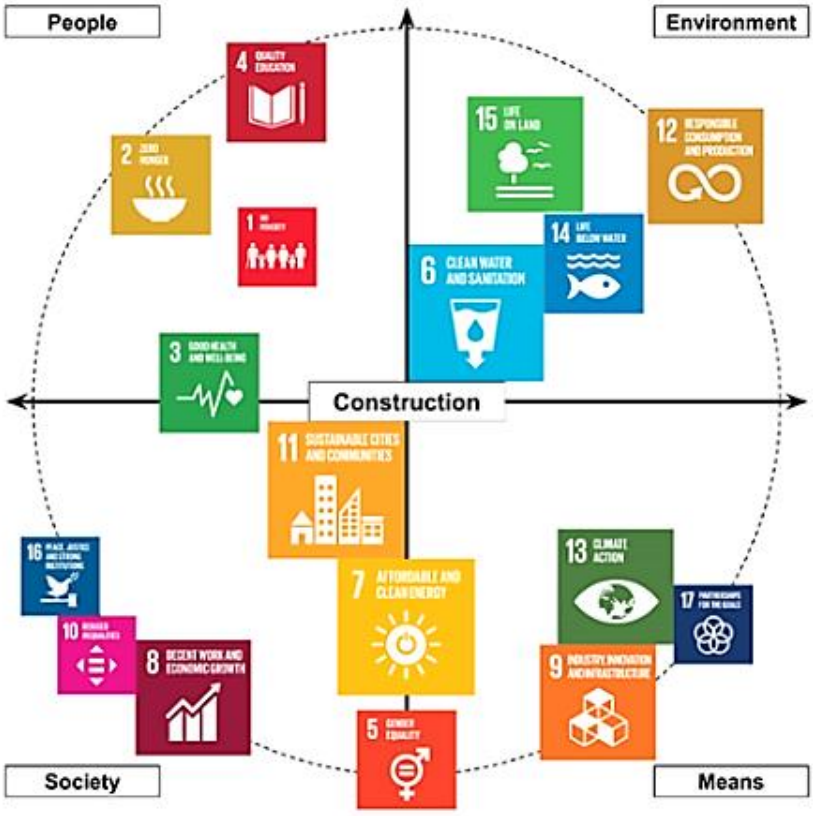


Ilustração 9 – Relação entre os ODS e as atividades da construção e do imobiliário. (Goubran, 2019, p. 18)

Para concluir esta abordagem, uma referência ao conceito de *Green Building* e à sua relação com os ODS. O comumente designado edifício *verde* foi entendido como aquele que é concebido e construído, visando alcançar um desempenho ambiental melhorado em relação ao convencional.

Posteriormente, este conceito tem vindo a ser alargado de modo a incorporar nos vários sistemas de avaliação (*rating tools*), nacionais e internacionais, parâmetros sociais, culturais e económicos indo ao encontro de uma definição no âmbito da sustentabilidade e não apenas de foro ambiental (Baohua Wen *et al.*, 2020, p. 2).

Alguns destes sistemas de avaliação começam a relacionar os vários parâmetros e critérios com os ODS, como é o caso do sistema alemão, o Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), integrando, desse modo, a Agenda 2030 na certificação de edifícios, e contribuindo para compensar a lacuna entre a certificação de edifícios e os ODS (Baohua Wen *et al.*, 2020, pp. 2, 3).

2.1.2.3. ARQUITETURA, ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO

Em Portugal, a fileira da construção onde o setor AEC se integra, é responsável por mais de 550,000 postos de trabalho e de 37 mil milhões de euros de volume de negócios, que representam cerca de 20% do PIB (Portugal. Gabinete do Ministro Adjunto e da Economia, 2019, pp. 1, 2; Portugal. Ministério da Economia e Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção, 2019, pp. 1, 2).

> O setor AEC vê-se hoje confrontado, a nível mundial, com relevantes desafios ambientais, tecnológicos e sociais que conduzirão a mudanças radicais de paradigma e exigirão, dos vários atores, uma elevada capacidade de adaptação e transformação de processos e procedimentos, os quais devem começar já a ser antecipados e preparados. Destacam-se, neste domínio, a preocupação crescente com questões ambientais e de sustentabilidade, designadamente em matéria de eficiência energética e de eco construção; a afirmação da indústria 4.0 que se traduz na necessidade de uma aposta permanente na inovação, investigação & desenvolvimento, com vista à criação de novos materiais e equipamentos; e a emergência de novos processos de gestão e operação que requer um investimento permanente na formação e requalificação de recursos humanos (Portugal. Ministério da Economia e Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção, 2019, p. 2).

O acrónimo AEC ressalta a colaboração e a integração das três disciplinas (arquitetura, engenharia e construção) com vista à conceção e execução de um projeto de edificação novo ou de reabilitação, de forma coordenada e eficaz, possibilitada pelas novas tecnologias digitais e indo ao encontro das novas tendências do mercado global, como a sustentabilidade, a construção modular e o Building Information Modelling (BIM) (PW Consulting, 2021; Rutkowski, 2021; Nemetschek Group, 2022).

De especial interesse, e intrinsecamente relacionados, são também os *clusters* Habitat Sustentável e Smart Cities Portugal, devendo ser incentivada a sua *interclusterização* com vista à concretização das medidas do setor, donde se destaca a promoção, “em larga escala” (IAPMEI, 2021, p. 25), dos princípios da economia circular.

2.1.3. SUSTENTABILIDADE E ECONOMIA CIRCULAR

Os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável incluem, como já assinalado, o ODS 12 – Padrões de Consumo e Produção Responsáveis, o qual irá conduzir a uma transição do modelo linear de produção e consumo, a favor de um outro, circular, ou seja, um sistema restaurador e regenerativo no qual todos os produtos são concebidos e comercializados tendo em conta a sua a reutilização, remanufactura ou reciclagem, baseado numa alteração substancial dos modelos de negócio (Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 8; Ellen MacArthur Foundation, 2015, pp. 1, 4).

De igual modo, o ODS 7 – Energias Renováveis e Acessíveis, assume especial relevância, pois não será possível implementar a economia circular sem a inclusão das energias renováveis, em substituição das energias fósseis, sendo este um dos seus princípios basilares (Ellen MacArthur Foundation, 2013, pp. 23, 24; Ellen MacArthur Foundation, 2015, p. 7).

2.1.3.1. DOIS CONCEITOS, UM OBJETIVO

Além dos benefícios dos modelos circulares de negócio – que conduzem à desmaterialização e à utilização de menos materiais e de energia – a necessária aplicação dos princípios do *ecodesign* e da ecoinovação desempenham um papel importante na manutenção do valor dos materiais e dos produtos ao longo do seu ciclo de vida, diminuindo os riscos associados à volatilidade e à escassez de matéria-prima.

De facto, vários estudos apontam para valores muito significativos de criação de riqueza e de emprego a partir da implementação dos princípios da economia circular nas empresas, pela qual, esta se tornou uma prioridade na política da Comissão Europeia (Tabela 3) (Hysa *et al.*, 2020, pp. 1, 2).

A economia circular, cujo termo surgiu em 1988 (Amado, 2025, p. 18), é encarada como uma das vias mais concretas e promissoras de alcançar o desenvolvimento económico respeitando os limites ambientais, ou seja, promovendo a sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável (Portugal. Direção-Geral das Atividades Económicas, 2023; União Europeia. Comissão, 2020, pp. 2, 17; Ellen MacArthur Foundation, 2015, pp. 9, 10; Ellen MacArthur Foundation, 2013, pp. 10, 11).

Tabela 3 – Economia circular como vetor de crescimento económico sustentável.

Environmental Impact	environment tax revenues
	recycling rate of municipal waste
Social Impact	environment tax revenues
	private investment, jobs, gross value added related to CE
	patents related to recycling
Economic Impact	environment tax revenues
	private investment, jobs, gross value added related to CE
	patents related to recycling
	trade in recyclable raw materials

Fonte: [Adaptado a partir de:] Hysa *et al.* (2020, p. 6)

Pode-se, então, considerar que a economia circular se apresenta como uma versão atualizada do conceito de sustentabilidade, focada na ecoinovação, com vista a almejar produtos e serviços ambientalmente orientados, economicamente viáveis e alinhados com os ODS, contribuindo na prática para uma transição para o desenvolvimento sustentável.

2.1.3.2. A INTER-RELAÇÃO

O conceito de sustentabilidade, já definido anteriormente como um conceito sistémico e assente na tripla linha de base, válido num determinado tempo e contexto, e tendo como objetivo a implementação do desenvolvimento sustentável (Rodrigues, 2009, p. 143) interseta-se com o de economia circular, na medida em que este se caracteriza como um subgrupo do primeiro, ao restringir o seu âmbito de atuação e, desse modo, torná-lo mais atrativo e dinâmico (Ilustração 10).

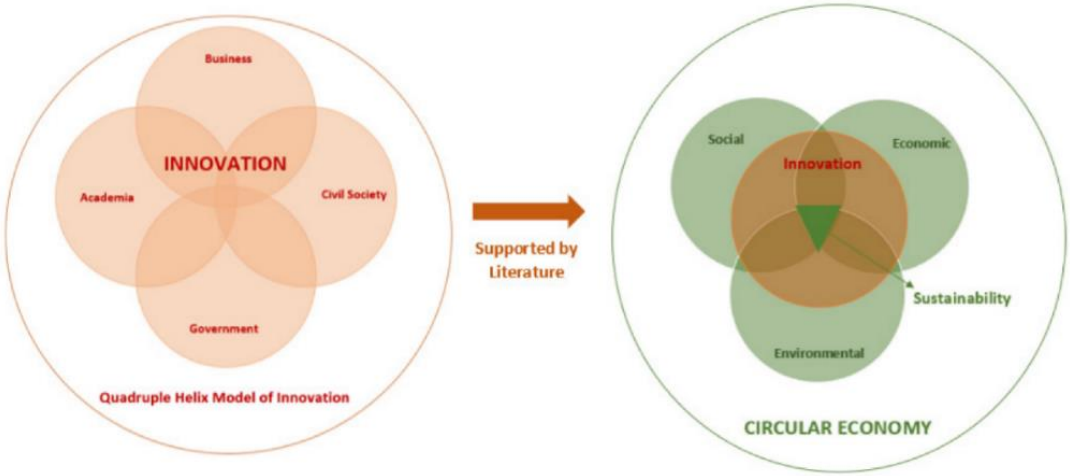


Ilustração 10 – A economia circular e a relação com a sustentabilidade. (Hysa *et al.*, 2020, p. 3)

Deste modo, a sustentabilidade e a economia circular são dois conceitos intrinsecamente relacionados, visando a prossecução do mesmo objetivo e com zonas comuns, sendo este último de cariz prático e operacional, em oposição a um conceito mais vago e estático – sustentabilidade – visando dotar as empresas e demais atores económicos, de inovação ao nível dos produtos e serviços, mas, também, ao nível da organização e de negócio (Hysa *et al.*, 2020, p. 2)

2.1.3.3. A ECONOMIA CIRCULAR COMO CONCEITO CAPACITANTE

A economia circular – que iremos definir e caracterizar seguidamente – assume-se, deste modo, como um conceito capacitante do desenvolvimento sustentável, desde logo plasmado no ODS 12, com vista à transição para uma *economia verde* ou regenerativa.

Visto à luz de um contexto mais amplo, em que os aspetos económicos, ambientais e sociais estão presentes e interligados, temos como referência na União Europeia, desde 2020, o Pacto Ecológico Europeu (EU Green Deal), delineando e agendando os princípios orientadores para um crescimento verde, em simultâneo com a promoção do bem-estar social, dentro dos limites dos ecossistemas (Ilustração 11).

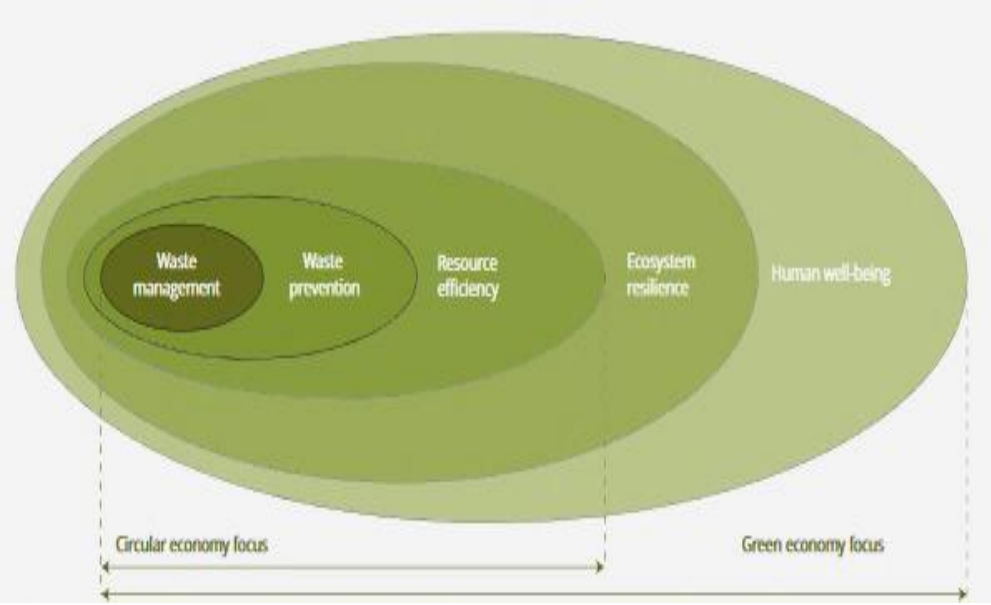


Ilustração 11 – Economia circular e economia verde. ([Adaptado a partir de:] European Environment Agency *et al.*, 2016, p. 31)

Nesta perspetiva, a economia circular – baseada na ecoeficiência e promovendo a ecoinovação – é condição necessária, mas não suficiente, para alcançar esses objetivos (European Environment Agency *et al.*, 2016, p. 31). Em todo o caso, e desde o início da

1ª Revolução Industrial, esta será, muito provavelmente, no curto e médio prazo, a grande oportunidade para transformar o paradigma global de produção e consumo, nomeadamente do setor AEC, rumo à sustentabilidade.

2.2. ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular é, de acordo com a Ellen MacArthur Foundation (EMF) um sistema industrial restaurativo e regenerativo (Ellen MacArthur Foundation, 2015, p. 2), concebido com vista a manter o máximo valor económico dos produtos ou serviços durante o maior período de tempo.

Faz uma distinção clara entre ciclos técnicos (tecnoesfera) e biológicos (biosfera) , e tem como finalidade última descorrelacionar o crescimento económico global do consumo dos recursos naturais finitos do planeta (Ellen MacArthur Foundation, 2015, p. 2; Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 7):

> A circular economy is an industrial system that is restorative or regenerative by intention and design. It replaces the 'end-of-life' concept with restoration, shifts towards the use of renewable energy, eliminates the use of toxic chemicals, which impair reuse, and aims for the elimination of waste through the superior design of materials, products, systems, and, within this, business models (Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 7).

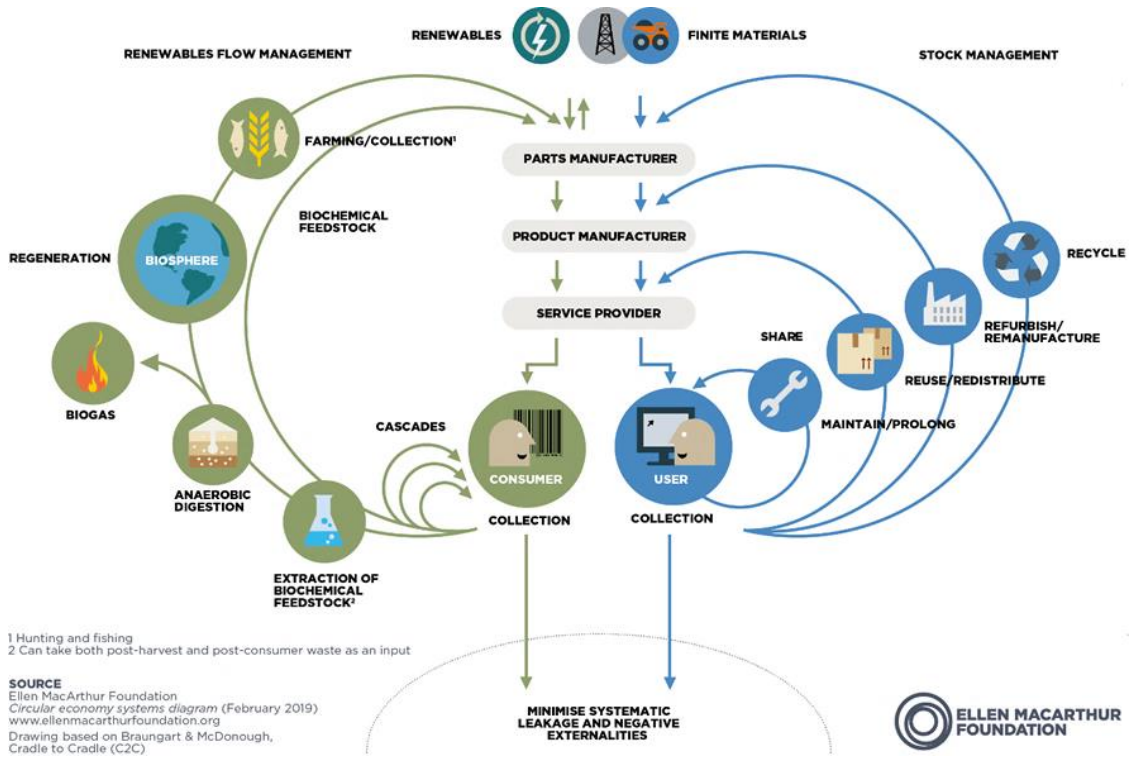


Ilustração 12 –Butterfly Diagram (diagrama borboleta) do sistema da economia circular.(Ellen MacArthur Foundation, 2023)

O Butterfly Diagram (Ilustração 12) ilustra esquematicamente as várias fases da implementação do sistema da economia circular, concebido em círculos fechados (*closed loops*), de modo a possibilitar que os recursos da biosfera e da tecnoesfera não extravasem, ou sejam desperdiçados, antes de tempo ou de modo indevido (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

De realçar que uma economia que se assuma como circular terá, necessariamente, de ser alimentada a partir de energias renováveis (solar, eólica, hídrica, etc.,) em substituição das de origem fóssil, o nem sempre é devidamente salientado.

2.2.1. O MODELO CONCEPTUAL

O conceito basilar da economia circular baseia-se na premissa de que a circularização dos fluxos de materiais e de energia ajudam a manter a utilização dos recursos naturais num estado estável (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

Como já referido, a economia circular descreve uma economia industrial caracterizada por dois tipos de fluxos: biológicos e tecnológicos. Os nutrientes biológicos são concebidos para reentrarem de modo seguro na biosfera, regenerando o ecossistema e providenciando a economia com materiais renováveis.

O fluxo tecnológico deverá ser concebido de modo a permitir a circularidade com alta qualidade, potenciando ao máximo a recuperação de valor, material e energia (Ellen MacArthur Foundation e Material Economics, 2019, p. 19).

Este modelo é baseado e implementado (entre outros princípios e técnicas) na Gestão de Fluxo de Materiais (GFM) ou Material Flow Management (MFM) e na Análise de Fluxo de Materiais (AFM) ou Material Flow Analysis (MFA), visando alcançar a eficiência na utilização dos recursos naturais, ao gerir de uma forma holística, o fluxo de materiais de empresas, cidades, regiões ou países (Augusto, 2016).

A MFA foi desenvolvida como uma metodologia para a quantificação de *stocks* e fluxos de materiais num determinado sistema, e o seu principal objetivo é a conservação da massa (balanço entre *inflows* e *outflows*) tendo em conta o tipo de substâncias, materiais ou produtos, desde a escala micro (processos) à macro (local, nacional ou global) (Barkhausen *et al.*, 2023, p. 2; Hendricks *et al.*, 2000, pp. 312–314):

> MFA is a tool which helps decision makers understand the metabolism of their region. It allows regional processes and activities such as construction, transportation, consumption and waste disposal to be linked systematically, together with inputs and outputs. More specifically, MFA examines the materials flowing into a given system (private household, company, region, city, etc,), the stocks and flows within this system and the resulting outputs from the system to other systems (Hendricks *et al.*, 2000, p. 313).

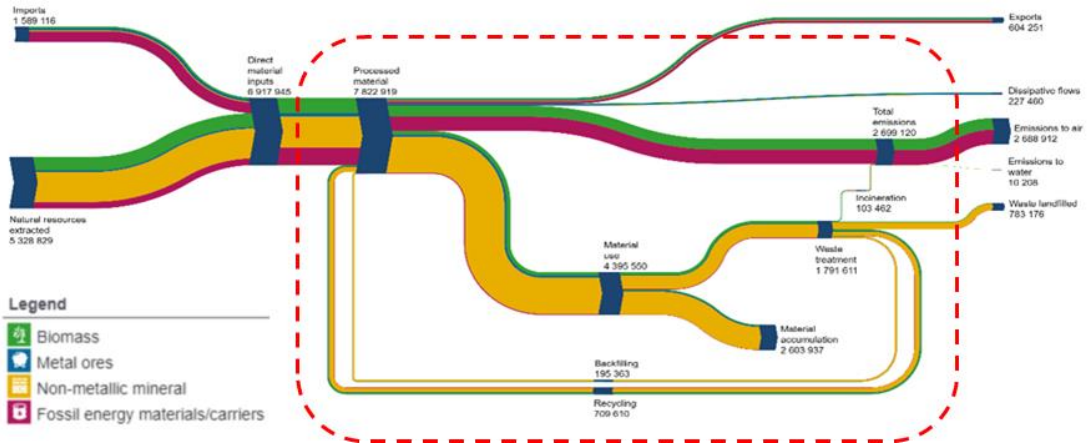


Ilustração 13 – Diagrama de Sankey relativo ao fluxo de materiais na União Europeia (EU 27) em 2010, em milhares de toneladas. Em destaque a circularidade dos materiais. ([Adaptado a partir de:] Eurostat, 2023)

Como exemplo da aplicação da MFA a nível macro, o fluxo de materiais da União Europeia (EU 27), em 2010 e 2021, está representado esquematicamente na Ilustração 13 e Ilustração 14, respetivamente. A área contornada a tracejado reflete a circularidade dos materiais representada por um diagrama de Sankey, onde a espessura das linhas representa a intensidade do fluxo em causa (Eurostat, 2023).

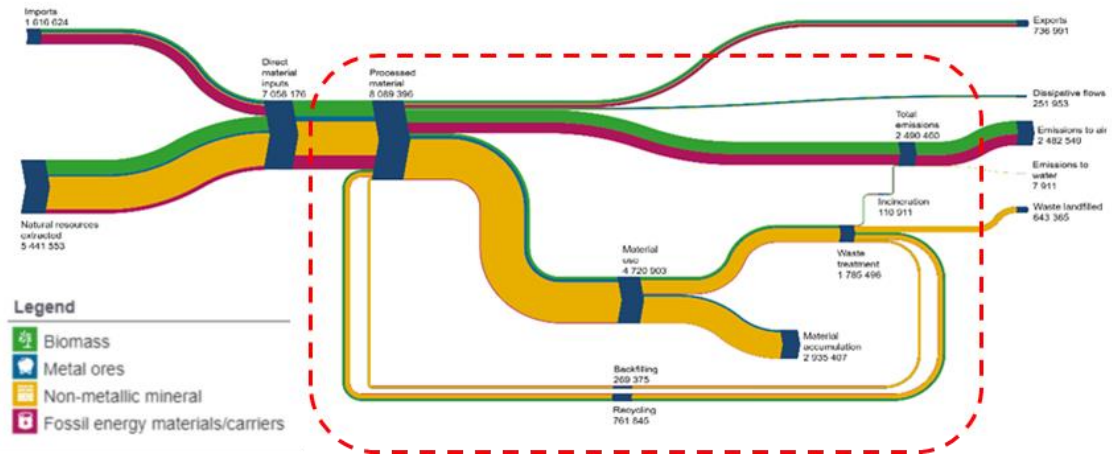


Ilustração 14 – Diagrama de Sankey relativo ao fluxo de materiais na União Europeia (EU 27) em 2021, em milhares de toneladas. Em destaque a circularidade dos materiais. ([Adaptado a partir de:] Eurostat, 2023)

Como se pode verificar, apesar de todas as iniciativas e ações levadas a cabo pela Comissão Europeia e pelos Governos nacionais, os resultados ficam aquém do que se poderia esperar (Tabela 4):

Tabela 4 – Circularidade do fluxo de materiais na UE 27.

Fase do Processo	2010 (Milhares de toneladas)	2021 (Milhares de toneladas)	Variação %
Processed material	7.822.919	8.069.396	3,1
Material use	4.395.560	4.720.903	6,89
Material accumulation	2.603.937	2.935.407	11,29
Waste treatment	1.791.611	1.785.496	(0,34)
Recycling	709.610	761.845	6,86
Backfilling	195.363	269.375	27,48
Total emissions	2.600.120	2.490.460	(4,22)

Fonte: [Adaptado a partir de:] Eurostat (2023)

Verifica-se no espaço temporal de 2010-2021 (11 anos) um ligeiro decréscimo dos indicadores *Waste treatment* (- 0,34%) e *Total emissions* (- 4,22%), mas um acréscimo de todos os outros, com destaque para *Material accumulation* (+ 11, 29%) e *Backfilling* (+27,48%), o que indica que a transição para a economia circular no espaço europeu necessita de ser acelerada.

2.2.1.1. ECONOMIA LINEAR E ECONOMIA CIRCULAR

O aumento da população mundial (as projeções apontam para 9,7 mil milhões de habitantes em 2050) e da melhoria dos padrões de consumo (erradicação da pobreza em linha com o ODS 1), conduzirão forçosamente a uma transição para novos modelos de negócio e para tecnologias de produção de bens e serviços (mais sustentáveis e circulares) onde o valor económico de um recurso é integralmente aproveitado, e a pressão sobre os recursos naturais é minimizada (State of Green, 2016, p. 8).

O modelo da economia circular surge da necessidade de alterar o atual modelo linear (*Take-Make-Waste*), para um outro de índole regenerativa (*Remake-Reuse-Recycle*), com evidentes oportunidades para os negócios e a economia. Contudo, no curto-prazo, a economia linear ainda será dominante e a transição não tem decorrido de modo tão célere e eficaz como seria desejável (State of Green, 2016, p. 8 ; Palmitessa, 2019).

> A transition to a circular economy is a paradigm shift that requires a change of mindset among, the financial sector, policy makers and companies. Cooperation between different stakeholders will be key to a successful transformation. We are only at the beginning of the journey towards unleashing the full potential of a circular economy. The future will provide new opportunities for innovations, use of digitisation, new models for reverse logistics and the shared economy (State of Green, 2016, p. 22).

Numa economia linear, os recursos naturais são extraídos, transformados em produtos e terminam o seu ciclo de vida desvalorizados, técnica e economicamente, como resíduos (Ilustração 15) (Davey, 2021, p. 1), sendo que no caso específico da indústria da construção, o paradigma linear vigente é a principal causa do seu significativo impacte ambiental (Charef e Emmitt, 2021, p. 1).

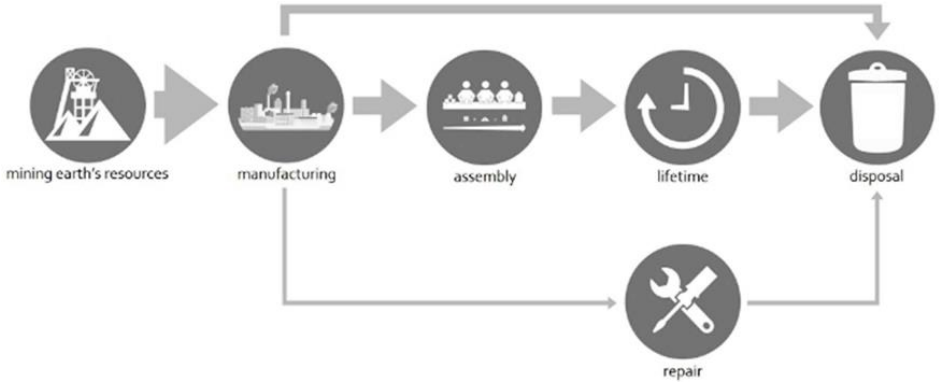


Ilustração 15 – Fluxo de materiais na economia linear. (Anastasiades *et al*., 2020, p. 3)

A gestão insustentável dos recursos naturais, dos resíduos e das emissões conduziram à degradação ambiental global e às alterações climáticas antropogénicas, com consequências graves, em muitos casos irreversíveis, colocando em causa direitos humanos básicos relacionados com a existência de "[…] um ambiente seguro, saudável e equilibrado […]" (Velenturf *et al.*, 2019, p. 964), colocando também em risco a estabilidade da economia.

Por oposição, a economia circular, como já indicado anteriormente, promove a circularidade do fluxo de materiais através da partilha, reutilização, reciclagem, reparação e remanufactura (Ilustração 16), possibilitando múltiplos mecanismos de criação de valor que estão desligados do consumo e da depleção dos recursos finitos, conduzindo à redução significativa de emissões e de resíduos, com vista à restauração e regeneração do sistema (Davey, 2021, p.2).

No âmbito da economia circular, e como mais adiante será desenvolvido, os sistemas de certificação (ambiental, de sustentabilidade ou de circularidade) poderão contribuir significativamente para avançar nesta direção, por via da influência na conceção dos

produtos ou serviços, quer dotando o consumidor de instrumentos para aceder a informação credível.

Destas certificações destacam-se, pela sua qualidade e relevância, a Declaração Ambiental de Produto (DAP) ou Environmental Product Declaration (EPD), a Pegada Ambiental de Produto (PAP) ou Product Environmental Footprint (PEF) e, muito em especial, a Cradle-to-Cradle (C2C) (Danish Cleantech Hub e State of Green, 2018, p. 6).

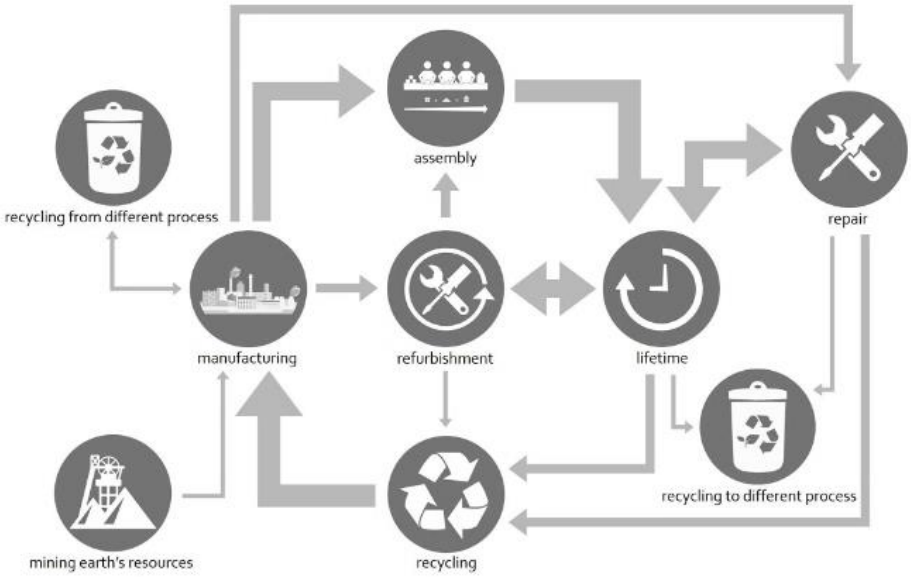


Ilustração 16 – Fluxo de materiais na economia circular (EC). (Anastasiades *et al.*, 2020, p. 3)

2.2.1.2. BIOSFERA E TECNOESFERA

A economia circular, sendo baseada nas energias e materiais renováveis, é definida e caracterizada por três princípios fundamentais:

1. Eliminação dos resíduos e da poluição;
2. Circularidade dos produtos e dos materiais no seu máximo valor;
3. Regeneração da natureza (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

Como já acima referido, existem dois ciclos circulares de fluxos que se desenrolam a partir da biosfera e da tecnoesfera: o ciclo biológico e o ciclo técnico.

Numa economia verdadeiramente circular, os recursos naturais são regenerados, recuperados e restaurados para o ciclo técnico, e isso é um traço distintivo. No caso do ciclo biológico, os nutrientes dos materiais biodegradáveis devem retornar e regenerar

a natureza, com o mínimo de intervenção humana, ao contrário do ciclo técnico, em que os produtos e os materiais são mantidos em circulação através da reutilização, reparação, remanufactura e reciclagem (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

No entanto, para que a economia regenerativa aconteça, é essencial que as necessidades da tecnoesfera sejam supridas por materiais *bio-based*, ou seja, provenientes da biosfera (Ilustração 17), até à obtenção de produtos sucessivamente mais distintos, destinados a aplicações concretas e de alto desempenho técnico e ambiental (Geldermans, 2016, p. 303).

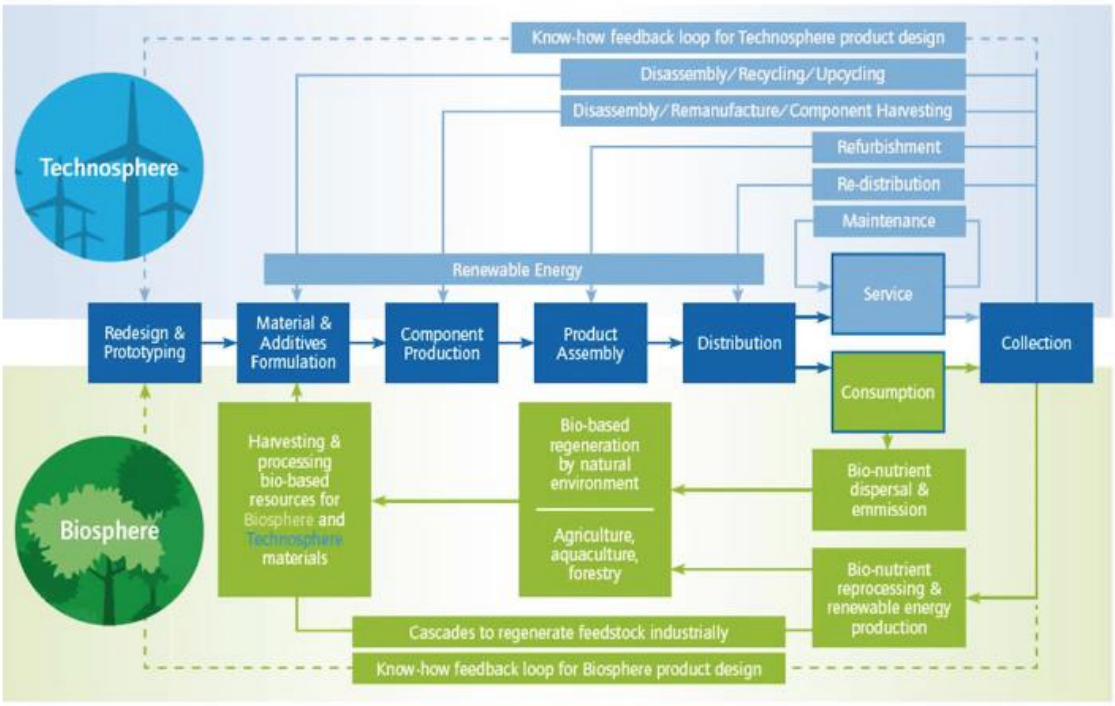


Ilustração 17 – Fluxo de materiais numa economia circular: a biosfera como fornecedora da tecnoesfera. (Geldermans, 2016, p. 302)

No caso da construção, várias abordagens regenerativas foram sendo recentemente desenvolvidas, com implicações relevantes nas cadeias de valor e de fornecimento dos edifícios, nomeadamente a abordagem C2C que iremos descrever adiante, e que está intimamente associada ao conceito de economia circular.

Segundo a EMF apenas materiais renováveis (*bio-based*) deveriam ser utilizados e os produtos perigosos evitados. Se um material não for renovável, então, o período de vida útil do produto deverá ser estendido ao limite e o índice de reciclabilidade maximizado, com a finalidade de reduzir a procura de recursos naturais (Ilustração 18) (Anastasiades *et al.*, 2020, p. 2):

The general system represents the typical idea behind the circular economy. The initial phase is resource mining, which can be recycled material from the same or another process, or there may be a demand from nature which should always be minimised and ideally non-existent. Subsequently, there is a manufacturing and assembly phase, followed by the service life of the finished product. This product may be repaired and refurbished to prolong its usability and to keep it at its highest value as long as possible. Alternatively, it can be reused in a lower value application. Eventually, in the actual end-of-life phase, when the product cannot be reused anymore, it is disassembled and its base-components are recycled either in the same or in another process. This last step brings us right back to the initial phase, which closes the cycle. Important to note here is that major technological advances will be necessary in order to make this feasible. The cycle of bio-based products is similar, but there are some important differences, because the resources for bio-based products are renewable. The initial phase consists again of resource mining, either from recycled material from the same or another process, or from a natural, renewable resource. Subsequently, there is the manufacturing process which is followed by the service life of the product. If possible, the product should again be repaired and refurbished to extend its lifetime or recycled in a lower value application (cascade system). When it comes to the end-of-life treatment, there are different possibilities. Sometimes, the generated waste material can be recycled in the same or another process. Other materials allow for them to be composted and turned into e.g. fertiliser for agricultural use (Anastasiades *et al.*, 2020, p. 3,4).

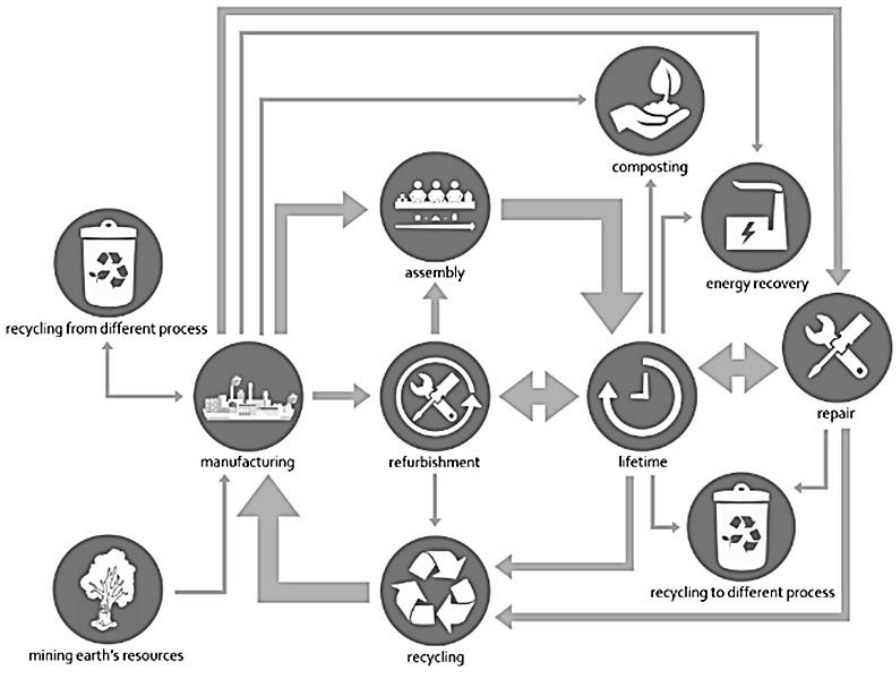


Ilustração 18 – Fluxo de materiais na economia circular *bio-based*. (Anastasiades *et al.*, 2020, p. 4)

Verificamos que as principais diferenças entre os dois paradigmas (economia linear *versus* economia circular *bio-based*) incidem tanto no início do ciclo de vida, (com a colheita de matérias-primas renováveis em substituição da extração de minerais), assim como na etapa final, com a possibilidade de recuperação de energia ou de compostagem, em lugar da deposição em aterro ou reciclagem.

Esta constatação é extremamente importante para a definição de políticas, metas e indicadores relacionados com a economia e a construção circulares, nomeadamente à escala micro (materiais e produtos) e meso (edifícios) (Anastasiades *et al.*, 2020, p. 5).

2.2.1.3. AS ENERGIAS RENOVÁVEIS

O Sol é a fonte, direta ou indireta, de todas as energias renováveis e não-renováveis à disposição da Humanidade (Ilustração 19) , estando atualmente em curso uma transição tecnológica e económica da energia solar antiga (combustíveis fósseis), não só tendo em vista o eficaz e integral aproveitamento da radiação solar, mas também de quase todas as outras restantes formas de energia primária renovável (p.e., hídrica, eólica e biomassa, etc.) (Behling e Behling, 2002, p. 18, 19).

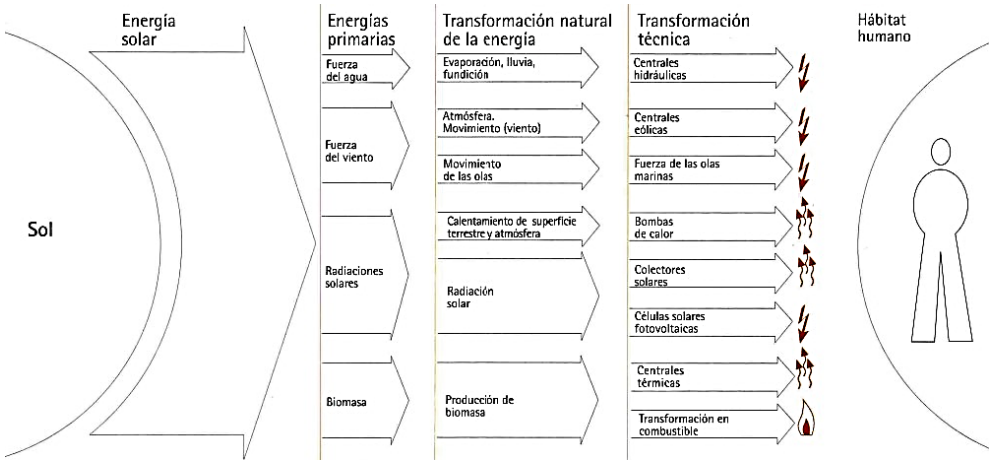


Ilustração 19 – O Sol como fonte das energias primárias renováveis. (Behling e Behling, 2002, p. 28)

Como já mencionado, as energias renováveis são parte integrante do conceito da economia circular e uma condição necessária à sua implementação (Ilustração 20). Para que uma economia seja circular, todos os diversos aspetos que a constituem o devem ser, e tal inclui a produção de energia renovável, ou seja, um tipo de energia que seja reposta no tempo médio de uma vida humana, ao contrário das não-renováveis ou lineares, com um ciclo de milhares de anos (Lanckriet, 2021).

Apesar de todos os incentivos e evidências, nomeadamente os compromissos do Acordo de Paris, as energias renováveis apenas representam um pouco mais de 10% da energia primária mundial, sensivelmente o dobro em relação aos anos 70 do século passado, o que é revelador da velocidade a que se desenrola a transição energética global (Robertson-Fall, 2020). Uma palavra sobre a controversa energia nuclear,

relativamente à qual, e devido à problemática dos resíduos, não a iremos considerar como renovável, para este efeito.



Ilustração 20 – O papel das energias renováveis no sistema da economia circular. (Palmitessa, 2019)

No entanto, e isso é relevante, o setor das energias renováveis é intensivo em termos de materiais, quer para o fabrico de equipamentos (aço, ferro, cobre, alumínio, etc.), quer em relação às respetivas infraestruturas (p.e. betão armado) arcando com os respetivos impactes associados. Várias projeções indicam que a procura poderá quadruplicar ou mesmo quintuplicar até 2050, podendo conduzir a constrangimentos na cadeia de abastecimento e volatilidade dos preços (Robertson-Fall, 2022).

Assim, para que as energias renováveis sejam parte do sistema da economia circular, terão que contribuir com energia limpa, do mesmo modo que os processos produtivos terão também de obedecer aos mesmos princípios, de modo a minimizar a mineração (tanto de minérios comuns como raros) e os impactes ambientais e sociais adversos daí decorrentes (Robertson-Fall, 2022; Tetra Tech ES e Circularity Edge, 2021, pp. 8, 9).

> Reshaping the RE industry into a more circular economy is a paradigm shift that has significant potential to reduce waste, carbon emissions, environmental degradation, and human rights abuses while strengthening the economy. Underpinned by the transition to RE sources, the circular economy decouples economic activity from the consumption of finite resources, reducing waste and pollution by keeping products and materials in use. This involves designing products that are “made to be made again.” Circular economy strategies that rely on repairing and refurbishing products minimize our use of resources and can cut global GHG emissions by 39 percent (equivalent to 22.8 billion tons) and reduce our long-term dependence on mining for critical metals used in RE technologies. Concurrently, work is being done on finding replacement elements, with the aim of designing out finite and toxic components altogether (Tetra Tech ES e Circularity Edge, 2021, p. 8).

Por isso mesmo, o desenvolvimento de materiais *bio-based* para aplicação ao setor das energias renováveis tem um enorme valor estratégico e económico. Tal é o caso das torres eólicas da Modvion AB, uma empresa sueca que utiliza madeira laminada do tipo Laminated Veneer Lumber (LVL) em substituição do aço, para torres até 150 m de altura (Ilustração 21).



Ilustração 21 – Torres eólicas fabricadas com madeira LVL. (Modvion, 2023)

Este projeto foi financiado pela União Europeia (Horizon 2020 Grant Agreement No. 959151), no valor de 6,5 milhões de euros, justificados do seguinte modo pelas palavras de Martin Bruncko, membro do EIC Fund Investment Committee:

> We are glad to announce the EIC Fund is contributing to Modvion's bringing to market the next generation of wind turbine towers. Replacing concrete and steel, from which traditional wind towers are built, with laminated wood dramatically reduces the carbon dioxide footprint of the wind energy industry (REM editorial team, 2022).

Comparativamente a uma torre eólica de aço, uma de madeira laminada (LVL) emite menos de 90% de emissões de CO_2, é mais leve e mais resistente, com consequências no dimensionamento das fundações, além de que a sua conceção modular não exige medidas adicionais de transporte especial e permite a eventual desmontagem no final da fase operacional, além de outras vantagens (Tabela 5) (REM editorial team, 2022; Modvion, 2023).

Nesse mesmo sentido, começam a ser desenvolvidos protótipos de painéis solares fotovoltaicos de alto desempenho, obtidos a partir de materiais renováveis e totalmente recicláveis, tendo como principal objetivo a implementação da economia circular, de modo a reduzir a pegada de carbono e a eliminação, ou redução significativa, dos

resíduos industriais provenientes dos equipamentos (CEA, 2021; Il Bioeconomista, 2021).

Tabela 5 – Principais vantagens das torres eólicas de LVL.



Fonte: Modvion (2023)

Ao mesmo tempo, e cientes do desafio que os resíduos do *hardware* das energias renováveis representam, alguns autores e empresas começam a investigar forma de os utilizar para outras aplicações, numa abordagem circular. Tal é o caso do aproveitamento, no fim do seu ciclo de vida, de partes de painéis de fotovoltaicos na composição de pavimentos rodoviários flexíveis (asfalto) ou rígidos (betão armado), nomeadamente vidro, alumínio (Al), silício (Si) e polímeros (Sandanayake *et al.*, 2022, pp. 1–19).

As energias renováveis estão na base de uma nova economia global, uma economia que reconhece o valor do capital natural, ou seja, que contabiliza o valor dos serviços prestados pela natureza, bem como os custos associados à sua destruição (Girardet, 2023, p. 9). Contudo, tal só será efetivo se a circularidade do processo produtivo e do consumo estiver implementada, de modo que não existam resíduos, mas […] "only resources we are not yet smart enough to use." (Leggett, 2017), associando as energias renováveis à utilização de materiais renováveis.

A questão das energias renováveis nas cidades é de extrema importância, não só porque são constituídas por intensas e extensas aglomerações de edifícios e

infraestruturas, mas também pelo impacte do seu metabolismo, que poderá ser classificado como linear (degenerativo) ou circular (regenerativo). Neste contexto, a arquitetura é um fator determinante, num ou noutro sentido.

Para entender o metabolismo de uma cidade regenerativa é fundamental compreender as diferenças e a relação entre os ciclos técnico e biológico dos sistemas urbanos. Sabendo que a biosfera funciona sem resíduos, num sistema perfeitamente circular, onde todos os *outputs* são absorvidos e regeneradores, a questão que se coloca é saber se as cidades, pertencentes à tecnoesfera, poderão funcionar do mesmo modo?

Tal é a visão da Ecopolis (Ilustração 22), cidade alimentada exclusivamente de energia renovável, almejando uma relação regenerativa entre a cidade e os ecossistemas (Girardet, 2023, pp. 6, 9)

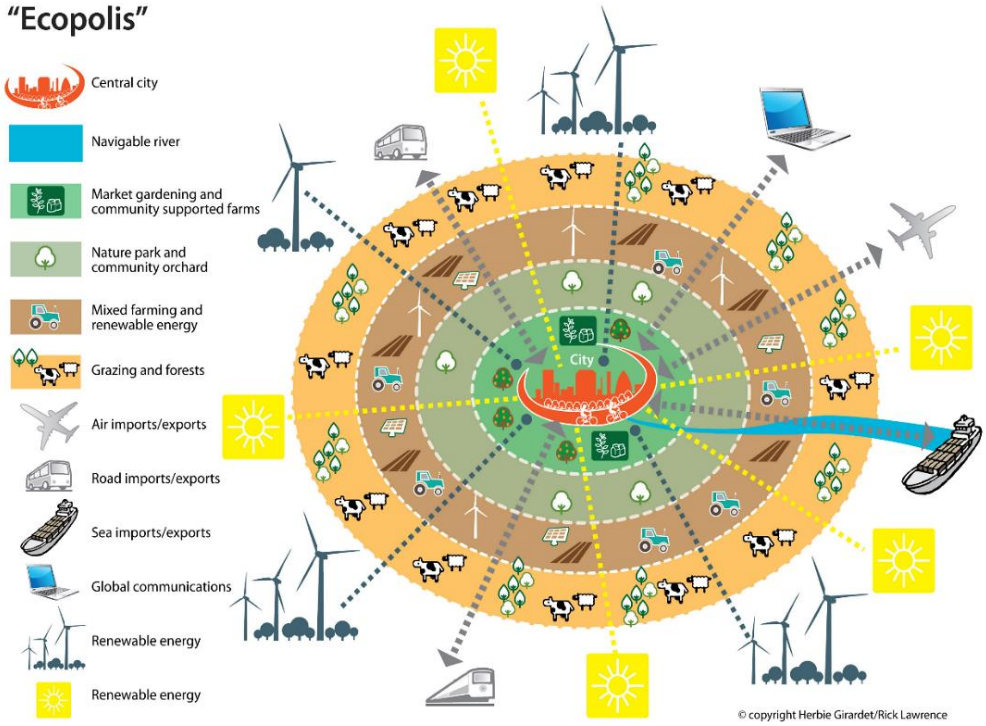


Ilustração 22 – Ecopolis: o papel das energias renováveis numa cidade regenerativa. (Girardet, 2023, p. 7)

2.2.2. CONCEITOS ESTRUTURANTES E TECNOLOGIAS CAPACITANTES

Podemos considerar a biomimética como um principais conceitos estruturantes da economia circular (realçando a importância do mundo natural e da biosfera) e a ecoeficiência (focada na tecnoesfera). Neste contexto, têm assumido destaque a

bioeconomia e o conceito Indústria 4.0 (i4.0), como algumas das formas de implementação dos seus princípios.

2.2.2.1. BIOMIMÉTICA E BIOECONOMIA

A ideia de que os sistemas produtivos da economia devem imitar a natureza, com a finalidade de os compatibilizar com a biosfera, é a base em que assenta a conceito de biomimética desenvolvido por Janine Benyus, em 1997.

A evidência de que os sistemas naturais desenvolveram, ao longo de 3,8 mil milhões de anos, processos ecoeficientes a partir da energia solar, sem resíduos nem poluição, adaptados e diversificados, são um exemplo de como deveremos aprender e proceder, no sentido de compatibilizar a tecnoesfera e a biosfera no contexto da economia (Augusto, 2011, p. 54; Nunes, 2009, p. 46).

Inovação Inspirada na natureza é o mote da biomimética (funcionar como a natureza) que sob o termo geral *bioinspired design* engloba, além desta, outras abordagens, como o biomorfismo (assemelhar-se à natureza) ou a bioutilização (utilização da natureza), tendo em comum a biologia, como forma de resolver problemas de *design* e de engenharia (Ilustração 25) (The Biomimicry Institute, 2023).

Contudo, o fator distintivo da biomimética reside no enfoque na aprendizagem e na emulação das soluções que a natureza oferece para a resolução de problemas, tal como realçado por Nunes (2009): "A biomimética propõe novos desenvolvimentos no processo de design, numa solução interativa que envolve, num *mix* inovador, o design e a biologia." (Nunes, 2009, p. 49).

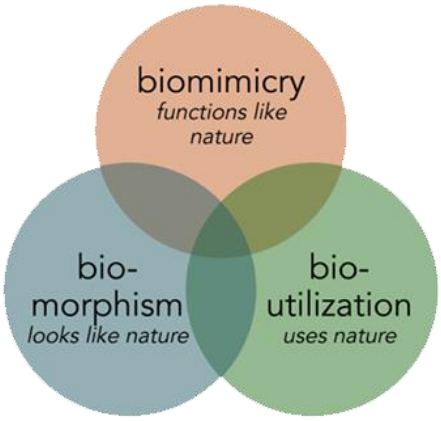


Ilustração 23 – Biomimética, biomorfismo e bioutilização como variantes do *bioinspired design*. (The Biomimicry Institute, 2023)

A biomimética integra-se na arquitetura em três níveis (organismo, comportamento e ecossistema) contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis em vários domínios do *design*, da arquitetura e da engenharia através da "[…] compreensão dos princípios que regem a forma, mais do que pela mera replicação da própria forma." (Biju, 2022; Jamei e Vrcelj, 2021, p. 2).

De facto, esta é uma ferramenta com imenso potencial para o projeto de edifícios e estruturas sustentáveis, através da inovação em novos materiais, produtos e tecnologias inspirada nas lições da natureza (Jamei e Vrcelj, 2021, p. 16):

> In some architecture and design concepts, most projects are inspired by the form and behavior of certain animals (animals in the ocean or on the earth) that have adaptive approaches towards the outside world (e.g., sun and wind). In other architectural projects, the source of inspiration is plants that react differently towards extreme climatic conditions (drought, heat, and light) (Jamei e Vrcelj, 2021, p. 3).

Como exemplo do acima citado, temos o caso da Torre Eiffel (Ilustração 24) em que a forma e a estrutura do fémur humano foram a inspiração para a conceção do sistema estrutural dos pilares principais: altamente eficiente em termos materiais e estruturais, com resistência acrescida à flexão e ao corte comparativamente a uma estrutura convencional (Learn Biomimicry, 2023; Jamei e Vrcelj, 2021, p. 14; Biju, 2022).

Outro caso com muita notoriedade é o icónico edifício londrino The Gherkin, da autoria de Norman Foster, e que mimetiza a forma e a estrutura reticulada da esponja marinha *Euplectella aspergillum* (Ilustração 25).

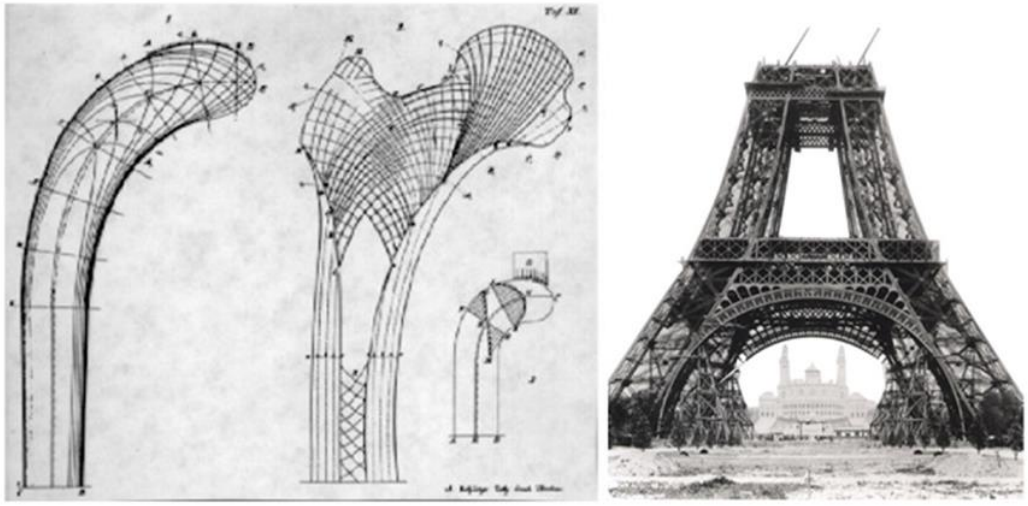


Ilustração 24 – O fémur humano foi a inspiração para a estrutura dos pilares principais da Torre Eiffel. (Jamei e Vrcelj, 2021, p. 14).

Este exosqueleto e a forma do edifício possibilitam que as lajes sejam apoiadas perifericamente, sem pilares interiores, garantindo ao mesmo tempo resistência e estabilidade estrutural e liberdade arquitetónica. A estrutura exterior facilita a existência de um sistema de ventilação natural em todos os pisos, bem como de recolha de águas pluviais (Biju, 2022).

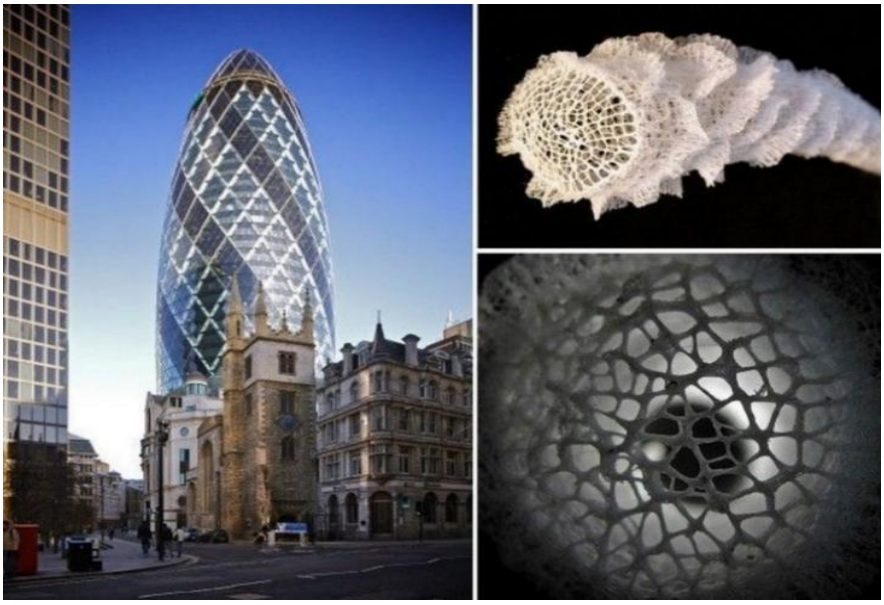


Ilustração 25 – Uma esponja marinha como inspiração para The Gherkin. ([Adaptado a partir de:] Biju, 2022)

Ainda um outro caso de referência é o do edifício de escritórios e centro comercial Eastgate Centre, em Harare, Zimbabwe, que foi concebido de modo a implementar uma estratégia passiva de arrefecimento e ventilação natural mimetizando o sistema natural das térmitas (Ilustração 26).

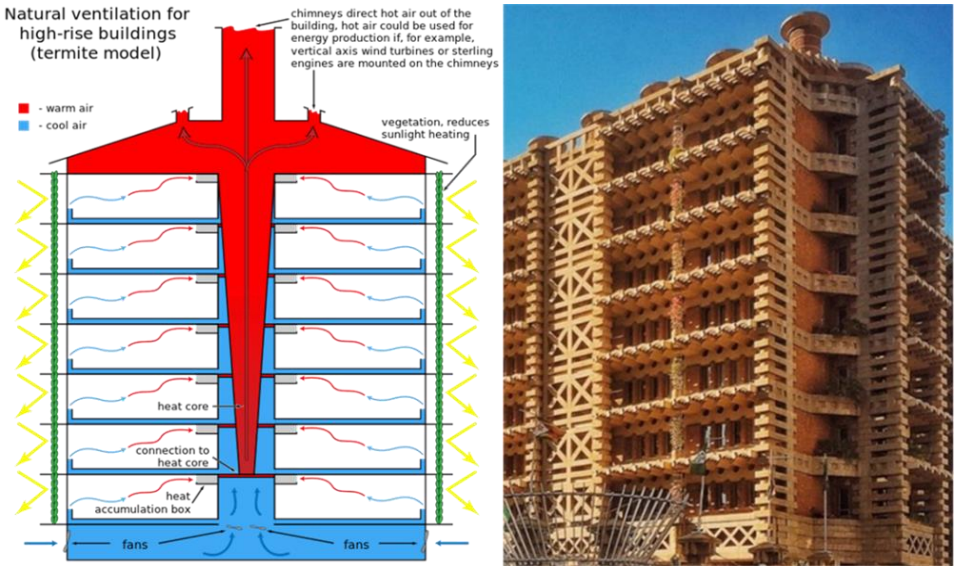


Ilustração 26 – Modelo de arrefecimento e ventilação natural no Eastgate Centre. ([Adaptado a partir de:] Biju, 2022; Pearce, 2021)

Neste sistema, o ar frio entra pelos pisos inferiores e ascende pelas chaminés, mantendo no edifício uma temperatura constante entre os 21º e os 25ºC, ao longo de todo o ano, em contraponto com a temperatura exterior que assume variações entre os 5º e os 33ºC.

Este desempenho, é alcançado sem recurso a qualquer tipo de equipamento Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), sendo que o complexo consume apenas 10% da energia operacional, em comparação com outros edifícios equivalentes (Ilustração 29) (Jamei e Vrcelj, 2021, p. 7; Pearce, 2021; Learn Biomimicry, 2023; Biju, 2022; Nunes, 2009, p. 48).

Diretamente relacionada com a implementação da economia circular, surge o conceito de bioeconomia, o qual, em termos genéricos, se refere ao conjunto de atividades económicas desenvolvidas a partir da biotecnologia, utilizando recursos derivados da agricultura, silvicultura ou algacultura (biomassa), com vista à sua transformação para obtenção de novos materiais, produtos ou serviços, em vários setores, entre os quais a energia e a construção (Lewandowski *et al.*, 2018, p. 2; Birner, 2018, p. 19; Maximo *et al.*, 2022, p. 1).

A bioeconomia, ao criar produtos e componentes de alto valor a partir de matérias-primas biológicas renováveis e de origem sustentável, a par do foco nas energias renováveis e na inovação, torna-se um instrumento relevante na implementação dos princípios da economia circular, nomeadamente ao manter recursos naturais e materiais no seu máximo valor e utilização, dentro do limites dos ecossistemas em que opera (Birner, 2018, p. 27; Maximo *et al.*, 2022, p. 1; Palahí *et al.*, 2020, p. 15).

Em 2007, no decurso da presidência alemã da União Europeia (UE), foi apresentado o documento **Cologne Paper**, que marca o inicio oficial da agenda da bioeconomia na Europa ou Knowledge-Based Bio-Eeconomy (KBBE), documento de referência que traçou metas e permitiu o avanço deste sistema no espaço da EU27 (Lang, 2022, p. 1; Birner, 2018, p. 20).

A Ilustração 27 representa graficamente (quanto mais verde, melhor) o estado de desenvolvimento das políticas e estratégias da KBBE na Europa Ocidental, em 2017, segundo o Conselho Alemão de Bioeconomia.



Ilustração 27 – Estado das políticas e estratégias de desenvolvimento da bioeconomia na Europa Ocidental em 2017. ([Adaptado a partir de:] Birner, 2018, p. 21)

Contudo, apesar de alguns setores industriais, como a química ou o têxtil, serem mais recetivos e inovadores, outros, como a construção, e tendo em conta as suas particularidades, necessitam de mais tempo e esforço para incorporarem os princípios da bioeconomia e de circularidade nos processos produtivos (Lang, 2022, p. 3). .

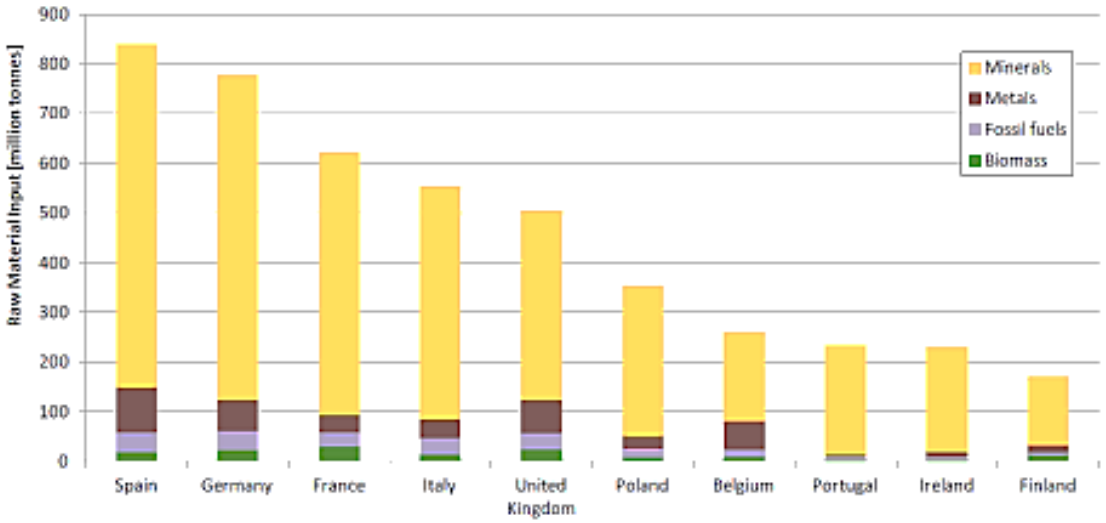


Ilustração 28 – Principais tipos de matérias-primas utilizadas pelo setor da construção em alguns países da UE e UK, incluindo Portugal (Herczeg *et al.*, 2014, p. 22)

Tal é patente na Ilustração 28, onde é explicitamente representada a utilização massiva de minerais na indústria da construção, seguida dos metais. A biomassa ocupa ainda uma posição emergente (p.e., Espanha, Alemanha, França, Itália, Reino Unido) ,

embora no caso português e à data (2014), tal ainda não pudesse ser considerado uma alternativa.

A mudança de um paradigma alicerçado em materiais minerais (p.e., cimento, aço, betão armado) para um outro à base de biomateriais (p.e., madeira, cortiça, cânhamo, bambu), não só tem um grande potencial de redução da intensidade do fluxo de materiais não-renováveis, como também possibilita a sequestração de carbono nos elementos construtivos dos edifícios, o que se reveste de fundamental importância (Brannen, 2024, p. 203).

De facto, se todo o parque imobiliário associado à satisfação das necessidades atuais de habitação a nível global, avaliado em cerca de 2,5 mil milhões de fogos, fosse construído à luz do paradigma atual, tal seria responsável por 20% da quota de carbono remanescente no período 2020-2050, relativamente ao Acordo de Paris.

Pelo contrário, a utilização de biomassa (Ilustração 29) para efeitos estruturais e construtivos (p.e., madeira), poderá reduzir até metade a necessidade da quantidade total de materiais convencionais, ao mesmo tempo que capta e armazena carbono e, desse modo, contribui para um efeito de mitigação climática"[5] entre 2,4 e 2,9 kg CO_2 / kg, em relação ao betão armado (Palahí *et al.*, 2020, p. 39).

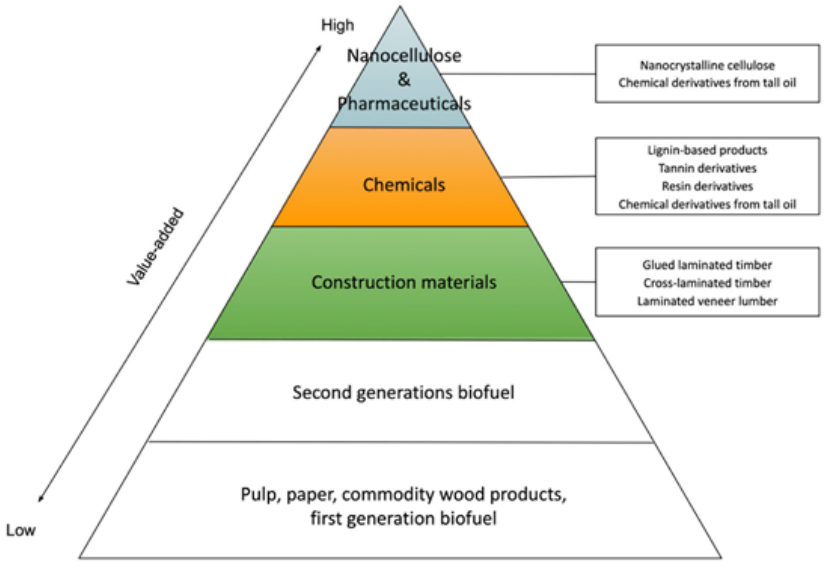


Ilustração 29 – Materiais de construção provenientes da biomassa como produtos inovadores e de valor acrescentado.(Maximo *et al.*, 2022, p. 5)

[5] O efeito de redução do fluxo de Gases com Efeito de Estufa (GEE), por via da redução das emissões na atmosfera ou por meio da captação e armazenamento desses gases nos oceanos, florestas ou solo (Shaftel, 2023).

Nos últimos anos tem ganhado destaque a utilização de produtos de madeira engenheirada (Ilustração 30), consistindo no aproveitamento de partículas ou diferentes partes provenientes da madeira, ligadas entre si química ou mecanicamente, permitindo obter elementos estruturais (pilares, vigas, paredes e lajes) ou de revestimento (painéis) para edifícios (Ghisleni, 2023; Verkerk *et al.*, 2021, p. 9; Maximo *et al.*, 2022, p. 9):

> Recently, most attention has focused on the uptake of CLT and glulam in building construction, a trend that started in Europe under the impetus of high-rise construction and the increasing uptake in prefabricated (residential and non-residential) construction. The high degree of customization and application of wood for nearly any building part, including load-bearing structures, is revolutionizing the wood construction sector. Together with the construction sector's adoption of engineered wood, there is a lot of attention on waste reduction in the construction process, the development of modular prefabricated construction techniques, and ease of disassembly in the end-of-life stage (Verkerk *et al.*, 2021, p. 18).



Ilustração 30 – Vários tipos de madeira engenheirada ou *engineered wood*. ([Adaptado a partir de:] Verkerk *et al.*, 2021, p. 19)

Para além do já indicado anteriormente, a utilização de madeira e seus derivados no setor da construção, constitui um importante fator de valorização da floresta (Brannen, 2024, pp. 89, 101), a qual, juntamente com a agricultura, são pilares da bioeconomia e da economia circular.

Não só porque ambas fornecem matéria-prima renovável, mas porque também providenciam um conjunto de benefícios relacionados com o capital natural (alimentos, água, solo, fotossíntese, bem-estar, etc.) que deve ser devidamente valorizado e enquadrado no âmbito do desenvolvimento sustentável e da sustentabilidade (Cechin e Veiga, 2010, p. 448).

Em Portugal, e apesar de avanços consideráveis nos últimos anos, por diversas razões, a utilização de biomateriais – renováveis, sustentáveis e de baixo carbono – para efeitos estruturais, de revestimento ou isolamento é francamente diminuta, nos projetos de edifícios de qualquer tipologia, ao contrário da emergente tendência europeia e mundial (Jorge, 2013, p. 50), situação que se espera poder vir a alterar (Ilustração 31).



Ilustração 31 – Construção em CLT do edifício principal da Redbridge School, em Lisboa. (Ilustração nossa, 2018)

2.2.2.2. ECOEFICIÊNCIA, ECOLOGIA INDUSTRIAL E INDÚSTRIA 5.0

A ecoeficiência é um conceito que foi pela primeira vez enunciado por Schaltegger e Sturm (1989) e posteriormente divulgado por Sthephan Schmidheiny (1992), na publicação **Changing Course** do World Business Council on Sustainable Development (WBCSD) (Ehrenfeld, 2008, p. 6; Lehni, 2001, p. 9).

A ecoeficiência, que exprime uma correlação negativa entre o crescimento económico e o impacte ambiental, é uma evidência já identificada desde os anos 70 do século XX e que aponta no sentido da desmaterialização da economia (Ilustração 32). Tal objetivo é alcançado por via da eficiência na utilização da energia, dos recursos naturais e dos processos produtivos no geral (Augusto, 2011, p. 48, 49; Ehrenfeld, 2005, p. 6; Lehni, 2001, p. 23).

O conceito pode ser entendido num duplo sentido: eficiência económica e eficiência ecológica, à escala micro (empresarial) ou macro (país ou região). Tal é conseguido mediante a implementação de práticas e processos que conduzem à redução dos impactes ambientais em todo o ciclo de vida dos produtos ou serviços, contribuindo para

a prosperidade e o bem-estar social, em linha com o desenvolvimento sustentável (Peneda, 2008, p. 155).

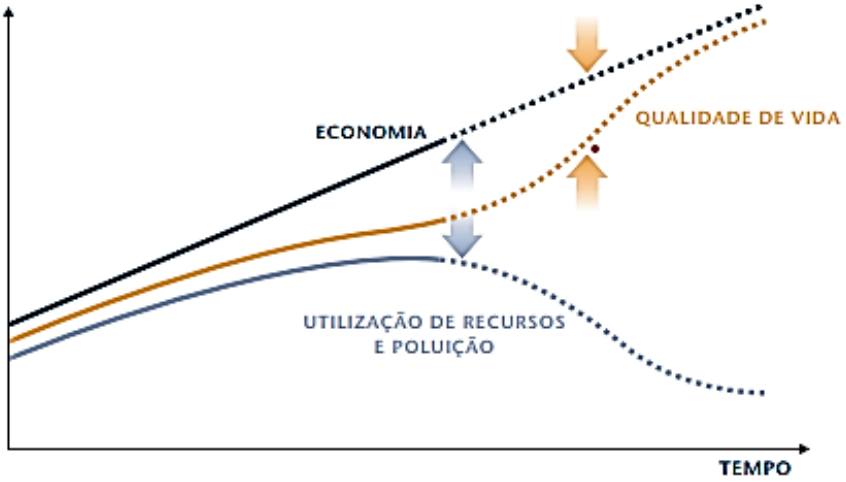


Ilustração 32 – Ecoeficiência: correlação negativa entre recursos naturais e qualidade de vida. (Lehni, 2001, p. 23)

> But eco-efficiency is not achieved by technological change alone. It is achieved only by profound changes in the goals and assumptions that drive corporate activities and change in the daily practises and tools used to reach them. This means a break with business-as-usual mentalities and conventional wisdom that sidelines environmental and human concerns (Schmidheiny e Business Council for Sustainable Development, 1992, p. 10).

Neste sentido, e tendo em linha de conta a importância que o setor AEC tem na economia nacional e global, é crucial uma alteração do modo como o edificado é projetado e construído de forma a evoluir no sentido da ecoeficiência, sendo em última análise um fator de mitigação e combate às alterações climáticas antropogénicas (Augusto, 2018, p. 22).

Como precursora e fundamento da economia circular, a Ecologia Industrial (EI) é um conceito que deriva da constatação da existência de uma relação próxima e crítica entre o mundo industrial e o mundo natural, que opera em ciclos fechados, visando reduzir significativamente os respetivos fluxos de materiais e de energia (Ehrenfeld e Gertler, 1997, p. 68; Hond, 2000, p. 61; Zargar *et al.*, 2022, p. 347). Em 1994, Robert White definiu ecologia industrial do seguinte modo:

> […] the study of the flows of materials and energy in industrial and consumer activities, of the effects of these flows on the environment, and of the influences of economic, political, regulatory, and social factors on the flow, use, and transformation of resources (Lifset e Graedel, 2002, p. 4).

A EI apresenta duas vertentes: a industrial e a ecológica. A primeira foca-se na otimização do *design* de produtos (*ecodesign*) e de processos, no pressuposto que as empresas, como produtoras de bens e serviços, são um fator crítico e ambientalmente impactante.

A segunda, porque se inspira nos ecossistemas naturais como modelo para a atividade industrial e encara, de forma macro, o sistema produtivo e económico em concertação com os ecossistemas, dos quais depende, e não de maneira isolada (Lifset e Graedel, 2002, p. 3).

Deste modo, são analisados o efeito das atividades humanas e dos respetivos fluxos, ao nível macro (regional, nacional e global), meso (interempresarial) e micro (empresarial), através das seguintes ferramentas e iniciativas (Ilustração 33):

a) MFA - Análise de Fluxos de Materiais (macro);

b) Processos conducentes à desmaterialização e descarbonização (macro);

c) Eco-industrial Parks / Simbiose Industrial (meso);

d) ACV - Avaliação do Ciclo de Vida (micro);

e) DfE - Design for Environment (micro) (Lifset e Graedel, 2002, p. 9,10; Hond, 2000, pp. 63, 64).

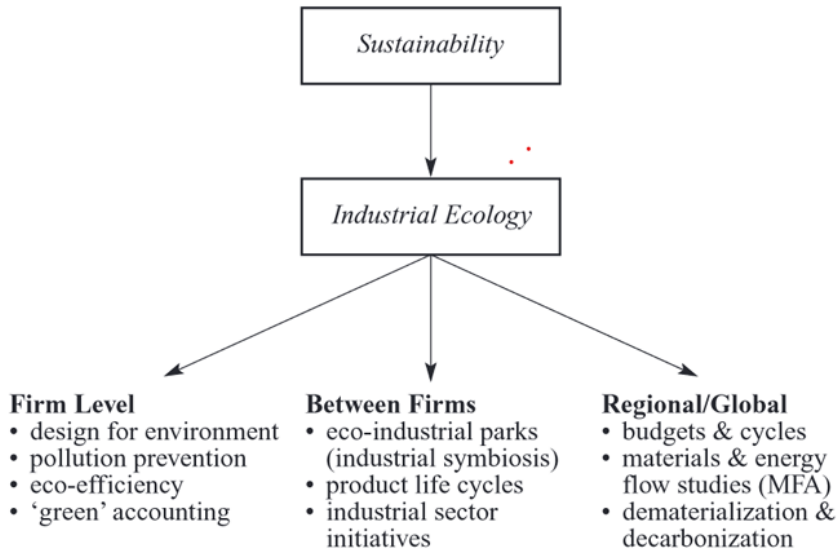


Ilustração 33 – Os três níveis da EI e respetivas ferramentas e iniciativas. (Lifset e Graedel, 2002, p. 10)

Apesar de o conceito de construção sustentável – a criação e manutenção de um ambiente construído saudável aplicando princípios ecológicos – preconizar uma abordagem de ciclo de vida com a finalidade de otimizar a ecoeficiência, nem sempre esta relação tem sido evidenciada.

De facto, três características gerais dominantes na construção de edifícios evidenciam essa dificuldade: 1. Os edifícios não são projetados nem construídos de modo a serem eventualmente desconstruídos; 2. Os produtos e componentes dos edifícios não são concebidos para a desconstrução; 3. Os materiais utilizados nos produtos de construção são, frequentemente, compósitos que dificultam ou inviabilizam a reciclagem (Kibert, Sendzimir e Guy, 2010, p. 913).

À semelhança do conceito de ecologia industrial, Kibert *et al.* (2000) propõem uma *ecologia da construção*, aplicável ao edificado:

> It is proposed that a 'construction ecology' be considered as the development and maintenance of a built environment (1) with a materials system that functions in a closed loop and is integrated with eco-industrial and natural systems, (2) that depends solely on renewable energy sources and (3) that fosters preservation of natural system functions. Construction metabolism is resource utilization in the built environment that mimics natural system metabolism by recycling materials resources and by employing renewable energy systems. It would be a result of applying the general principles of industrial ecology and the derivative principles of construction ecology (Kibert, Sendzimir e Guy, 2010, pp. 913, 914).

Em consequência da aplicação dos princípios da ecologia da construção, derivados diretamente da ecologia industrial, teremos edifícios e construções caracterizados por:

1. Fácil e rápida desconstrução no fim da sua vida útil;
2. Componentes que facilmente são retirados e substituídos;
3. Produtos concebidos para serem reciclados;
4. Materiais estruturais recicláveis;
5. Metabolismo lento devido à sua durabilidade e adaptabilidade
6. Saudável para os seus ocupantes (Kibert, Sendzimir e Guy, 2010, p. 914).

Em todo o caso, a arquitetura contemporânea tem feito esforços relevantes nesse sentido, elaborando princípios de sustentabilidade baseados em boas práticas, como é

o caso dos **Princípios de Hannover** (1992), um guia orientador para os arquitetos e demais agentes envolvidos no ambiente construído da Expo 2000 (Tabela 6) (McDonough e Braungart, 1992, p. 5).

Tabela 6 – Os Princípios de Hannover.

1. **Insist on rights of humanity and nature to co-exist** in a healthy, supportive, diverse and sustainable condition.

2. **Recognize interdependence.** The elements of human design interact with and depend upon the natural world, with broad and diverse implications at every scale. Expand design considerations to recognizing even distant effects.

3. **Respect relationships between spirit and matter.** Consider all aspects of human settlement including community, dwelling, industry and trade in terms of existing and evolving connections between spiritual and material consciousness.

4. **Accept responsibility for the consequences of design** decisions upon human well-being, the viability of natural systems and their right to co-exist.

5. **Create safe objects of long-term value**. Do not burden future generations with requirements for maintenance or vigilant administration of potential danger due to the careless creation of products, processes or standards.

6. **Eliminate the concept of waste.** Evaluate and optimize the full life-cycle of products and processes, to approach the state of natural systems, in which there is no waste.

7. **Rely on natural energy flows.** Human designs should, like the living world, derive their creative forces from perpetual solar income. Incorporate this energy efficiently and safely for responsible use.

8. **Understand the limitations of design**. No human creation lasts forever and design does not solve all problems. Those who create and plan should practice humility in the face of nature. Treat nature as a model and mentor, not as an inconvenience to be evaded or controlled.

9. **Seek constant improvement by the sharing of knowledge.** Encourage direct and open communication between colleagues, patrons, manufacturers and users to link long term sustainable considerations with ethical responsibility, and re-establish the integral relationship between natural processes and human activity.

Fonte: [Adaptado a partir de:] McDonough e Braungart (1992, p. 5)

Sob o tema *Humanidade, natureza e tecnologia*, a exposição tinha como objetivo a promoção da conceção ambientalmente orientada (*sustainable design*), definida do seguinte modo: "[…] Sustainable design is the conception and realization of environmentally sensitive and responsible expression as a part of the evolving matrix of nature." (McDonough e Braungart, 1992, p. 3).

No mesmo local e quase duas décadas mais tarde, em 2011, o termo Indústria 4.0 (i4.0) foi pela primeira vez referido na feira de Hannover, refletindo a transformação digital dos processos industriais, liderada pela indústria alemã, permitindo "[…] uma produção

inteligente, eficiente, efetiva, individualizada e customizada, a um custo razoável." (Vaidya, Ambad e Bhosle, 2018, pp. 237).

Designada de *quarta revolução industrial*, compreende um nível de organização e de controlo sobre toda a cadeia de valor do ciclo de vida dos produtos, através da conexão dos diversos sensores, aparelhos e computadores entre si mesmos e com a internet, orientada para a customização (Vaidya, Ambad e Bhosle, 2018, pp. 233; Xun Xu *et al.*, 2021; p. 530 Golovianko *et al.*, 2023, p. 104; Branco-Teixeira (Coord.) *et al.*, 2023, p. 31).

A i4.0 vai ao encontro da sustentabilidade, ao promover a eficiência energética e a utilização eficiente dos recursos naturais, através da nova geração de fábricas inteligentes utilizando novas tecnologias digitais, novos materiais e novos processos, tornando possível a desmaterialização, a descarbonização e a redução massiva de resíduos industriais, nomeadamente através de tecnologias como a Impressão 3D e do BIM, com especial interesse para o setor da construção e, em particular, para a arquitetura (Xun Xu *et al.*, 2021, p. 532):

> The German Federal Government presents Industry 4.0 as an emerging structure in which manufacturing and logistics systems in the form of Cyber Physical Production System (CPPS) intensively use the globally available information and communications network for an extensively automated exchange of information and in which production and business processes are matched. The four main drivers of Industry 4.0 are Internet of Things (IoT), Industrial Internet of Things (IIoT), Cloud based manufacturing and smart manufacturing which helps in transforming the manufacturing process into fully digitized and intelligent one. The nine pillars of Industry 4.0 will transform isolated and optimized cells production into a fully integrated, automated, and optimized production flow. This leads to greater efficiency and change in traditional production relationships among suppliers, producers, and customers as well as between human and machine (Vaidya, Ambad e Bhosle, 2018, p. 234).

No caso específico do setor da construção, e concretamente em Portugal, o potencial da i4.0 está longe de ser plenamente aproveitado, tanto em termos de investimento, como de implementação, com as devidas consequências em termos da execução de projetos de média e grande complexidade, que por sua têm múltiplas variáveis e altos níveis de customização e de incerteza (Perrier *et al.*, 2020, p. 417; Branco-Teixeira (Coord.) *et al.*, 2023, p. 36).

No sentido da otimização da gestão das operações, nomeadamente em tempo e custos, tem sido implementada a digitalização de toda a cadeia de valor, desde a fase de projeto até às operações e manutenção, o que levou à classificação das tecnologias i4.0

aplicadas ao setor em três grandes grupos ou *clusters:* C1. Fabricação inteligente (*Smart Factory*), C2. Simulação e modelação (*Simulation and modelling*) e C3. Digitalização e virtualização (*Digitalization and virtualisation*) (Perrier *et al.*, 2020, p. 418; Oesterreich e Teuteberg, 2016, pp. 127, 128;Branco-Teixeira (Coord.) *et al.*, 2023, p. 31).

Tabela 7 – Classificação e integração em clusters das tecnologias da i4.0.

Cluster	Key technologies and concepts in the context of Industry 4.0
Smart Factory (C1)	Cyber-Physical systems (CPS)/ Embedded systems
	Radio-Frequency Identification (RFID)
	Internet of Things (IoT)/ Internet of Services (IoS)
	Automation
	Modularisation/ Prefabrication
	Additive Manufacturing
	Product-Lifecycle-Management (PLM)
	Robotics
	Human-Computer Interaction (HCI)
Simulation and modelling (C2)	Simulation tools/ Simulation models
	Building Information Modelling (BIM)
	Augmented/Virtual/Mixed Reality (AR/VR/MR)
Digitisation and virtualisation (C3)	Cloud Computing
	Big Data
	Mobile Computing
	Social Media
	Digitisation

Fonte: [Adaptado a partir de:] Oesterreich e Teuteberg (2016, p. 128)

Em 2021, a Comissão Europeia anunciou formalmente a *quinta revolução industrial*, sob a designação Indústria 5.0 (i5.0), como resposta às questões sociais emergentes, indo além da eficiência e da produtividade (Xun Xu *et al.*, 2021, pp. 532, 533; Golovianko *et al.*, 2023, p. 104; Vaidya, Ambad e Bhosle, 2018, p. 238).

Tendo como base o documento **Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-centric, and Resilient European Industry**, a i5.0 assume um triplo aspeto: sustentável, centrada no ser humano e resiliente; ou seja, para além de respeitar os limites do planeta ao implementar a economia circular, atende às necessidades sociais e humanas do ambiente onde se insere, sendo resistente a disrupções em tempos de crise (Ilustração 34) (Breque, De Nul e Petridis, 2021, p. 14).



Ilustração 34 – As características da i5.0. (Breque, De Nul e Petridis, 2021, p. 13)

Neste contexto, e no documento acima citado, pode ler-se acerca da forma como a i5.0 aborda a questão da circularidade de processos, de extrema importância para este trabalho:

> For industry to respect planetary boundaries, it needs to be sustainable. It needs to develop circular processes that re-use, re-purpose and recycle natural resources, reduce waste and environmental impact. Sustainability means reducing energy consumption and greenhouse emissions, to avoid depletion and degradation of natural resources, to ensure the needs of today's generations without jeopardising the needs of future generations. Technologies like AI and additive manufacturing can play a large role here, by optimising resource-efficiency and minimising waste (Breque, De Nul e Petridis, 2021, p. 14).

2.2.2.3. AS TECNOLOGIAS DE LARGO ESPECTRO

Baseadas na Indústria 4.0, as Tecnologias de Largo Espectro ou Key-Enabling Technologies (KETs), possibilitam a inovação de processos, produtos e serviços em toda a economia, na qual o setor da construção tem um lugar de destaque (Laibach, Börner e Bröring, 2019, p. 2; Craveiro *et al.*, 2019, p. 251).

Através da implementação das KETs, também o setor ACE estará mais capacitado para responder aos desafios ambientais e sociais emergentes (emprego, crescimento económico, alterações climáticas antropogénicas, etc.) de forma competitiva e sustentável, contribuindo em simultâneo para a modernização da base produtiva e re-industrialização da Europa (bKET - Boosting Key Enabling Technologies, 2024, pp. 4, 14).

Nesse sentido, a Comissão Europeia (COM) definiu e promove estrategicamente seis categorias de tecnologias de largo espectro – sistémicas, multidisciplinares e transetoriais – orientadas para a competitividade e a soberania tecnológica da Europa, nomeadamente:

1. Manufatura avançada;
2. Materiais avançados e nanomateriais;
3. Tecnologias de ciências da vida;
4. Micro-nano eletrónica e fotónica;
5. Inteligência artificial;

6. Tecnologias de segurança e conectividade (Ramahandry *et al.*, 2021, p. 5; Lourenço *et al.*, 2021, p. 2).

Sendo a base da inovação tecnológica na Europa, as KETs estão diretamente relacionadas com a implementação da bioeconomia e do desenvolvimento sustentável (Laibach, Börner e Bröring, 2019, p. 1, 2), particularmente com a economia circular através da biomimética, como inspiração para o *ecodesign* (bKET - Boosting Key Enabling Technologies, 2024, p. 21).

Nas soluções tecnológicas atuais mais avançadas (tecnoesfera), existem, em média, apenas 12% de similaridades com a biomimética (biosfera), baseadas num paradigma de incorporação de matéria e energia para resolver um determinado problema, em lugar de informação e estrutura no espaço (bKET - Boosting Key Enabling Technologies, 2024, p. 21):

> Destes 12% de semelhanças na forma como o engenho humano e a biologia resolve problemas, 73% são os princípios relativos à composição espacial. A diferença na forma como o engenho humano e a natureza organizam a hierarquia é fundamental, sendo que no engenho humano, esta se verifica através de hierarquia piramidal de controlo, e em contraponto a biologia se organiza através de uma hierarquia holográfica, conseguindo esta última, com melhores resultados, agrupar múltiplas funcionalidades de forma versátil e responsiva. Em suma, nos sistemas biológicos, a variedade de funções é conseguida através da manipulação da forma e a combinação de materiais de elevada dimensão conseguida através da interligação informacional de autorregulação entre diferentes níveis de ordem hierarquizada holograficamente. Para o efeito, e tendo em conta o papel das KETs na inovação e suas tendências de aplicação na indústria, nomeadamente portuguesa, nos seus diferentes sectores, em vez de desenvolvermos novos materiais sempre que necessitarmos de novas funcionalidades, o objetivo deverá ser adaptar e combinar os materiais ou tecnologias já existentes, de uma forma auto-organizada e mais inteligente por analogia à biologia! (bKET - Boosting Key Enabling Technologies, 2024, p. 21).

De especial relevância para a arquitetura são a tecnologias de manufatura avançada e de materiais avançados e nanomateriais, que englobam a manufatura aditiva e os biomateriais,entre outros (Ramahandry *et al.*, 2021, pp. 5 – 8).

É uma evidência que o setor da construção, nomeadamente em Portugal, e quando comparado com outros setores industriais, é predominantemente caracterizado pela ausência de digitalização e pelo baixo desempenho industrial.

Porém, tal como as restantes indústrias, o setor AEC enfrenta o desafio da quarta revolução industrial, através da inevitabilidade da adoção das KETs na construção

(Construção 4.0), com o objetivo de levar as empresas do setor a melhorar a produtividade, reduzir os riscos e gerir a complexidade num contexto de segurança, qualidade e eficiência de recursos (Ilustração 35) (Craveiro *et al.*, 2019, pp. 251, 252).

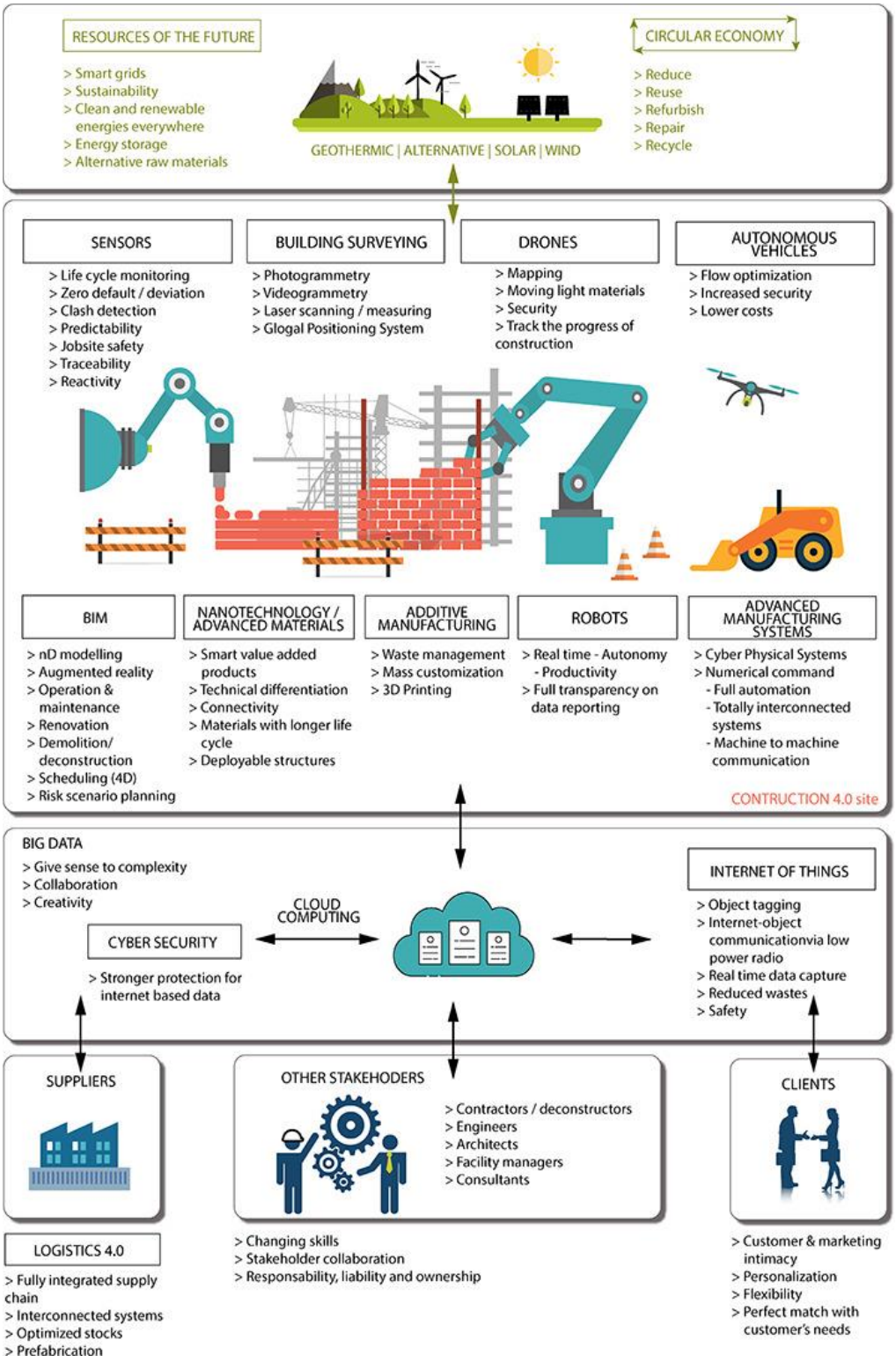


Ilustração 35 – Construção 4.0 e a economia circular (Craveiro *et al.*, 2019, p. 253)

2.2.3. ABORDAGEM DE CICLO DE VIDA

Uma grande quantidade de energia e de recursos naturais são afetados ao setor da construção, e aos edifícios, em particular. Tal respeita à produção e transporte de matérias-primas e de materiais e produtos de construção, às várias atividades relacionadas com a construção e assemblagem, à energia operacional derivada da utilização, aos trabalhos de manutenção e reabilitação e, finalmente, à desconstrução e respetiva deposição, reciclagem ou reutilização de resíduos (Wimmer *et al.*, 2016, p. 323; Bragança e Mateus, 2011, p. 1; Crawford, 2011, p. 73).

Porém, na perspetiva da economia circular não existem resíduos, mas sim substâncias biológicas ou técnicas, que poderão retornar ao ecossistema por via da compostagem, ou serem reintegradas no ciclo técnico através dos processos de reciclagem, reutilização ou remanufactura (Augusto, 2011, p. 52).

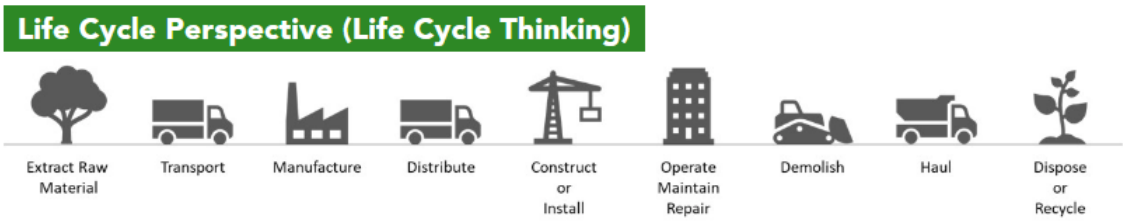


Ilustração 36 – A abordagem de ciclo de vida aplicada ao ambiente contruído. (Sustainable Facilities Tool, 2023)

No seguimento do acima exposto está subjacente o conceito de *life cycle thinking* (Ilustração 36). Esta perspetiva está na base da metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) ou Life Cycle Asssessment (LCA) e permite segmentar o ciclo de vida de um material, produto ou serviço nas suas várias etapas ou fases (Feller, 2017; Sustainable Facilities Tool, 2023; Kibert, 2008, p. 36; Edwards, 2008, p. 112).

2.2.3.1. FASES DO CICLO DE VIDA

Deste modo, para a determinação do efetivo impacte ambiental de um edifício ou construção, devem-se considerar todas as etapas do respetivo ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas até à sua eventual demolição e deposição (Ilustração 37) (Crawford, 2011, p. 15; Feller, 2017). Citando Simonen (2014): " […] Understanding a building or product from the perspective of its entire life cycle is the first step in developing sustainable and regenerative buildings." (Feller, 2017).

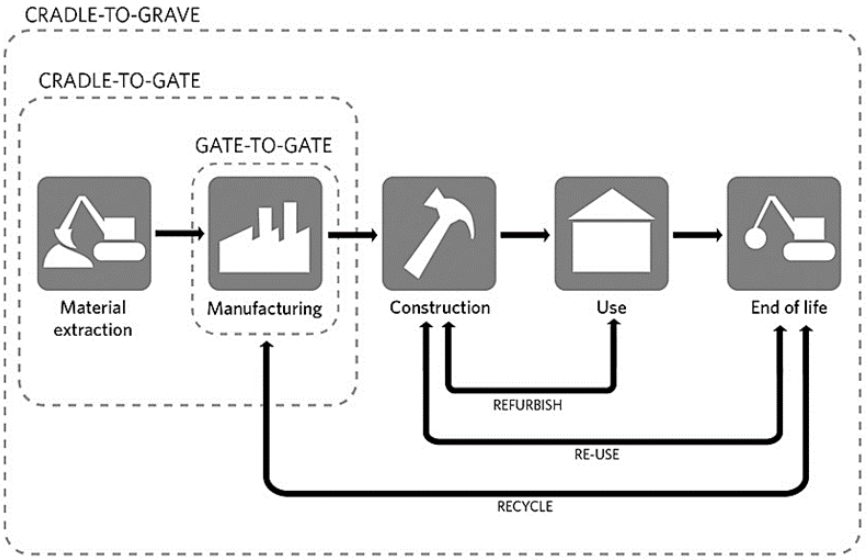


Ilustração 37 – Esquema simplificado da abordagem de ciclo de vida de um edifício. (Feller, 2017)

As fases do ciclo de vida de um edifício são, de acordo com a ISO 21931 e a EN 15978, as seguintes (Tabela 8): 1. Produto (A1 – A3); 2. Construção (A4 – A5); 3. Utilização (B1 – B7); 4. Fim de Vida (C1 – C4), 5. Informação Suplementar: benefícios e cargas além das fronteiras do sistema (D) (Sustainable Facilities Tool, 2023; Huang, 2018, p. 7), assim descritas:

> The production stage involves the energy and resources used to extract raw materials, to transport the materials to product manufacturing facilities, and to produce the final building products. The construction stage involves the transportation of materials to the construction site as well as the energy used to power the construction equipment, to supply supporting construction materials, and to dispose of any waste generated during the construction process. The use stage involves the impacts of occupying a building over its lifetime due to lighting, heating, water use, and any materials used for maintenance, repairs, and replacement. The end-of-life stage involves the demolition and disposal of the building as well as waste processing (if the building is not repurposed or improved for further occupancy or use). Finally, the last stage gathers all of the miscellaneous effects of reusing, recycling, and/or recovering materials, energy, or water from the project. These effects are called externalized impacts because they are manifested outside of the system boundary, which is defined as the physical limits of the LCA study. Throughout the life cycle stages of a building, emissions and other pollutants are produced and released into the surrounding environment (Huang, 2018, p. 7).

Considerar a abordagem do ciclo de vida, onde todas as fases são consideradas (Tabela 8), é crucial para assegurar que o desempenho ambiental de um edifício é otimizado, garantindo que todo e qualquer impacte seja devidamente contabilizado, sem permitir que as cargas ou os benefícios ambientais ou energéticos de uma fase sejam transferidas outra, enviesando a avaliação final.

Tabela 8 – Fases do ciclo de vida de um edifício.

Life Cycle Stages		
PRODUCT	A1	Extraction, Production
	A2	Transport
	A3	Manufacturing
CONSTRUCTION	A4	Transport
	A5	Construction, Installation
USE	B1	Use
	B2	Maintenance
	B3	Repair
	B4	Replacement
	B5	Refurbishment
	B6	Energy Use
	B7	Water Use
END OF LIFE	C1	Demolition
	C2	Transport
	C3	Processing
	C4	Disposal
BEYOND	D	Reuse, Recycling, Recovery

Fonte: Sustainable Facilities Tool (2023)

Como exemplo do acima exposto e no caso de comparação entre dois edifícios, em o critério seja exclusivamente a energia incorporada, envolvida nas fases produção e construção (A1 – A5), então considera-se que o edifício A tem melhor desempenho do que o edifício B.

Contudo, se alargarmos a análise à fase de utilização (B1 – B7), então a situação inverte-se, e o edifício B passa a ser preferencial, visto ter sido previamente objeto de um investimento inicial, que diminui a frequência e o âmbito dos trabalhos de reabilitação e o consumo energético associado às operações (Ilustração 38) (Crawford, 2011, p. 75).

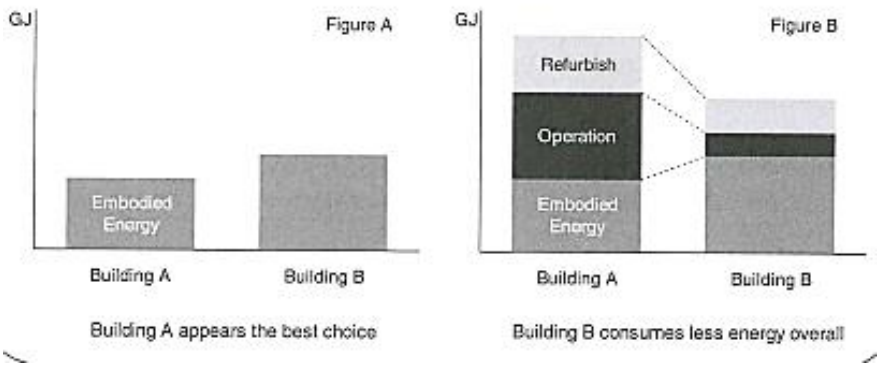


Ilustração 38 – A importância da abordagem de ciclo de vida na avaliação ambiental de edifícios. (Crawford, 2011, p. 75)

2.2.3.2. O CONCEITO CRADLE-TO-CRADLE

Resumindo o exposto anteriormente, podemos sintetizar que num sistema produtivo linear, o processo inicia-se com a extração de recursos naturais (*cradle*) e termina no aterro (*grave*), passando pela fase de utilização, pelo que se utiliza apropriadamente o termo *cradle-to-grave* (berço-à-cova).

Contudo, no paradigma da economia circular, no final da sua vida útil, os produtos são reciclados, reutilizados, remanufaturados ou levados a compostagem, fechando os ciclos em cascata e mantendo valor económico ao longo do tempo. Neste caso, e em oposição ao sistema linear, estamos perante um fluxo de materiais fechado, designado de *cradle-to-cradle* (berço-ao-berço) em função das fases do ciclo de vida (Ilustração 39).

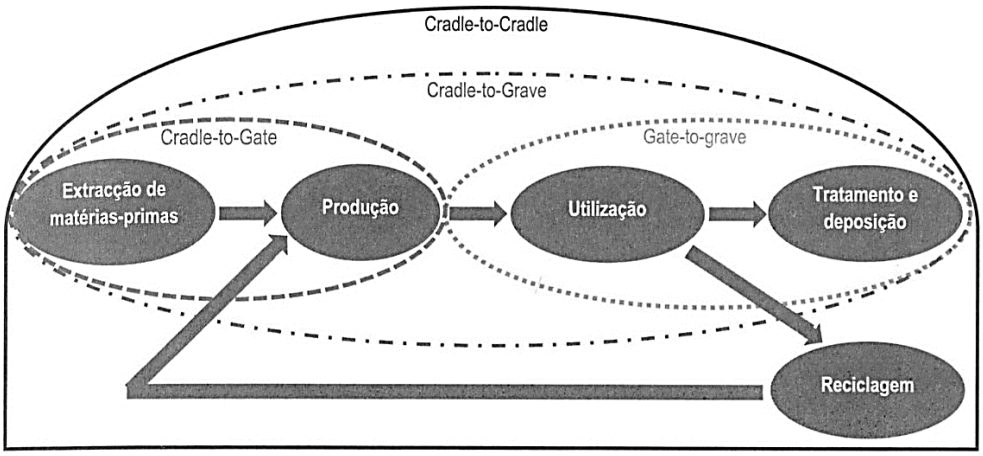


Ilustração 39 – Relação entre fases de ciclo de vida e o conceito *Cradle-to-Cradle*. (Bragança e Mateus, 2011, p. 11)

Enquanto *cradle-to-grave* e c*radle-to-cradle* respeitam à totalidade das fases do ciclo de vida de um produto ou serviço (A1 – C4 e A1 – D, respetivamente) a análise c*radle-to-gate* só considera até à "porta da fábrica" (*gate*), ou seja, A1 – A3, omitindo as posteriores (Bragança e Mateus, 2011, p. 10; Amado *et al.*, 2015, p. 110).

Neste contexto há que sublinhar que os sistemas de reciclagem maioritariamente existentes ao dia de hoje, muitas vezes identificados com a economia circular, não o são de facto, pois os materiais ao fim de alguns (poucos) ciclos acabam por se transformar em resíduos, pelo que na melhor das hipóteses estamos perante um processo *cradle-to-grave* (linear) dissimulado.

O conceito de economia circular está fortemente assente nos conceitos de ecoeficácia e de *cradle-to-cradle*, ou seja, numa economia de nutrientes técnicos e biológicos, em linha com a i5.0 (Ilustração 40), de modo a gerar e potenciar um efeito regenerativo no ambiente e na sociedade (EPEA GmbH, 2023).



Ilustração 40 – *Cradle-to-Cradle* como agente central da economia circular e da Indústria 5.0. (EPEA GmbH, 2023)

A partir do trabalho desenvolvido em 1976 pelo arquiteto suíço Walter Stahel (1946) e a economista e socióloga Geneviève Reday-Mulvey (1946), num relatório de investigação a pedido da Comissão das Comunidades Europeias, e onde se propunha uma economia baseada em ciclos fechados de modo a minimizar materiais, energia e a deterioração ambiental ((Vartan, 2021; Stahel, 2016, p. 435), o arquiteto norte-americano Bill McDonough (1951) e o químico alemão Michael Braungart (1958) desenvolveram uma filosofia de *design* Cradle-to-Cradle (C2C) baseada em três princípios: zero resíduos, energias renováveis e diversidade (Ellen MacArthur Foundation, 2023):

> Cradle to Cradle design takes inspiration from natural systems, where there is no concept of waste: everything is a resource for something else. Biological nutrients should be safely returned to the soil, while technical nutrients should be used again and again at high quality. The second principle is to use clean and renewable energy. The argument goes that natural systems thrive on current solar income and human systems could too. Renewable energy is clean (at the point of use), low-cost to operate, creates no emissions in use, and utilises abundant resources. Finally, celebrate diversity: diversity builds resilience in natural systems, and can do so in human systems, too. Equally, no two places are the same: a diverse approach is often necessary to overcome the challenges and meet the opportunities offered by different geographies. (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

O modelo C2C foca-se na ecoeficácia (em lugar da ecoeficiência), com o objetivo de alcançar um impacte positivo (em lugar da mera redução dos impactes negativos) e tem uma particular atenção à composição molecular dos materiais, permitindo uma reciclagem de qualidade e uma contínua recuperação e reutilização dos nutrientes

técnicos e biológicos (Ilustração 41) (Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 27), numa espiral de melhoria (Cheshire, 2016, p. 5).

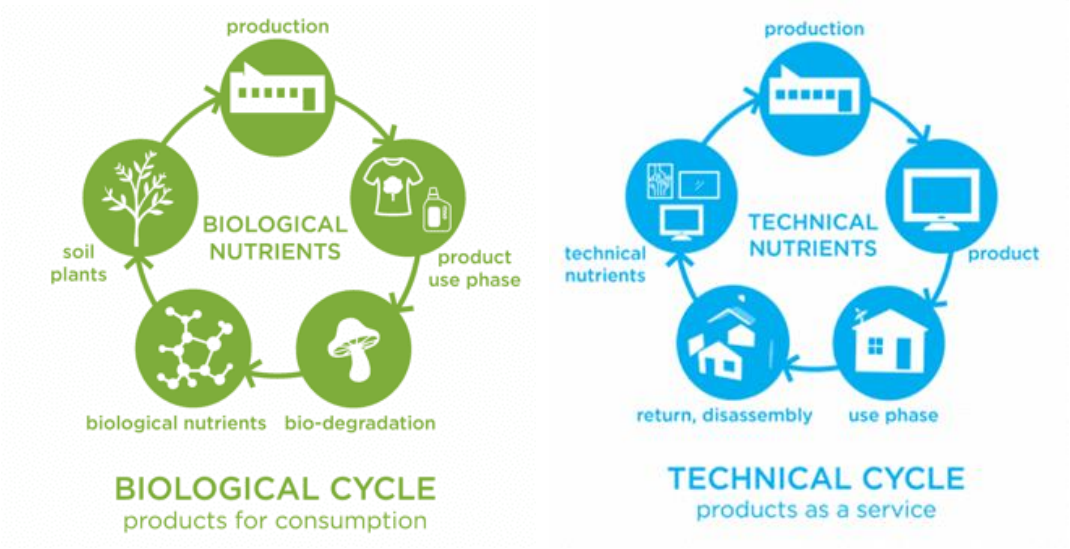


Ilustração 41 – Os ciclos biológico e técnico segundo o modelo C2C. ([Adaptado a partir de]: William McDonough + Partners, 2023)

De modo a implementar estes princípios, os autores desenvolveram um sistema de certificação que abrange as seguintes cinco categorias:

1. *Material health*: conhecer os componentes químicos dos materiais e otimizá-los de modo a torná-los mais seguros para a saúde humana e o ambiente;

2. *Material reutilisation*: conceber produtos feitos com materiais que provenham e que possam retornar à natureza ou à indústria, em circularidade;

3. *Renewable energy and carbon management*: produção a partir de energias renováveis e limpas;

4. *Water stewardship*: gerir a água como um recurso precioso e um direito humano fundamental;

5. *Social fairness*: Projetar operações de modo a honrar as pessoas e os ecossistemas implicados na conceção, utilização, deposição ou reutilização de um produto (Cheshire, 2016, p. 95; Vartan, 2021; Rangel, 2020).

Este conceito, aplicado ao ambiente construído, permite encarar os edifícios como um conjunto de metabolismo de nutrientes, de fluxos de energia e de água e de biodiversidade cultural e ecológica. As cinco categorias acima referidas, podem-se

plasmar nos “Five Goods: Good Materials; Good Economy; Good Energy; Good Water, Good Lives” (Ilustração 42) (William McDonough + Partners, 2020, pp. 5, 6).

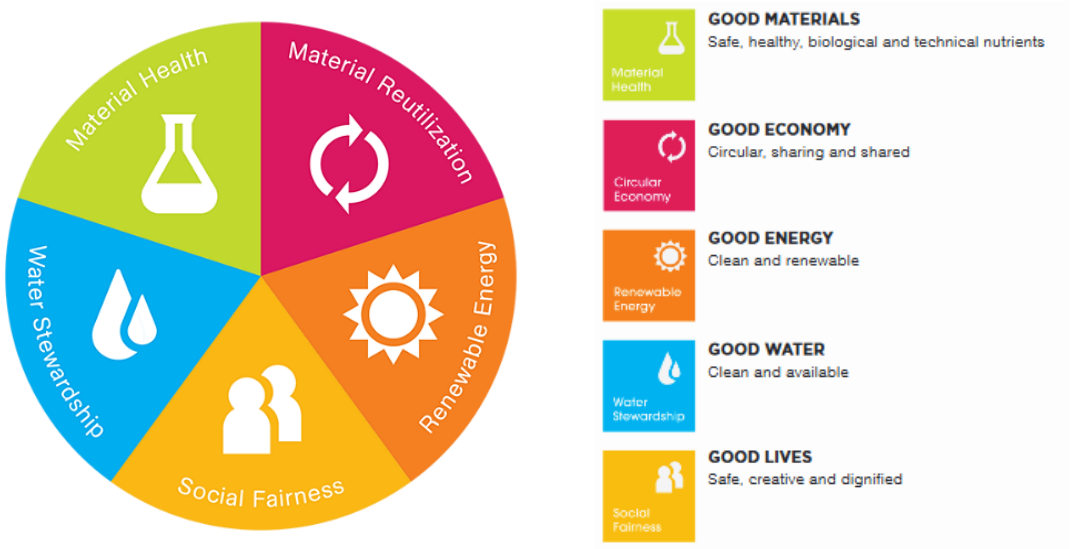


Ilustração 42 – As cinco categorias e os Five Goods da certificação C2C. ([Adaptado de:] Rangel, 2020; Schickedantz, 2019, p. 3)

Nesta perspetiva circular e regenerativa, McDonough e Braungart (2002) propõem que os edifícios possam ser reconhecidos como *árvores* e as cidades como *florestas,* tendo em conta os benefícios ambientais e sociais (Ilustração 43) (Kibert, 2008, p. 118):

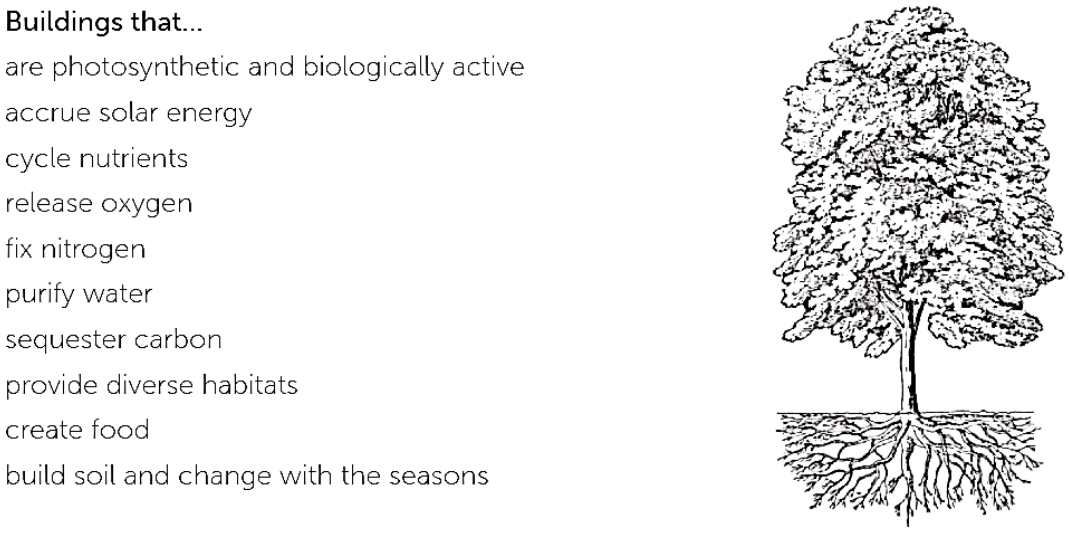


Ilustração 43 - Edifícios como árvores. (William McDonough + Partners, 2023)

> But what if buildings were alive? What if our homes and workplaces were like trees, living organisms participating productively in their surroundings? Imagine a building, enmeshed in the landscape, that harvests the energy of the sun, sequesters carbon and makes oxygen. Imagine on-site wetlands and botanical gardens recovering nutrients from circulating water. Fresh air, flowering plants, and daylight everywhere. Beauty and

> comfort for every inhabitant. A roof covered in soil and sedum to absorb the falling rain. Birds nesting and feeding in the building's verdant footprint. In short, a life-support system in harmony with energy flows, human souls, and other living things. Hardly a machine at all (McDonough e Braungart, 2002).

Vários edifícios e empreendimentos foram já projetados e construídos com maior ou menor integração destes princípios. Um destes exemplos é o Grünewald District, no Luxemburgo (Ilustração 44), projetado para ser um modelo de circularidade e uma inspiração para o futuro das cidades, propondo medidas concretas (*building like a tree*) para "[…] 100% renewable energy, enhanced biodiversity, positive water balance, material health, human and environmental well-being, and component demountability and recyclability" (William McDonough + Partners, 2020, p. 25).

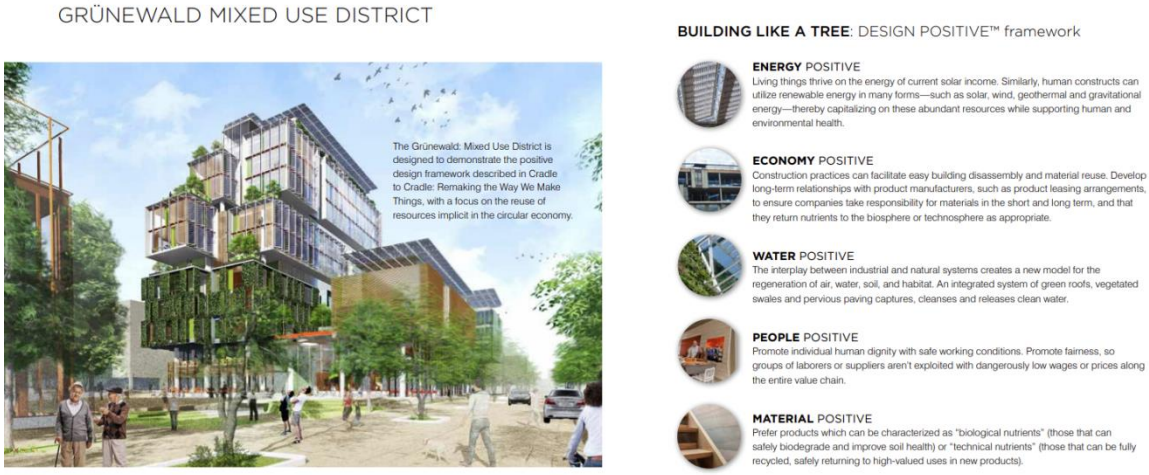


Ilustração 44 – Principios C2C aplicados no Grünewald District. (William McDonough + Partners, 2020, pp. 27, 28)

2.2.3.3. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A metodologia destinada à determinação e avaliação dos impactes ambientais de um produto, serviço ou processo, ao longo de todas as etapas do seu ciclo de vida é designada por Avaliação de Ciclo de Vida (Crawford, 2011, p. 38; Kibert, 2008, p. 248; Dieterle, Schäfer e Viere, 2018, p. 764).

Trata-se de uma matéria que se encontra devidamente normalizada (ISO 14040:2006[6] e ISO14044:2006[7]) e profusamente tratada em várias publicações nacionais e

[6] ISO 14040:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework
[7] ISO 14044:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines

estrangeiras, nomeadamente na dissertação de mestrado[8] do autor deste trabalho, pelo que tal não será abordado, sob risco de redundância.

Em todo o caso, deve-se referir que – apesar de todos os desenvolvimentos, e da cada vez maior familiarização dos projetistas com esta metodologia – realizar uma ACV para um edifício é um processo complexo, que lida com a informação de uma multiplicidade de componentes, com diferentes tempos de vida útil e de manutenção, razão pela qual, (e apesar de ser particularmente relevante para a indústria da construção), a maioria dos estudos de ACV tem tendência em focar-se nos impactes da fase de produção A1 – A3 (*Cradle-to-Gate*), onde as variáveis são mais controladas e previsíveis (Roaf, Horsley e Gupta, 2004, pp. 397–399):

> Life cycle assessment (LCA) has been used for assessing and mitigating the associated environmental impacts of buildings and other infrastructure for the past decades. LCA records all substances exchanged with the environment during the product life cycles. Then, the impacts of products on the environment are quantified by using environmental damage indicators such as climate change, human health and fossil resource depletion. According to ISO 14040/14044, LCA consists of four aspects: the goal and scope definition, life cycle, inventory analysis, life cycle impact assessment and interpretation of results. Any variation in these four aspects can lead to different results of environmental impact assessment. In CE practices, LCA is coupled with circularity indicators to evaluate both circularity and sustainability aspects of buildings. However, applying LCA to CE for the built environment is challenging (Haoran Lei *et al.*, 2021, p. 2).

Partindo desse pressuposto, iremos sublinhar a relação da ACV com a descarbonização e a economia circular, assim como a integração desta ferramenta ambiental com os aspetos económicos e sociais: a chamada LCA integrada ou Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) (Bragança e Mateus, 2011, p. 11; Tokede *et al.*, 2022, p. 3).

Apesar dos potenciais benefícios da LCSA, este é ainda um tema desafiante e escasso no setor da construção. Sendo a ACV, por definição, uma metodologia holística, a mais-valia e a originalidade da LCSA consiste no alargamento do âmbito, e na integração e harmonização das três dimensões da sustentabilidade, de modo a estar habilitado à tomada de decisões sustentáveis (Ilustração 45) (Tokede *et al.*, 2022, p. 2; Mateus e Bragança, 2006, pp. 35, 194).

[8] A metodologia da avaliação do ciclo de vida na definição de critérios de sustentabilidade em edifícios (2009)

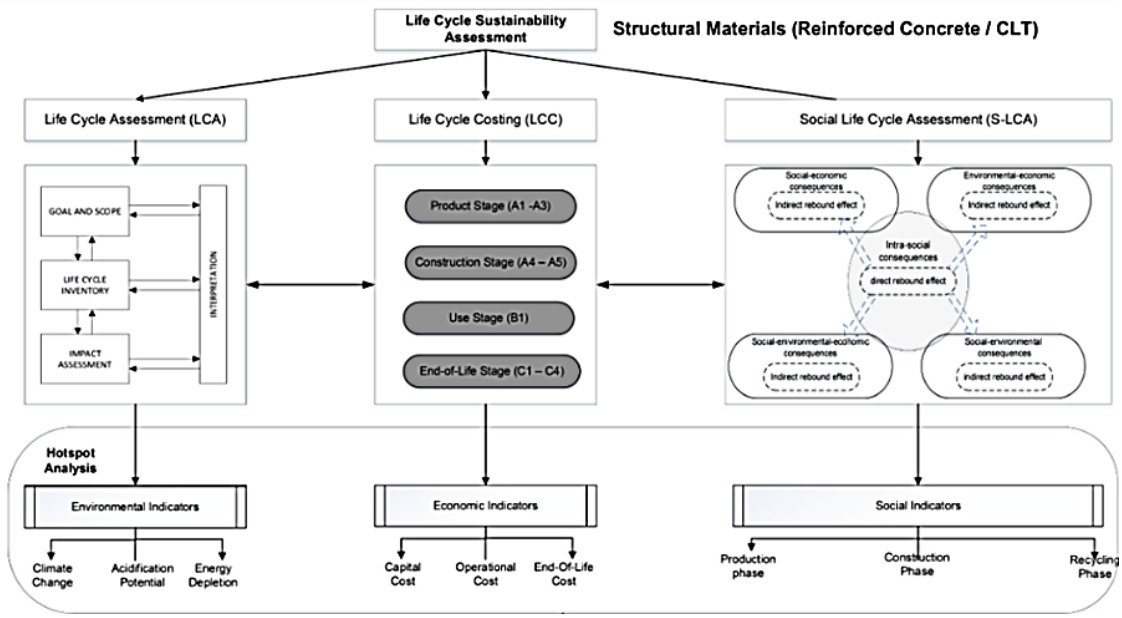


Ilustração 45 – LCSA como apoio à tomada de decisão entre dois sistemas estruturais. ([Adaptado de:] Tokede *et al.*, 2022, p. 7)

A norma ISO/TC 21929-1 (2006) enquadra e orienta no sentido dos indicadores de sustentabilidade adequados ao desempenho ambiental, económico e social de um edifício (Tabela 9).

Tabela 9 – Indicadores de sustentabilidade de edifícios segundo ISO/TC 21929-1)

AMBIENTAIS	ECONÓMICOS	SOCIAIS
Alterações Climáticas	Investimento	Qualidade dos edifícios
Destruição da camada de Ozono	Utilização	Efeitos relacionados com a saúde e segurança dos utilizadores
Acidificação	Desconstrução e tratamento de resíduos	Acessibilidade
Eutrofização	Desenvolvimento do valor económico do edifício	Satisfação dos utilizadores
Formação de oxidantes fotoquímicos	Retorno (Receitas geradas pela construção)	Qualidade arquitetónica
Esgotamento de recursos não-renováveis	-	Proteção do Património cultural
Formação de poluentes	-	-

Fonte: [Adaptado de:] Bragança e Mateus (2011, p. 12)

Os edifícios contribuem de forma significativa para as emissões de GEE, sendo, por isso, um alvo preferencial de aplicação da metodologia ACV com vista à sua otimização. À escala global, a industria da construção é responsável por 39% das emissões anuais de CO2 (28% operacionais, principalmente devido ao aquecimento e arrefecimento, e 11% proveniente dos materiais de construção e construção) (Brannen, 2024, p. 2), pelo

que é urgente, e necessário, desenvolver soluções sustentáveis, resilientes e de baixas emissões, desde o inicio da fase de projeto, com vista a obter o melhor desempenho ambiental do meio edificado (Hansen *et al.*, 2023, p. 1; Haoran Lei *et al.*, 2021, p. 1).

Um dos indicadores mais utilizados e diretamente relacionado com esta temática é o Potencial de Aquecimento Global (PAG), um fator de caracterização medido em dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), e que reflete o carbono incorporado predominante no módulo A (A1–A5) (Crawford, 2011, p. 56; Mateus e Bragança, 2006, p. 85; Weir, Rempher e Esau, 2023).

Há a salientar o facto de o carbono incorporado ser fortemente influenciado, não só pelo tipo de produto ou material, mas também pela eficiência material e pela otimização ambiental da sua conceção, ou seja, pelo grau de ecoeficiência e de *ecodesign* (Weir, Rempher e Esau, 2023).

No caso concreto dos edifícios, a utilização de sistemas construtivos modulares e/ou prefabricados, pode contribuir significativamente para a diminuição deste indicador, por via da massiva redução de Resíduos de Construção e Demolição (RCDs), assim como através de uma conceção orientada para a durabilidade e para a desconstrução, aliada à escolha de materiais sustentáveis de baixo carbono (Weir, Rempher e Esau, 2023).

É de sublinhar o facto de, como já referido, o carbono resultante das emissões que ocorrem ao longo das várias fases do ciclo de vida dos materiais (incluindo a construção) representar cerca de 11% das emissões globais (Ilustração 46), sendo que, pela sua dimensão, deverá ser considerada uma prioridade prescrever e construir com materiais de baixo carbono incorporado, como medida de primeira linha no combate às alterações climáticas antropogénicas (One Click LCA, 2021, p. 6; Bucklin *et al.*, 2022, p. 1).

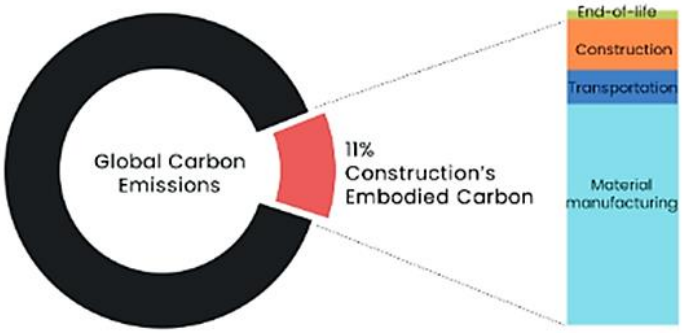


Ilustração 46 – Percentagem das emissões de carbono incorporado do setor da construção, face às emissões globais.(One Click LCA, 2021, p. 6)

Nesse sentido, a divulgação dos resultados de uma ACV através da respetiva Declaração Ambiental de Produto[9] (DAP) ou Environmental Product Declaration (EPD) permite, entre outras possibilidades, aceder a informação credível e comparar as várias opções disponibilizadas, de modo a que o projetista ou prescritor possa fazer as suas opções devidamente fundamentadas, tendo em linha de conta os indicadores relevantes, para as mesmas unidades funcionais (One Click LCA, 2021, p. 6; Mateus e Bragança, 2006, p. 16).

O indicador PAG (GPW) permitirá identificar, de uma forma tão objetiva quanto possível, os materiais de construção mais favoráveis em termos de energia incorporada levando a que o setor AEC reduza o seu passivo ambiental. A madeira e todos os materiais de construção de origem não-extrativa ou renovável, apresentam um forte potencial de redução de emissões e materiais poluentes, como ainda têm a capacidade de remover carbono da atmosfera e de o armazenar nas componentes dos edifícios (Bucklin *et al.*, 2022, p. 1;.Brannen, 2024, pp. 21, 22, 193).

A aplicação das ferramentas ACV e DAP utilizadas para a quantificação e divulgação dos impactes de produtos e componentes integrados num edifício, são a base de um processo de tomada de decisão devidamente fundamentado, com vista à otimização do projeto (Bragança e Mateus, 2011, p. 16; Bucklin *et al.*, 2022, p. 2; Crawford, 2011, p. 176).

Mais recentemente, a Comissão Europeia introduziu a rotulagem Pegada Ambiental de Produto (PAP) ou Product Environmental Footprint (PEF), através da **Recomendação 2021/2279**, com o objetivo de normalizar no espaço europeu, o modo de avaliação e de comunicação ao consumidor final, do perfil ambiental de um produto ou serviço.

Para o alcançar, a metodologia preconizada pela PAP modela e quantifica os impactes dos fluxos de material, energia, emissões e resíduos associados à totalidade do ciclo de vida de um produto, divididas em 16 categorias de impacte ambiental (alterações climáticas, recursos naturais, água, ar, utilização do solo, toxicidade, etc.), juntamente

[9] A rotulagem ambiental ou ecológica encontra-se normalizada na ISO 14020 e integra-se na série ISO 14000, respeitante à gestão ambiental, que por sua vez se subdivide nas seguintes categorias: ISO 14024 - Tipo I, ISO 14021 - Tipo II e ISO 14025 - Tipo III
Tipo III: declarações ambientais verificadas e certificadas por terceiros, baseadas na avaliação de ciclo de vida (ACV) e que permitem, entre outras, a comparação entre produtos (Bragança e Mateus, 2011, p. 15).

com elementos específicos, permitindo a comparação do desempenho ambiental entre produtos semelhantes (DNV, 2023).

Sendo, também, uma metodologia baseada na ACV, implica a adoção de regras de categorização, assegurando que os aspetos mais relevantes em cada categoria estejam incluídos, de modo a permitir a correta classificação e comparação (Comissão Europeia, 2021, pp. 1 – 6).

Constata-se que a metodologia seguida para determinar a PAP, quando comparado com o da DAP, adapta-se e reflete melhor o potencial da economia circular, pois contabiliza os fluxos (benefícios e cargas) devidos à recirculação – reutilização, reciclagem, recuperação – diretamente no módulo respetivo, no momento em que estes ocorrem (Haoran Lei *et al.*, 2021, p. 7).

Por isso, no sentido de alcançar esse objetivo, verifica-se uma tendência no sentido de desenvolver uma LCA abrangendo todas as fases (Ilustração 47), de modo a ir ao encontro do paradigma da economia circular, apesar das dificuldades e obstáculos acrescidos que tal significa para a modelação da fase de fim de vida (Haoran Lei *et al.*, 2021, p. 8, 9).

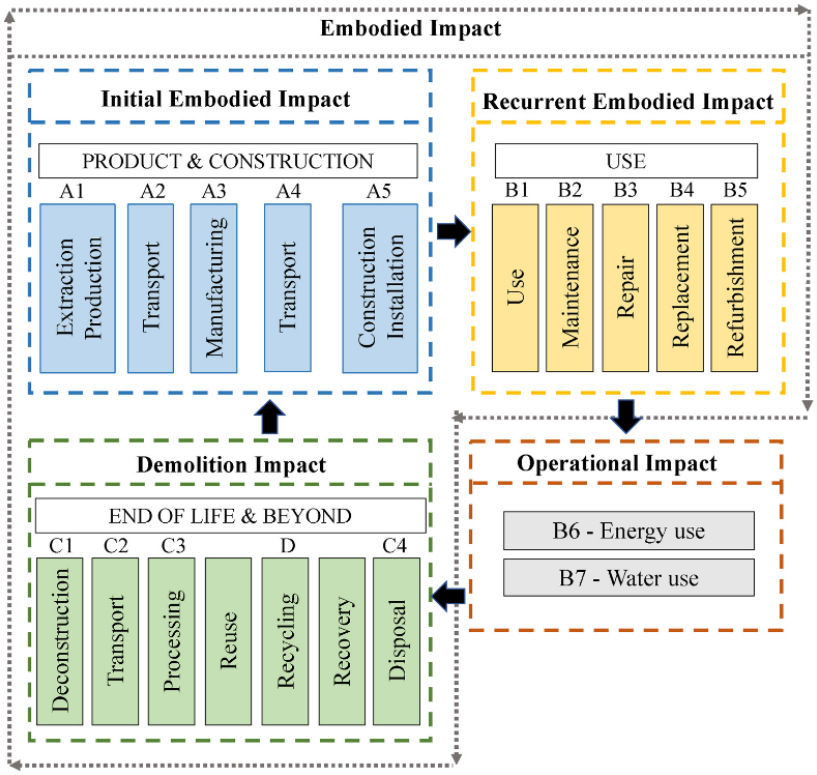


Ilustração 47 – Ciclo de vida do ambiente construído no contexto da economia circular. (Haoran Lei *et al.*, 2021, p. 9)

No entanto, existem limitações e cuidados a ter quando se trata de utilizar a ACV na transição para a economia circular, nomeadamente: 1. O foco nos benefícios particulares duma solução específica de curto-prazo, em lugar de uma abordagem sistémica no tempo; 2. A tendência em não considerar mais aspetos qualitativos ou de difícil mensuração; 3. Os seus resultados, e apesar da subjetividade da interpretação estar reduzida ao mínimo, estão também sujeitos a enviesamento, dependendo da qualidade dos autores, da fiabilidade e disponibilidade dos dados, entre outros (Ellen MacArthur Foundation, 2023):

> In order to successfully use LCA to support and inform the transition to a circular economy, it is important to be mindful of its limitations and use it as one tool among many, and not as a single source of truth. Rather than simply optimising individually in today's system, we need to envisage the target state we want to achieve — a circular economy — and start innovating towards it (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

São propostos quatro modos de utilização da ACV, como ferramenta de apoio à transição circular: 1. Identificação dos pontos críticos (*hotspots*) de um produto ou serviço; 2. Investigação dos impactes ambientais causados pela variação de fatores externos (p.e., *mix* energético[10]); 3. Comparação entre duas soluções similares, aferindo a menos impactante; 4. Apoio à inovação, preferencialmente nas últimas etapas do processo (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

A metodologia ACV constitui, dentro das suas limitações, uma ferramenta prática imprescindível para a implementação da economia circular, desde logo, quantificando e, eventualmente, reduzindo o respetivo impacte ambiental, mas indo também ao encontro de estratégias e práticas de melhoria, como o caso da conceção para desconstrução ou Design for Deconstruction (DfD), de extrema importância para a construção circular (Lausselet *et al.*, 2023, pp. 2, 3).

Lausselet *et al.* (2023) sugerem que o modelo linear da LCA seja redesenhado de modo a ir ao encontro do paradigma da construção circular, onde a DfD e a fase D (*Reuse, Recovery, Recycling*) têm lugar de destaque (Ilustração 48).

[10] "O *mix* energético corresponde à estrutura de fornecimento de energia em termos de fontes primárias e expressa-se em termos percentuais face ao consumo total de energia do país. Uma dimensão fundamental, relacionada com os desafios climáticos, é o peso das energias renováveis no *mix* energético e na produção de eletricidade, ou seja, o papel da energia hídrica, geotérmica, eólica, biomassa, resíduos e energia solar (Amador, 2022, p. 12).

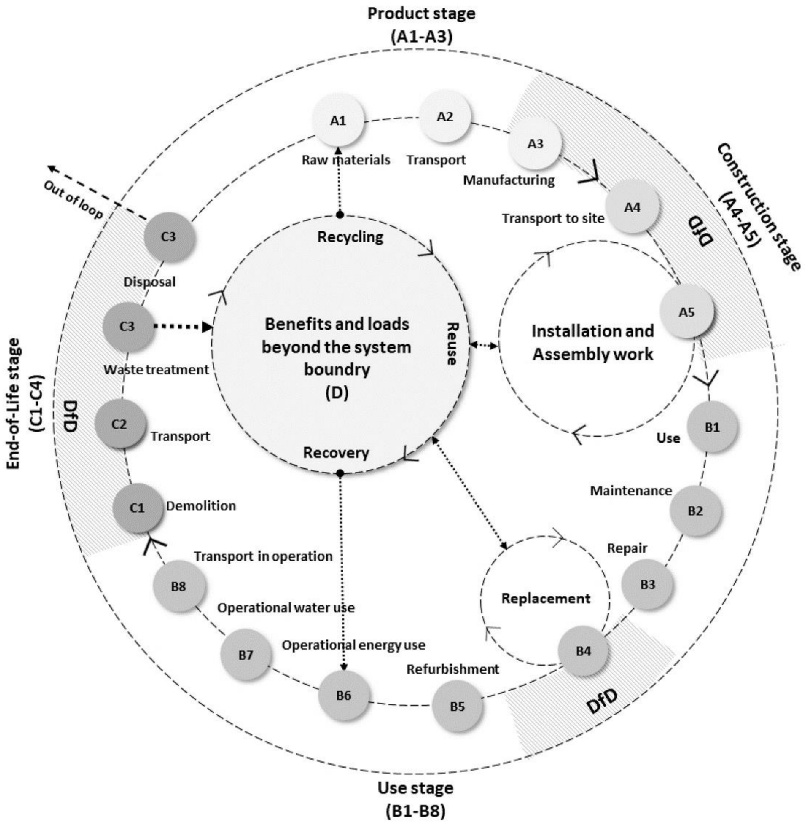


Ilustração 48 – Adaptação do modelo linear da LCA à economia circular. (Lausselet *et al.*, 2023, p. 5)

2.3. CONSTRUÇÃO CIRCULAR

2.3.1. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL E CIRCULAR

Já foram anteriormente elencadas as principais características da construção sustentável, nomeadamente a definição de Kibert (1994) e os sete princípios orientadores, donde se destacam, entre outros, a redução do consumo de recursos naturais, a reutilização e reciclagem de recursos, e a eliminação de tóxicos.

Estes mesmos princípios são os fundamentos da economia circular. A sua aplicação ao setor da construção (construção circular) possibilitará a diminuição dos impactes e a promoção de edifícios saudáveis, que deverão ser projetados de modo a serem adaptáveis e desmontáveis, bem como a integrarem materiais e componentes reciclados e recicláveis, porventura reutilizados e reutilizáveis ou, em alternativa, compostáveis.

De sublinhar que a desconstrução e o desmantelamento seletivo (DfD) são um importante fator de valorização de um edifício, transformando potenciais RCDs num

ativo financeiro, conforme as diversas partes e componentes sejam suscetíveis de retornarem em boas condições ao mercado secundário (Augusto, 2017, pp. 41, 42).

2.3.1.1. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL: CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O conceito de construção sustentável veio ao encontro de uma mudança necessária no modo como o edificado (edifícios e infraestruturas) é projetado, construído, operado e desconstruído, de modo a reduzir pressão sobre o ambiente e os recursos naturais.

Contudo, muitos dos critérios aplicados a materiais e outros aspetos da sustentabilidade são vagos e imprecisos, muitas vezes intuitivos (Kibert, Sendzimir e Guy, 2010, p. 912):

> Executing the concept of sustainable construction poses numerous difficulties. For example, contemporary architecture's efforts relative to materials analyses and their sustainability aspects generally rely on vague criteria, resulting in a great deal of imprecision. Many of these criteria are intuitive and perhaps even sensible. […] The 'Hannover Principles', dating from 1992, are said to represent recent ideas on sustainable architecture. They contain several specific materials references that are philosophically interesting but, with the possible exception of principle 6, are not useful for determining how to select ecologically sound materials (Kibert, Sendzimir e Guy, 2010, p. 912).

As dificuldades na definição e na escolha de um material, produto ou sistema, constitui um dos maiores desafios, não só pelas limitações dos materiais e produtos colocados à disposição pela indústria, mas também devido às especificidades do setor.

No sentido de contribuir para a sua resolução, Kibert, Sendzimir e Guy (2010) apontam para uma *construction ecology* (já anteriormente mencionada), uma subcategoria da ecologia industrial, caracterizada por ser um sistema que funciona em *closed loop*, integrado com os sistemas naturais e industriais, que dependa exclusivamente de fontes renováveis de energia, que promova a preservação dos sistemas naturais (Kibert, Sendzimir e Guy, 2010, p. 913; Kibert, 2008, p. 31), e que se materializa da seguinte maneira:

> The outcomes of applying these natural system analogues to construction would be a built environment (i) that is readily deconstructable at the end of its useful life, (ii) whose components are decoupled from the building for easy replacement, (iii) composed of products that are themselves designed for recycling, (iv) whose bulk structural materials are recyclable, (v) whose metabolism would be very slow due to its durability and adaptability, and (vi) that promotes health for its human occupants (Kibert, Sendzimir e Guy, 2010, p. 913).

Este conjunto de características – desconstrução, substituição, reciclagem, durabilidade e adaptabilidade, saudável – definem o patamar a partir do qual se pode parametrizar a sustentabilidade na construção, com estratégias passivas e ativas conducentes a uma arquitetura de qualidade.

Segundo Attmann (2009), a arquitetura sustentável (*green architecture)* aquela que determina o projeto e a construção sustentável, está na interseção da sustentabilidade, com a ecologia e com o desempenho) (Ilustração 49). Cada uma delas é o resultado de três componentes transversais: elementos (materiais e tecnologia), recursos e ambiente: “Creating sustainable buildings requires that one consider the sustainability of their technological and material elements, resources, and environment.” (Attmann, 2009, p. 28).

Neste contexto, *green architecture* é um termo que envolve a combinação de aspetos ambientais, sociais e tecnológicos com vista à mitigação do impacte ambiental dos edifícios, pelo aumento da eficiência e pela gestão responsável da utilização dos materiais, energia e solo (Attmann, 2009, p. 27).

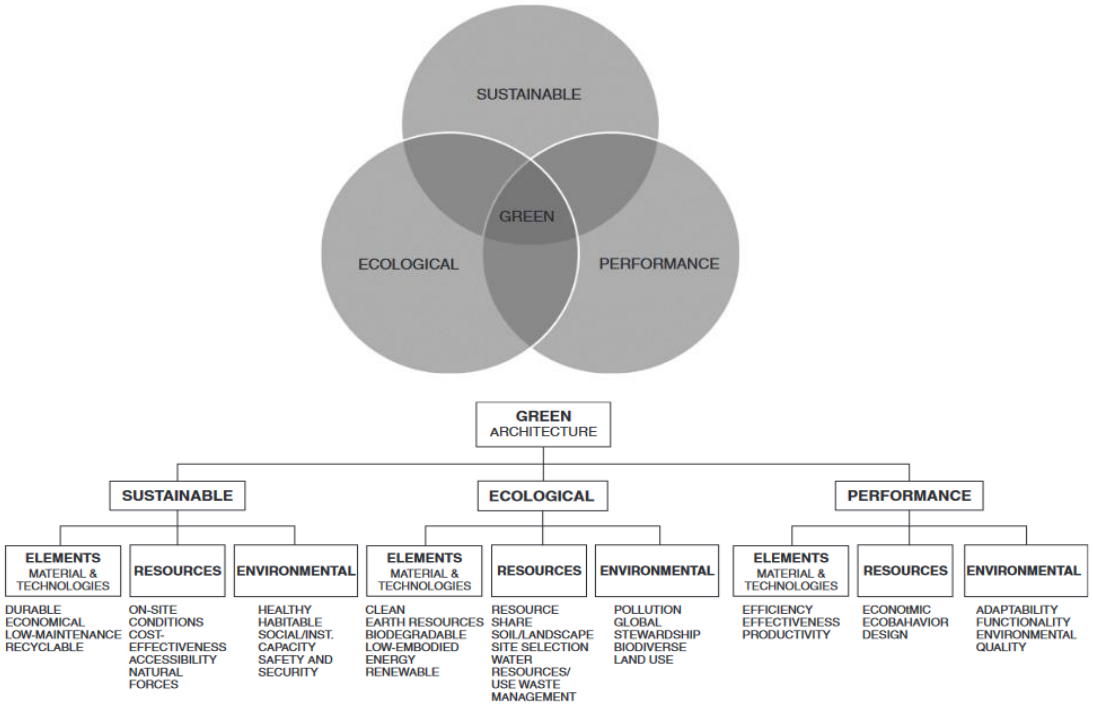


Ilustração 49 – *Green Architecture:* sustentabilidade – ecologia – desempenho. ([Adaptado a partir de:] Attmann, 2009, pp. 40, 41)

A responsabilidade da arquitetura neste processo é inquestionável, se bem que nem sempre esteja devidamente presente. Todo o edificado, independentemente da sua

dimensão, está diretamente relacionado com o território, depende de matérias-primas, afeta o ecossistema e gera poluição e resíduos (Tabela 10).

Tabela 10 – Potenciais impactes ambientais derivados do edificado.

ACTIVITY	ENVIRONMENTAL IMPACTS
Mining/drilling/extracting	Deforestation; destruction of plant and animal habitat; existing settlements; land erosion; water pollution
Manufacturing/assembly	Energy consumption (impacts of producing energy); waste generation
Transportation/distribution	Energy consumption, CO_2 emission; resource use (packaging)
Building	CO_2 emission; pollution and radiation from the materials and technologies (exposed to chemical and climatic activities); pressure and damage
Maintenance/life cycle	Energy consumption, CO_2 emission; resource use and replacement; wear and tear; chemical contamination (material loss—from roofs, pipes); water pollution
Demolition	Chemical contamination; toxicity; environmental poisons
Recycle/waste	Landfill decomposition; groundwater contamination; methane gas production

Fonte: Attmann (2009, p. 20)

Assim sendo, a conceção e a construção utilizando tecnologias e materiais sustentáveis, com vista à obtenção de edifícios de alto desempenho, assume um cariz urgente, necessário e imperativo, tal como aponta Attmann (2009):

> In order to fully address its responsibilities, architecture should abandon old methods, technologies, and materials and push for a new paradigm shift. The design objectives should be based on sustainable, ecological, and performance criteria rather than trends and aesthetics; be environmentally conscious rather than market-driven; and be inherently resourceful rather than globally destructive (Attmann, 2009, p. 23).

Também o termo *green building* é muitas vezes utilizado como sinónimo, ou equivalente, de edifício ou construção sustentável. É um termo ambíguo, que pode assumir vários significados e alcances, conforme os autores ou os contextos. Snell e Callahan (2009) apontam 5 características diferenciadoras da construção sustentável: 1. Baixo impacte ambiental; 2. Eficiência de recursos ao longo da vida do edifício; 3. Durabilidade; 4. Não-tóxico; 5. Estético (Snell e Callahan, 2009, p. 17).

Em todo o caso, é essencial que os projetistas e os construtores estejam habilitados com uma visão holística e integrada, e que considerem todos os impactes decorrentes do processo de projeto e de construção (Yeang, 2007, p. 59; Pinto e Inácio, 2018, p. 45).

No caso específico de Portugal, Pinto e Inácio (2018) chamam ainda a atenção para o papel dos vários atores na implementação da construção sustentável:

> O impacte ambiental causado pelas empresas da indústria da construção e pelas paralelas produtoras de grande diversidade de materiais, é muito forte no que diz respeito à sua actividade. A poluição sonora, tóxica e visual daí resultante, devido à utilização de equipamentos e de transporte, alguns inadequados, ao recurso de tecnologias muitas vezes obsoletas, assume uma dimensão significativa. […] Por outro lado, a mentalidade da grande maioria dos responsáveis pelas empresas de construção é fortemente tradicionalista, empírica, imediatista e muitas vezes especulativa. Por isso há que contar, num processo que se deseja de mudança rumo à Construção Sustentável, com uma reação natural a uma transformação que implique novas mentalidades e atitudes, ou mesmo alterações de tecnologias. Também aqui os interesses destas empresas poderão ser um obstáculo ao processo de desenvolvimento sustentado (Pinto e Inácio, 2018, p. 42).

Neste sentido, é óbvio que, para além de dar resposta plena às necessidades dos utentes (desempenho eficiente), o projeto e o processo construtivo devem "[…] promover uma redução do actual nível de impactes ambientais que integram todo o ciclo de vida do edifício" (Amado *et al.*, 2015, p. 65) (Ilustração 50).

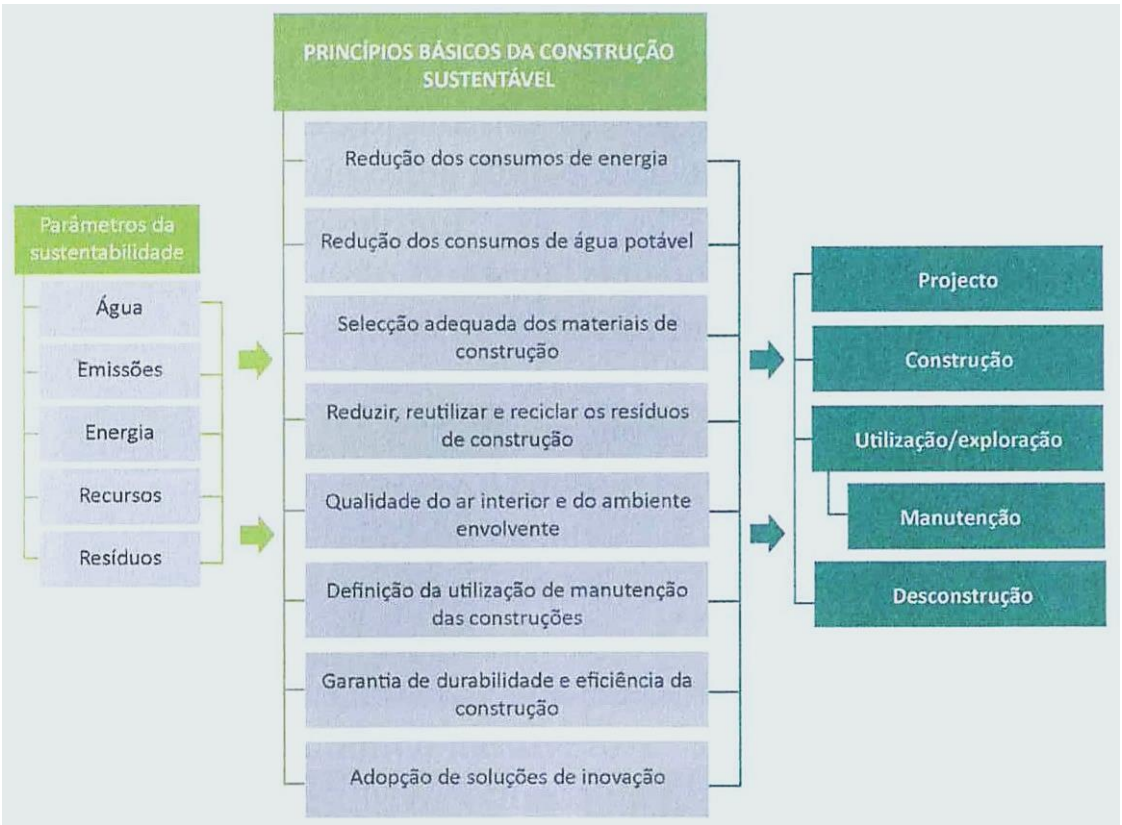


Ilustração 50 – O processo de construção sustentável. (Amado *et al.*, 2015, p. 71)

Tal poderá será atingido a partir da correta aplicação de estratégias passivas e ativas de construção: as primeiras para alcançar uma redução do consumo de materiais, energia e água; as segundas através da otimização das necessidades de energia operacional obtida a partir de fontes renováveis, principalmente aquecimento e arrefecimento, integrando tecnologias eficientes e sistemas de controlo.

Contudo, o desempenho otimizado e a qualidade ambiental de um edifício – de modo a diminuir os impactes e ter uma arquitetura de qualidade – é essencialmente baseada nos princípios de arquitetura passiva, e depende de uma abordagem integrada que envolve o local, a forma, o envelope (paredes e cobertura) e as especialidades (Brophy e Lewis, 2011, p. 43).

Este posicionamento é extremamente importante, pois, muitas vezes, a construção sustentável é confundida e reduzida à eficiência energética, sendo, em muitos casos, conseguida à custa de estratégias ativas em detrimento das passivas.

Assim, nesta nova abordagem, o envelope do edifício é uma componente fundamental para alcançar a sustentabilidade na construção (*fabrics approach*),: "[…] the envelope can become an interactive environmental mediator rather than a mere separator as in the past." (Brophy e Lewis, 2011, p. 43). Devido à sua importância, voltaremos mais adiante a este tema.

Recentemente, tem ganho destaque o termo *regenerativo* ou *construção regenerativa* e que respeita a uma conceção mais integrativa e holística. Em contraste com os edifícios sustentáveis (de baixo impacte ambiental), os regenerativos são concebidos para reverterem os danos ecológicos e terem um impacte ambiental positivo, o que leva a que o edificado seja tratado como parte de um sistema alargado (ecossistema), contribuindo para produzir e partilhar água, oxigénio, energia, alimentos, etc. (Gattupalli, 2023).

Enquanto algumas adaptações serão mais difíceis de implementar, outras são suscetíveis de aplicação imediata, tais como construir com materiais sequestradores de carbono (madeira, cânhamo, cortiça, palha, etc.) e outros processos mais eficientes baseados na natureza, já disponíveis e relacionados com os diversos aspetos do ambiente edificado (p.e., sistemas de aquecimento por radiação infravermelha).

A nível urbanístico, precisamos de reequacionar a ideia de local, de sítio, que abarque não somente a questão arquitetónica, técnica e cultural mas também os aspetos climáticos, ecológicos, hidrológicos e climáticos, o que ainda não se encontra devidamente interiorizado nos projetistas, nem refletido nos sistemas de avaliação de sustentabilidade de edifícios com maior notoriedade (Pawlyn, 2019).

Como exemplo de aproximação à construção regenerativa, temos o caso do il Bosco Verticale, um conjunto de duas torres, de 80 e 112 m de altura, em Milão (Itália), tendo a primeira delas sido inaugurada em outubro de 2014, da autoria do arquiteto Stefano Boeri (Ilustração 51).

Trata-se da aplicação do conceito de floresta vertical, que usa as plantas (*greenery*) como material de fachada, possibilitando a existência de um microclima, em que as condições termohigrométricas, a qualidade do ar e a luz solar são suscetíveis de ser controladas, independentemente dos equipamentos e das tecnologias, enquanto promove em simultâneo a biodiversidade (flora e fauna), em plena cidade (ArchDaily, 2015; Carlin, 2016; Lubell, 2020):

> Una selezione di quasi 1000 alberi e 15000 tra arbusti, piante perenni e rampicanti studiata appositamente per creare un piccolo mondo sulle grandi terrazze che caratterizzano le due torri verdi. I vantaggi portati dalla vegetazione sono diversi, dalla creazione di un microclima capace di generare un ambiente favorevole allo sviluppo della fauna locale, al controllo climatico che garantisce una minor escursione termica, dall'assorbimento di CO2 che riduce l'inquinamento al riparo dal soleggiamento in estate. Il punto di forza del progetto consiste proprio nel creare un binomio tra natura e architettura che permette all'edificio di avere il controllo sul clima e alla natura di crearsi nuovi spazi all'interno del denso sistema urbano (Carlin, 2016).

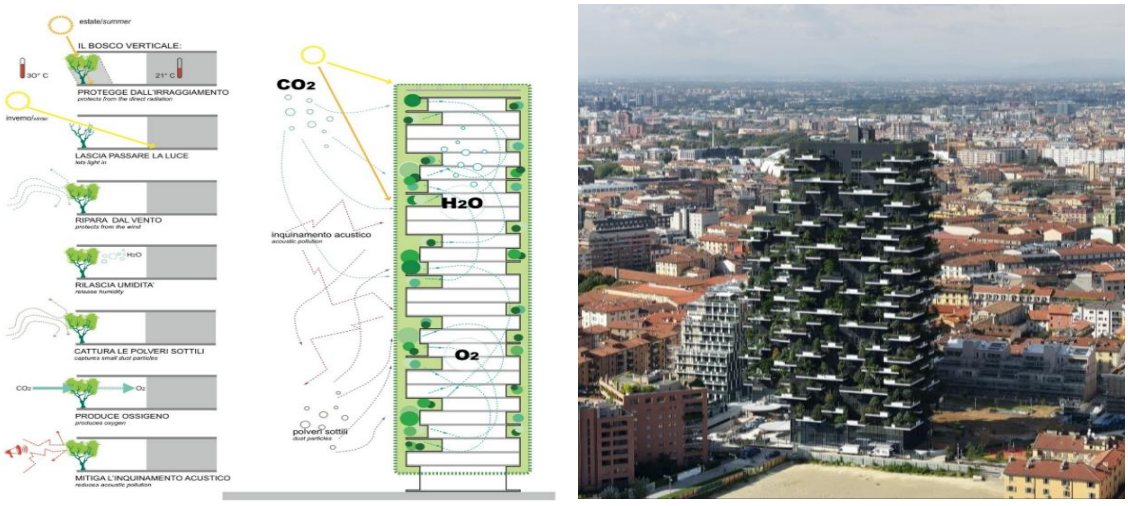


Ilustração 51 – il Bosco Verticale em Milão, Itália: um exemplo de inspiração biofílica. ([Adaptado de:] ArchDaily, 2015)



Ilustração 52 – *Render* de uma suite num apartamento do il Bosco Verticale. (Lubell, 2020)

O Bosque Vertical constituiu um marco na implementação da construção sustentável, tendo posteriormente inspirado vários edifícios, de vários autores e em várias latitudes, projetados ou construídos com princípios biofílicos e regenerativos (Ilustração 52), como é o caso de Singapura, que regulamentou no sentido em que todos os novos edifícios devem ser de inspiração biofílica, através da construção de jardins elevados e de coberturas e fachadas verdes, comparticipando até 50% em obras de reabilitação com os mesmos propósitos (Lubell, 2020).

Através do **Urban Forestry manifesto**, Boeri (2023) convida todos os *stakeholders (*arquitetos, urbanistas, promotores, cientistas, políticos, etc.) a multiplicar a presença de florestas e de árvores nas cidades, através de *florestas* verticais (edifícios) e de outras estratégias urbanísticas (Lubell, 2020).

Não se pode referir a construção regenerativa sem mencionar Bill Reed, um arquiteto que emula a necessidade de uma alteração de paradigma na direção de um modelo integrativo e regenerativo na construção. De acordo com Reed, a sustentabilidade é maioritariamente entendida pelos como "{…] primarily an exercise in efficiency" (Reed, 2007, p. 674), ou seja, a busca por uma redução e mitigação dos danos causados pela excessiva utilização dos recursos, em vez de criar benefício, o que só pode acontecer com o entendimento do sistema do local onde se insere a construção.

Neste contexto, o principal papel dos projetistas é o de criar um sistema integral (não-fragmentado) de múltiplas relações benéficas, visando o *regenerative design* (Reed, 2007, p. 674, 677; Kibert, 2008, pp. 123, 124; Augusto, 2011, pp. 65, 66):

> This is a design process that engages and focuses on the evolution of the whole of the system of which we are part. Logically, our place – community, watershed and bioregion – is the sphere in which we can participate. By engaging all the key stakeholders and processes of the place – humans, other biotic systems, earth systems, and the consciousness that connects them – the design process builds the capability of people and the 'more than human' participants to engage in continuous and healthy relationship through co-evolution. The design process draws from and supports continuous learning through feedback, reflection and dialogue, so that all aspects of the system are an integral part of the process of life in that place. Such processes tap into the consciousness and spirit of the people engaged in a place, the only way to sustain sustainability (Reed, 2007, p. 677).

Para além de os sistemas de avaliação de sustentabilidade de edifícios estarem ainda maioritariamente orientados para a eficiência dos recursos e para a redução do dano (Kibert, 2008, p. 123; Reed, 2007, p. 674), também os modelos de negócio do setor se pautam por esse paradigma, em vez de uma abordagem regenerativa (mais completa e holística), que reconheça a interdependência entre os ecossistemas naturais e sociais e que contribua para um impacto positivo no ambiente (Pavlova, 2023).

Tendo em conta estes dois aspetos, o International Living Building Institute desenvolveu um programa de certificação de edifícios, o Living Building Challenge (LBC), orientado para o conceito regenerativo (Ilustração 53), constituindo uma estrutura para a conceção, construção e as relações simbióticas entre as pessoas e a natureza, num mundo cada vez mais urbanizado (International Living Future Institute, 2019, p. 4).

Segundo esta certificação, os *Living Buildings* caracterizam-se por 1. Serem edifícios regenerativos que conectam os seus usuários com a luz, o ar, a comida, a natureza, e com a comunidade; 2. Serem autossuficientes e operarem dentro dos limites dos recursos naturais e locais, 3. Criarem um impacte positivo nos sistemas humanos e naturais, que com eles interagem (International Living Future Institute, 2022).

O protocolo consiste na certificação de sete categorias de desempenho ou pétalas: 1. Local; 2. Água; 3. Energia; 4. Saúde + Felicidade; 5. Materiais; 6. Equidade e 7. Beleza subdivididas em vinte imperativos aplicáveis a quase todos os projetos e tipos de edifícios, de construção nova ou reabilitação, de qualquer escala e em qualquer localização (International Living Future Institute, 2019, p. 15; Figliola, 2016, p. 86).

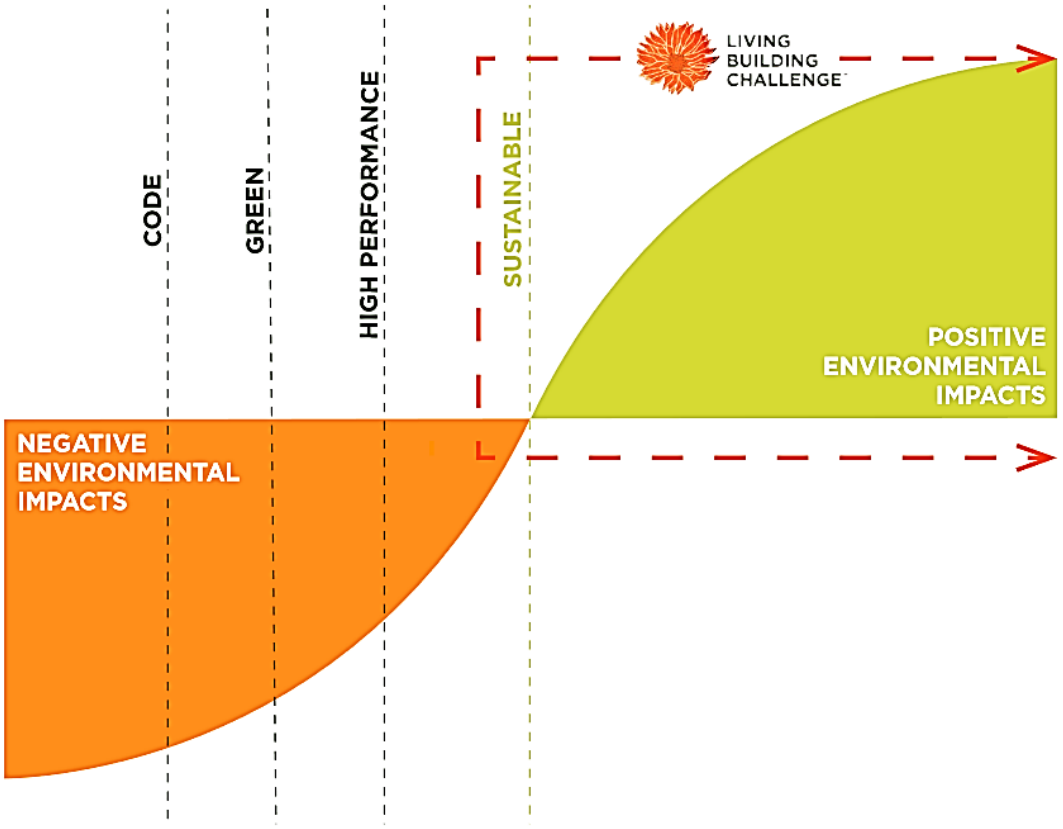


Ilustração 53 – Diversos níveis de construção sustentável e regenerativa. (International Living Future Institute, 2019, p. 12)

O grande fator diferenciador relativamente a outros sistemas de avaliação de sustentabilidade é que se trata de uma certificação *ex-post* , com base no desempenho real do desempenho energético e ambiental, e no alargamento do âmbito dos critérios, trazendo "[…] o homem e a comunidade de volta ao centro do processo e do projeto" (Figliola, 2016, p. 87).

Para poderem ser certificados, e ao contrário de outros sistemas baseados em modelos previsionais, os projetos devem estar operacionais durante 12 meses consecutivos antes da auditoria, assim como responderem satisfatoriamente a todos os requisitos (International Living Future Institute, 2019, p. 13).

Segundo Figliola (2016), o protocolo LBC tem como objetivo a regeneração de edifícios e cidades, e a recuperação de uma condição humanística do projeto arquitetónico (Ilustração 54):

> […] al fine di definire un nuovo paradigma che interessi tutte le fasi del progetto in relazione a un diverso concetto di so stenibilità. Davanti a problematiche sempre più profonde e interdisciplinari, l'architettura si trova ad affrontare una "sfida" sempre più ardua, al fine di individuare soluzioni in grado di ridurre l'impatto dell'uomo sull'ambiente

costruito, e allo stesso tempo restituire un valore culturale ed educativo al progetto architettonico (Figliola, 2016, p. 83).

The Living Building Challenge is composed of 20 Imperatives grouped into seven petals. Some Imperatives are not required for all Typologies.

PETAL	IMPERATIVE	TYPOLOGY: New Building	Existing Building	Interior	Landscape + Infrastructure
PLACE	01 Ecology of Place	■	▨		■
	02 Urban Agriculture	■	■		
	03 Habitat Exchange	■	■	■	■
	04 Human Scaled Living	■	▨	▨	
WATER	05 Responsible Water Use	■	■	■	■
	06 Net Positive Water	■	■		■
ENERGY	07 Energy + Carbon Reduction	■	■	■	■
	08 Net Positive Carbon	■	■	■	■
HEALTH + HAPPINESS	09 Healthy Interior Environment	■	■	■	
	10 Healthy Interior Performance	■	■	■	
	11 Access to Nature	■	■	■	
MATERIALS	12 Responsible Materials	■	■	■	■
	13 Red List	■	■	■	■
	14 Responsible Sourcing	■	■	■	■
	15 Living Economy Sourcing	■	■	■	■
	16 Net Positive Waste	■	■	■	■
EQUITY	17 Universal Access	■	▨	▨	▨
	18 Inclusion	■	■	■	■
BEAUTY	19 Beauty + Biophilia	■	■	■	■
	20 Education + Inspiration	■	■	■	■

Ilustração 54 – Quadro sinóptico dos requisitos LBC 4.0. (International Living Future Institute, 2019, p. 19)

2.3.1.2. CONSTRUÇÃO CIRCULAR: O DESAFIO

A aplicação dos princípios da economia circular ao setor da construção oferece um leque de oportunidades técnicas e económicas a serem exploradas, no sentido de contribuírem positivamente para a restauração e regeneração do ambiente construído, e não apenas, como uma ação no sentido da minimização dos resíduos e da promoção da reciclagem (Adams *et al.*, 2017, p. 1).

Neste sentido, a EMF (2019) aponta resumidamente para três características distintivas da relação entre a economia circular e o ambiente construído: 1. Conceção tendencialmente sem resíduos e minimizando a poluição; 2. Manter os edifícios, produtos e materiais em utilização e reutilização, no máximo de tempo e de valor; 3. Regeneração dos sistemas naturais através de energia e de materiais renováveis e não

tóxicos (Ellen MacArthur Foundation e Material Economics, 2019, pp. 19; UK Green Building Council, 2019, p. 8).

Os edifícios de todas as tipologias devem ser concebidos tendo em vista a alteração das necessidades dos utentes ao longo do tempo (adaptabilidade), mas também a recuperação expedita dos seus materiais ou componentes (desconstrução e demolição seletiva), de modo que possam ser reutilizados, remanufaturados ou compostados, em lugar da utilização de matérias-primas virgens, associadas ao consumo de recursos naturais não-renováveis e a diversas formas de poluição, a par com a extensão do tempo de vida útil (Cheshire, 2016, p. 31; Adams *et al.*, 2017, p. 8; (Amado, 2025, p. 18).

No entanto, ainda não existe uma definição comumente aceite de construção circular ou de economia circular no setor da construção, e o conceito abarca uma série de princípios, estratégias e atributos, relativamente aos quais o potencial de circularidade é bastante diverso (Eberhardt *et al.*, 2021, p. 2).

Segundo Cheshire (2016), os cinco princípios orientadores da conceção para a construção circular são os seguintes: 1. Construção em camadas 2. Minimização de Resíduos 3. Adaptabilidade; 4. Desconstrução; 5. Seleção criteriosa de materiais (Cheshire, 2016, p. 33). Numa perspetiva mais sistémica, Adams *et al.* (2017) identificaram os aspetos relevantes (*key aspects*) da economia circular ao longo do ciclo de vida de um edifício (Tabela 11).

De salientar que, para atingir um cada vez maior grau de circularidade na construção, torna-se fundamental introduzir e implementar alterações técnicas (e de modelo de negócios) ao nível dos materiais, produtos e edifícios (Tabela 11), sendo evidente que existe uma falha (*lack of knowledge*) na forma como estes foram projetados ou concebidos, assim como ao seu desempenho ambiental (Adams *et al.*, 2017, p. 8; Nußholz *et al.*, 2023, p. 2).

Tal manifesta-se expressamente no atual parque edificado, que deixa antever um problema devido ao expectável acréscimo de RCDs a médio e longo prazo, entre outras questões. De igual modo, a atual tendência de construir edifícios termicamente eficientes, com tecnologias inteligentes, bem como a utilização de determinados métodos construtivos, pode dificultar, ou mesmo inviabilizar, a reutilização ou a recuperação de produtos ou componentes (Adams *et al.*, 2017, p. 8).

Tabela 11 – Aspetos da economia circular ao longo do ciclo de vida de um edifício.

Life cycle stage	Circular economy aspect
Design	DfD Design for adaptability and flexibility Design for standardisation Design out waste Design in modularity Specify reclaimed materials Specify recycled materials
Manufacture and supply	Eco-design principles Use less materials/optimise material use Use less hazardous materials Increase the lifespan Design for product disassembly Design for product standardisation Use secondary materials Take-back schemes Reverse logistics
Construction	Minimise waste Procure reused materials Procure recycled materials Off-site construction
In use and refurbishment	Minimise waste Minimal maintenance Easy repair and upgrade Adaptability Flexibility
End of life	Deconstruction Selective demolition Reuse of products and components Closed-loop recycling Open-loop recycling

Fonte: Adams *et al.* (2017, p. 3)

Neste contexto torna-se relevante salientar a importância de os edifícios serem encarados como um conjunto de camadas (*layers*) de diferentes materiais, funções e durabilidade, e que, por esse motivo, deverão ser projetados, de maneira que as partes possam ser intervencionadas (remodeladas, reabilitadas ou demolidas), com o mínimo de interferência nas restantes.

Este modelo, desenvolvido por Stewart Brand (1994), enumera e define as seis partes principais (camadas) constituintes de um edifício (Ilustração 55): *Site, Structure, Skin, Services, Space Plan e Stuff* (Schut, Crielaard e Mesman, 2015, p. 46; Cheshire, 2016, p. 36; UK Green Building Council, 2019, p. 17).

> The Site is the geographical setting; the Structure is the load-bearing elements, such as the foundation and skeleton; the Skin is the exterior surface, such as the façade; the Services are the circulatory and nervous systems of a building, such as the heating plant, wiring and plumbing; the Space Plan includes walls, flooring and ceilings; and Stuff includes lamps, furniture, appliances and ICT (Cheshire, 2016, p. 36).

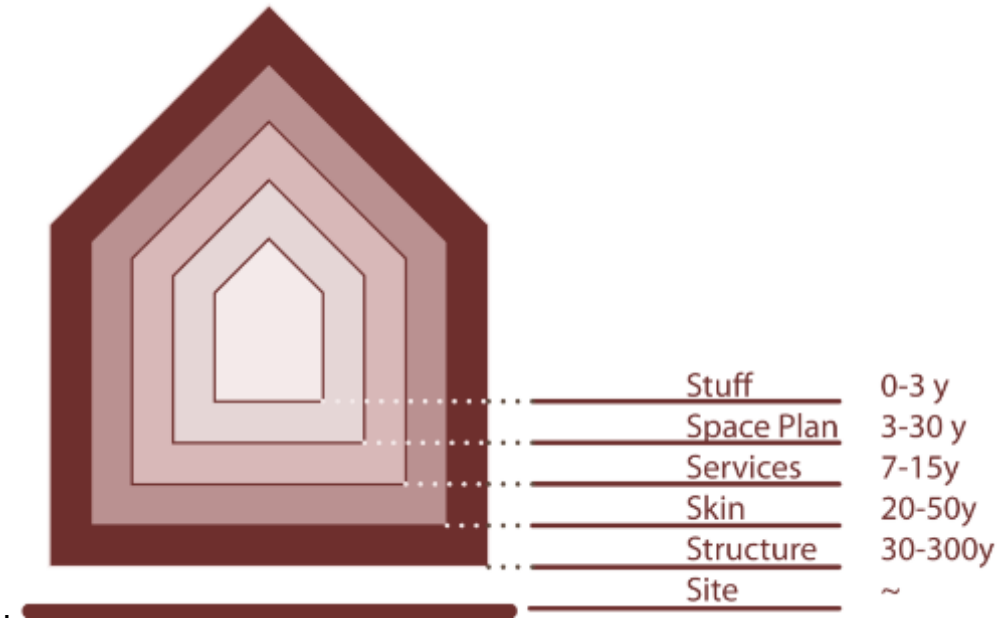


Ilustração 55 – As seis camadas (*layers*) de um edifício e respetivo tempo de vida útil. (Schut, Crielaard e Mesman, 2015, p. 46)

Um dos aspetos com mais relevância, é o facto de a construção circular ser um fator crucial para alcançar os objetivos de descarbonização (redução, eliminação e/ou remoção dos GEE), tendo em conta o peso que o setor AEC tem na economia global: "With precious little time left to prevent irreversible changes to the climate, low carbon and circular building strategies need to quickly become common practice in the building industry." (Nußholz *et al.*, 2023, p.1, 2).

Na mesma linha, Brannen (2024) citando o UN Environment Programme (2022) aponta para a seguinte contestação: "The buildings and construction sector is not in on track to achieve decarbonization by 2050. And the gap between the actual climate performance of the sector and the decarbonization pathway is widening." (Brannen, 2024, p. 3).

Tendo em conta o explanando anteriormente, podemos resumidamente considerar a existência de quatro tipos ou categorias de estratégias de economia circular, também suscetíveis de aplicação ao meio edificado (Ilustração 56): 1. Utilizar menos recursos por produto (*Narrow*); 2. Manter os produtos em utilização durante mais tempo S*slow*); 3. Reutilizar e reciclar (*Close*); 4. Utilizar recursos renováveis e regenerar o ambiente (*Regenerate*) (Nußholz *et al.*, 2023, p. 2).



Ilustração 56 – As quatro categorias de estratégias da EC e o modelo de Brand. ([Adaptado a partir de:] Nußholz *et al.*, 2023, p. 6)

Nos últimos anos, vários estudos têm abordado a aplicação dos princípios da EC ao ambiente edificado, particularmente aos edifícios. Essas estratégias de construção circular, intersectam as várias fases do ciclo de vida das construções, com a diferente tipologia da intervenção: obra nova, renovação/reabilitação e demolição (Ilustração 57).

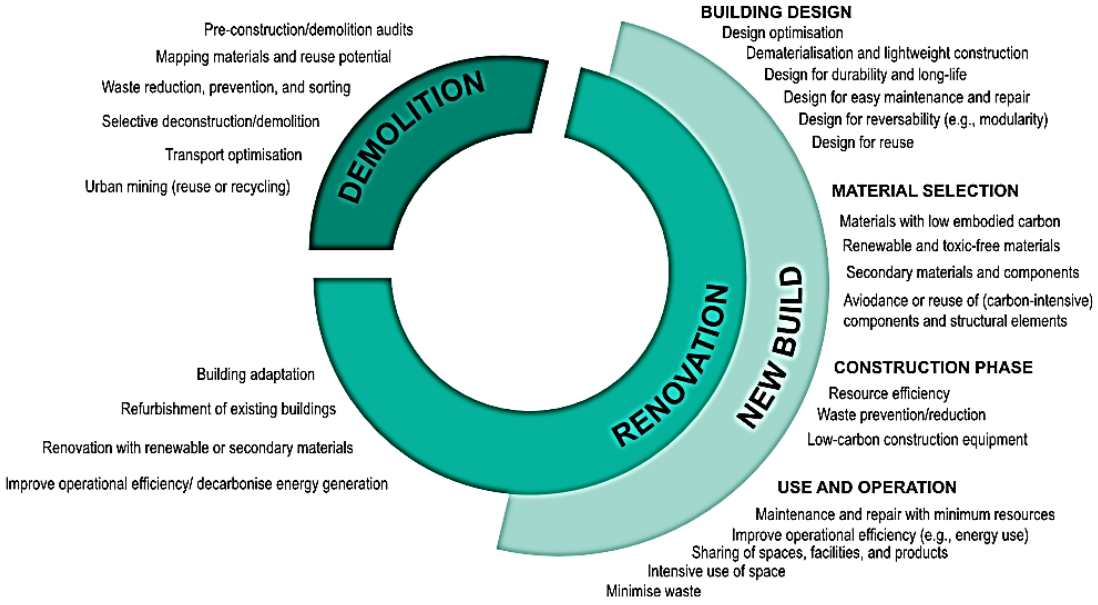


Ilustração 57 – Estratégias de construção circular (Nußholz *et al.*, 2023, p. 2)

No entanto, há que ter presente as dificuldades e obstáculos de vária ordem (funcional, estética, financeira, legal, etc.) presentes no desenvolvimento, construção e gestão de edifícios inovadores, mais circulares e sustentáveis: "[…] buildings will never be fully "circular" but will be circular to a varying degree." (Nußholz *et al.*, 2023, p. 2).

Nußholz *et al.* (2013) levaram a efeito um estudo em que compilaram informação referente a sessenta e cinco casos de construção circular, em dezoito países europeus, incluindo Portugal, abrangendo obra nova, renovação e demolição, e onde se relaciona a solução circular derivada da aplicação dos princípios da economia circular (*Narrow,*

Slow, Close, Regenerate) com o seu potencial de descarbonização e com as camadas de Brand.

Os três casos portugueses correspondem às regiões norte (L-R2 Villa Elvira), centro (L-R3 Pátio do Beirão) e sul (L-R4 Pátio do Paulino), com intervenção baseada nas estratégias circulares (*Narrow +Slow*) e nas camadas *Skin* (vermelho), *Structure* (roxo) e *Services* (azul), respetivamente: reabilitação, reforço estrutural e renovação dos sistemas de energia e das instalações técnicas (Tabela 12).

Tabela 12 – Exemplos de aplicação de estratégias circulares de renovação em Portugal e o respetivo potencial de descarbonização.

No	Name (Country)	Circular solutions analysed	Linear solution for comparison	CE principles	Level of application	Decarbonisation potential	Reduction percentage
L-R2	Villa Elvira (PT)	Rehabilitation, structural reinforcement, and energy renovation and service upgrade	Initial state of building			17 t CO_2/year (for building after renovation)	-53%
L-R3	Pátio do Beirão (PT)	Rehabilitation, structural reinforcement, and energy renovation and service upgrade	Initial state of building			12 t CO_2/year (for building after renovation)	-40%
L-R4	Pátio do Paulino (PT)	Rehabilitation, structural reinforcement, and energy renovation and service upgrade	Initial state of building			14 t CO_2/year (for building after renovation)	-45%

Fonte: [Adaptado a partir de:] Nußholz *et al.*(2023, p. 8)

Como exemplo de integração destes conceitos, apresenta-se abaixo (Tabela 13), uma matriz da autoria do UK Green Building Council (2019), com as diferentes estratégias e táticas a adotar para a implementação da construção circular num determinado caso específico, tendo em conta os respetivos princípios orientadores (linhas), cruzados com as diferentes camadas construtivas (colunas), classificadas em componentes de curta-duração (0-5 e 5-10 anos – *Short life componentes)* e as de longa-duração (20-30 e 30-300 anos – *Long life components*).

De realçar o contributo que a construção circular oferece para a efetiva descarbonização do setor, assim como o papel que a pré-fabricação e a modularização desempenham nesse contexto, através da significativa redução dos resíduos, da otimização dos recursos e do aligeiramento das componentes estruturais e de revestimentos, com especial relevância para o carbono incorporado (UK Green Building Council, 2019, pp. 38, 47; Zairul, 2021, pp. 1, 10; Bron *et al.*, 2022).

O aligeiramento do peso dos materiais e dos produtos pela via da substituição e do *design*, potenciada pela utilização massiva de componentes pré-fabricadas, podem diminuir o peso-próprio dos edifícios em cerca de 20% e o respetivo carbono incorporado em 15%, até 2040 (Ilustração 58) (Bron *et al.*, 2022).

Tabela 13 – Matriz geral de conceção de um projeto de construção circular.

		Short life components		Long life components	
	Lifespan	0-5 years	5-10 years	20-30 years	30-300 years
	Example components	Internal finishes, furniture	Internal partitions, ceilings, floors, local services	Building services	Sub-structure, structure, floors, fabric
	Overall strategy	Match material to lifespan, design for disassembly and return to manufacturer	Design for reconfiguration, use modular systems	Design for maintenance, replaceability, remanufacture	Long life, loose fit Adaptable to different uses Temporary buildings designed to be relocatable
Principles and examples of application	Designing in layers	Ensure finishes allow access to services	Non-structural partitions	Services to be accessible and replaceable	Avoid interdependency of structural frame and facade
	Lean design	Inherent finishes	Exposed soffits Modular tea points	Design out systems	Lightweight structures
	Design out waste and use of reclaimed materials/ components	Remanufactured furniture; remanufactured paint	Reclaimed glass partitions	Modular systems, offsite manufacture to reduce site waste Challenge supply chain to provide remanufactured equipment	Offsite manufacture Standardised components Select grids that optimise material efficiency
	Partnership models and return to manufacturer	Lease components or arrange for return to manufacturer	Design interiors that can be reconfigured or disassembled	Leasing service arrangements for items such as lifts and lighting	Select elements that can be reused or returned to manufacturer
	Materials selection	Use biological materials that can be composted at end of life or certified products (e.g. C2C / Natureplus)	Use partitions made from bio -composites Use certified products (e.g. C2C / Natureplus)	Use plant and equipment that can be remanufactured Fabric ductwork	Structural elements with recycled content Certified facade systems
	Design for disassembly	Use furniture and fittings designed for disassembly	Dry-lay floor tiles Relocatable partitions	Equipment and distribution systems that are modular	Structure and facade that is designed with reversible mechanical fixings

Fonte: UK Green Building Council (2019, p. 20)

No entanto, o desafio colocado pela carência de habitação, resultado de situações estruturais resultantes da grande concentração da população em cidades, como é o caso de Portugal e de outros países, poderá, se se mantiver o atual paradigma construtivo, não ir ao encontro dos objetivos europeus e globais de descarbonização, uma das razões que tornam a construção circular um tema incontornável e crucial (Bron *et al.*, 2022).

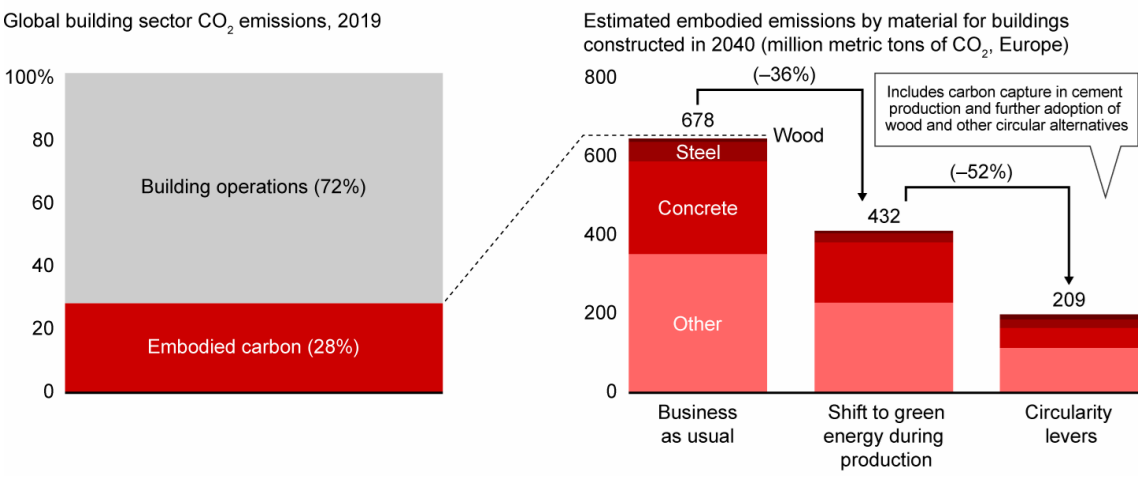


Ilustração 58 – Potencial de redução de carbono incorporado pela adoção de materiais e processos mais circulares. [Adaptado a partir de:] Bron *et al.*, 2022)

Este trabalho foca-se na inovação (novos métodos, processos e materiais), em lugar do fim de linha dos produtos (reciclagem), pois esta abordagem, que tem prevalecido até ao momento, passa muitas vezes uma imagem redutora e simplista da economia circular, sendo um obstáculo à sua plena e necessária implementação. No entanto, seria irrealista não considerar este aspeto, visto ser a realidade dominante.

Há um trabalho a fazer, desde já, por parte dos projetistas, fabricantes e construtores, no sentido da potenciação da reciclagem de materiais, produtos e sistemas construtivos (tantas vezes inviabilizada pela má conceção ou pelo manuseamento inadequado), a par das restantes soluções circulares (reutilização, desconstrução, materiais renováveis, adaptabilidade, flexibilidade, materiais renováveis, digitalização, etc.) (Amado, 2025, pp. 18, 19).

Desde já, e no âmbito do projeto europeu Horizon 2020: Building as Material Banks (BAMB), com o intuito de promover a circularidade na indústria da construção, foi lançada uma plataforma digital designada de Passaporte de Materiais (PM), que recolhe, relaciona e disponibiliza informação pertinente acerca dos materiais utilizados nos edifícios, ao longo da cadeia de valor e de forma adequada às necessidades dos diversos utilizadores (Heinrich e Lang, 2019, p. 2, 3).

Uma consequência importante é a redução dos riscos e obstáculos associados à falta de informação relevante e atempada para os prescritores e o mercado, como a composição de um determinado produto, a sua condição atual e o histórico respetivo, a localização relativa no edifício, a possibilidade e a facilidade de desmontagem ou de

desconstrução seletiva, a existência de eventuais requisitos especiais para efeito de transporte, entre outras, permitindo uma avaliação antes de uma eventual desconstrução, e a efetiva comercialização das suas partes ou componentes (Ilustração 59) (Heinrich e Lang, 2019, p. 26).

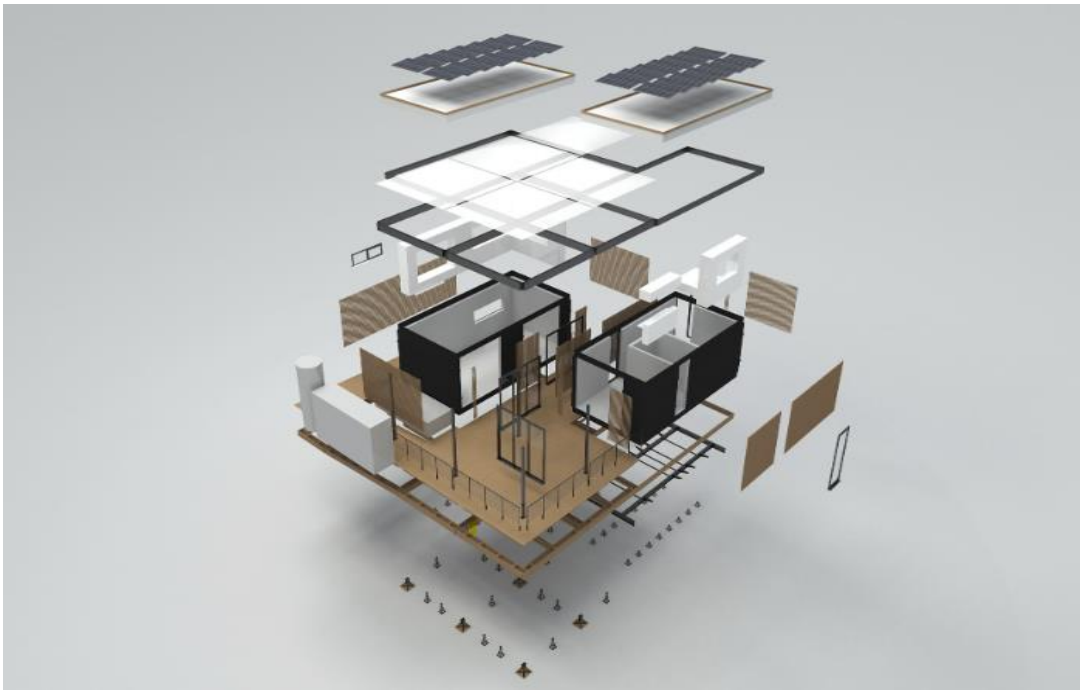


Ilustração 59 – Estratégias de desconstrução de componentes de edifícios. (Heinrich e Lang, 2019, p. 22)

A par do desenvolvimento dos passaportes de materiais, também o Protocolo para a Conceção de Edifícios Reversíveis ou Reversible Building Design Protocol (RBDP) é uma das principais soluções inovadoras com vista à transição para a construção circular (Ilustração 60); dois instrumentos que permitem aos projetistas e decisores serem informados acerca da reversibilidade técnica e espacial das soluções ainda durante a fase conceptual (Debacker *et al.*, 2017, pp. 114, 116):

> The Design Protocol for dynamic & circular buildings informs designers and decision makers about the transformation capacity and reuse potential of the design and the impacts of design solutions during the conceptual design phase. […] Result of conventional architectural design is design of one spatial configuration supported by design of technical systems to support safe and comfortable use of space and esthetic appearance of architectural language. Reversible buildings consider not only one spatial organization but multiple options for use of space. Reversible building considers not only one specific purpose of used materials but considers multiple options for use of materials in the future. This means that the framework of reversible building design integrates additional dimensions to architectural design resulting into a dynamic architecture which considers spatial dynamics, technical dynamics and ultimately dynamic esthetics (Durmisevic, 2019, pp. 22, 23).

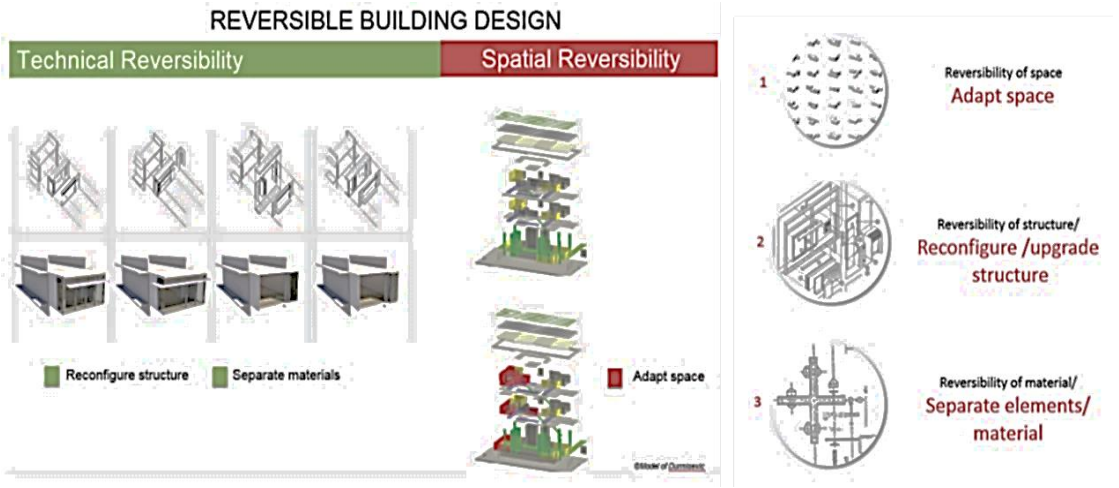


Ilustração 60 – As duas categorias de reversibilidade e as três dimensões de transformação. [Adaptado a partir de:] Durmisevic, 2019, pp. 38, 39)

A partir dos conceitos-base (desassemblagem ou desconstrução, adaptabilidade e reutilização), podemos definir duas categorias de reversibilidade: a espacial e a técnica, que, por sua vez, darão origem às três dimensões de transformação (espacial, estrutural e material).

Na categoria espacial, o edifício pode ser eficientemente transformado de modo a ir ao encontro de outros requisitos espaciais, enquanto a reversibilidade técnica irá permitir que os componentes sejam reabilitados, desmontados, desconstruídos, reutilizados, reciclados ou levados a compostagem (Durmisevic, 2019, pp. 22, 23).

Wuni (2022) levou a efeito um estudo de revisão que tinha como objetivo mapear os benefícios da construção circular, classificados de acordo com a seguinte taxonomia: ambientais, económicos, sociais, empresariais, tecnológicos e legislativos.

A pesquisa revelou oitenta e seis eventuais benefícios reduzidos a cinquenta e cinco, após realizada a respetiva análise de Pareto para cada uma das seis categorias, assim divididos: [(15 ambientais + 13 económicos + 10 sociais) + (7 empresariais + 4 tecnológicos + 6 legislativos)] (Wuni, 2022, p. 528).

A Tabela 14 apresenta os cinquenta e cinco benefícios mais citados e estatisticamente validados, para cada uma das seis categorias anteriormente referidas: 1. *Environmental Benefits* (ENB1 – ENB15); 2. *Economic Benefits* (ECB1 – ECB13); 3. *Social Benefits* (SOB1 – SOB13); 4. *Technological Benefits* (TEB1 – TEB4); 5. *Business Benefits* (BUB1 – BUB7); 7. *Legislative Benefits* (LEB1 – LEB6).

Tabela 14 –Os 55 benefícios mais reconhecidos da construção circular.



Fonte: Wuni (2022, p. 537)

De salientar que, ao adotar esta taxonomia, se constata que a construção circular oferece benefícios ambientais, económicos e sociais que vão além da tripla linha de base da sustentabilidade. Alguns desses benefícios não se enquadram nestas três

dimensões clássicas, resultando na proposta de três novas dimensões: empresarial, tecnológica e legislativa (Wuni, 2022, p. 531).

2.3.1.3. SISTEMAS DE AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DE EDIFÍCIOS

Uma das formas de valorizar, reconhecer e comunicar as boas práticas de construção sustentável, são os designados sistemas de avaliação de sustentabilidade de edifícios (SASE), que integram, em diferentes graus, os princípios de sustentabilidade e da ACV no projeto, na obra e nas operações.

Á semelhança de outras matérias, e, como já anteriormente assinalado, os princípios e a enumeração de vários SASE foram já detalhados na dissertação de mestrado do autor (Augusto, 2011, pp. 122–150), pelo que optámos não ser redundante, e elaborar o presente texto a partir desse nível.

O desenvolvimento de sistemas de certificação e de rotulagem ecológica, nomeadamente do tipo I (Ecolabel) e tipo III (EPD e PEF), representam uma etapa importante no sentido da avaliação da sustentabilidade, indo além da mera avaliação ambiental (sistemas de 1ª geração), possibilitando uma abordagem integrada do edifício ao combinar diversos aspetos da construção sustentável: da eficiência energética e hídrica aos aspetos económicos e sociais (Ilustração 61) (Ebert, Essig e Hauser, 2011, p. 24).

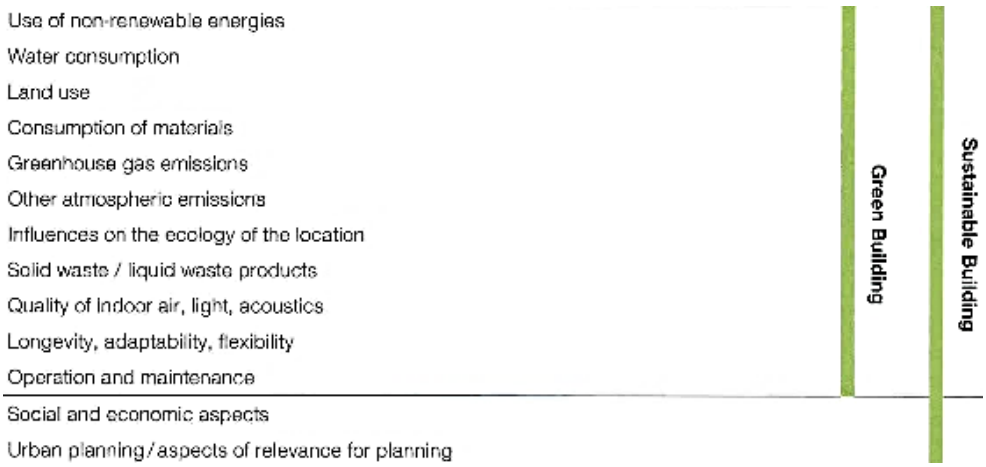


Ilustração 61 – Âmbito da avaliação ambiental *versus* avaliação de sustentabilidade de edifícios. (Ebert, Essig e Hauser, 2011, p. 27)

Até aos anos noventa do século XX, altura em que os primeiros sistemas de avaliação e certificação de sustentabilidade em edifícios foram lançados (p.e., BREEAM (UK), 1990; HQE (França), 1996; LEED (EUA), 1998), os edifícios ambientalmente orientados

eram concebidos por equipas de arquitetos e engenheiros , que se baseavam na sua própria interpretação do que seria uma construção eficiente e de baixo impacte ambiental, sem qualquer referência que permitisse avaliar e comparar edifícios com uma conceção mais sustentável (Ebert, Essig e Hauser, 2011, p. 26; Kibert, 2008, p. 55),

Ao decidir, desde o início do projeto, pela implementação de um dos sistemas de certificação de edifícios, poderão ser alcançadas as seguintes vantagens:1. Reconhecimento e notoriedade internacional; 2. Valorização dos ativos imobiliários; 3. Eficiência energética e hídrica; 4. Predominância de energias renováveis; 5. Conservação de materiais e recursos; 6. Conforto térmico, acústico e visual; 7. Qualidade ambiental interior 8. Seleção de materiais sustentáveis e saudáveis 9. Economia em custos operacionais e de manutenção; 10. Inovação em tecnologias e processos (Augusto, 2017, p. 43).

De facto, o crescente interesse pelo desenvolvimento sustentável e pela sustentabilidade, leva a que o seu reconhecimento público feito através de uma metodologia de avaliação, e a sua efetiva comunicação, seja um fator ao qual o mercado é cada vez mais sensível. A sua omissão ou incorreta aplicação poderá acarretar riscos financeiros ou de reputação para os investidores e promotores imobiliários (König *et al.*, 2010, p. 96; Atkinson, Yates e Wyatt, 2009, p. 24).

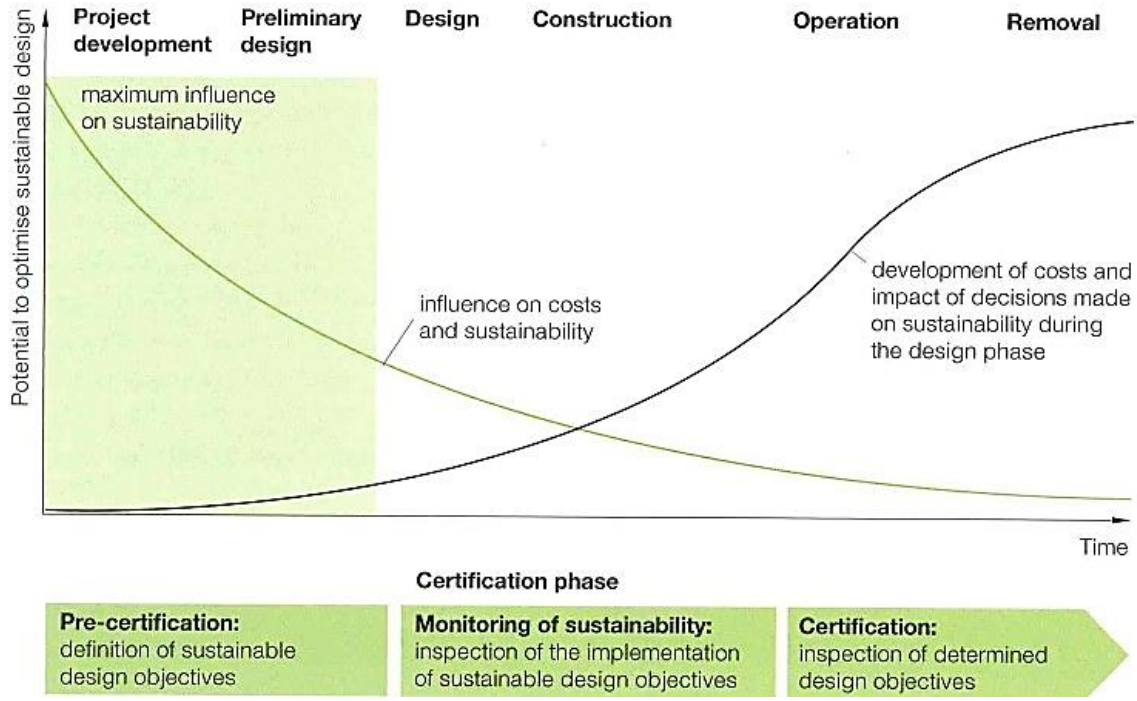


Ilustração 62 – Influência da adoção atempada da certificação nos custos e na sustentabilidade do projeto. (Ebert, Essig e Hauser, 2011, p. 80)

Em relação aos sistemas de avaliação, haverá ainda a acrescentar que, tratando-se de instrumentos voluntários, o reconhecimento do mercado é essencial. Como princípio geral, pode-se afirmar que, quanto mais alta for a sua classificação (*score*), tanto melhor será o seu desempenho e o consequente valor de mercado, associado, pelo menos, a um menor custo de operações e a um ambiente interior mais saudável (Ilustração 62) (Kibert, 2008, p. 55).

Neste contexto, Goleman (2009) refere que o conceito de transformação, com base no mercado, é "[…] mais poderoso do que a imposição de qualquer tipo de regulamento" (Goleman, 2009, p. 162) (Ilustração 63).

> Sustainable building certifications – also known as green building rating tools – are used to assess and recognise buildings which meet certain sustainability requirements or standards. Building certifications recognise and reward companies and organisations who build and operate greener buildings, thereby encouraging and incentivising them to push the boundaries on sustainability. They kick-start the market by setting standards that in turn elevate the ambition of government building codes and regulation, workforce training, and corporate strategies (World Green Building Council, 2023).

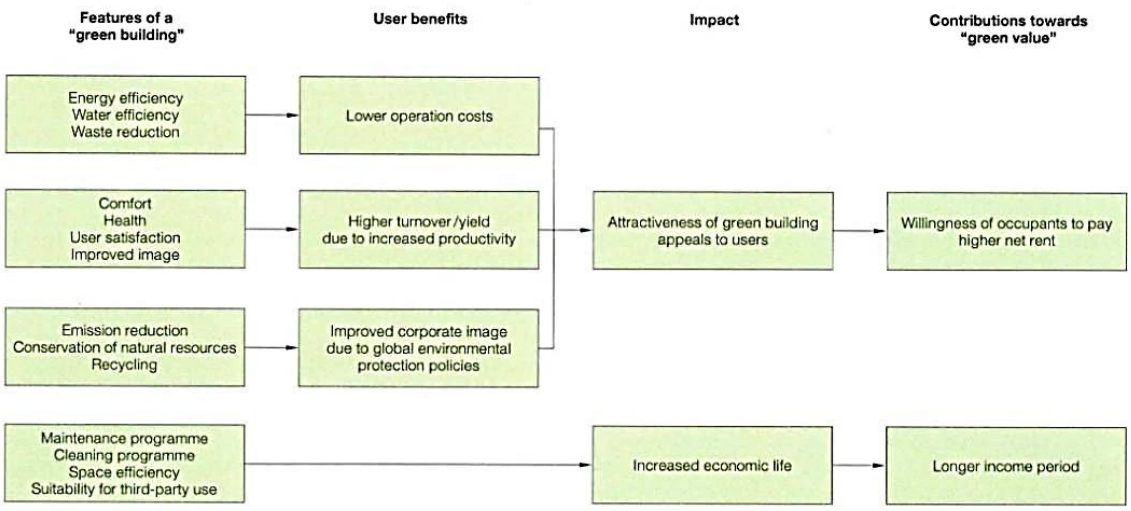


Ilustração 63 – Impacto da certificação de avaliação de sustentabilidade no valor do imobiliário. (Ebert, Essig e Hauser, 2011, p. 106)

Da extensa gama de sistemas e certificações voluntárias existentes, ressalta a necessidade de acesso a dados e informação credível, e, em relação aos quais, os passaportes de materiais são, entre outras, uma fonte fidedigna (Heinrich e Lang, 2019, p. 40).

Presentemente, existem no mercado vários sistemas voluntários de certificação de sustentabilidade de edifícios, diferindo as suas características de acordo com os diversos contextos geográficos e legislativos, privilegiando diferentes abordagens e

pontos focais (Ilustração 64) (Heinrich e Lang, 2019, p. 43; Poggi e Amado, 2012, p. 1, 2).

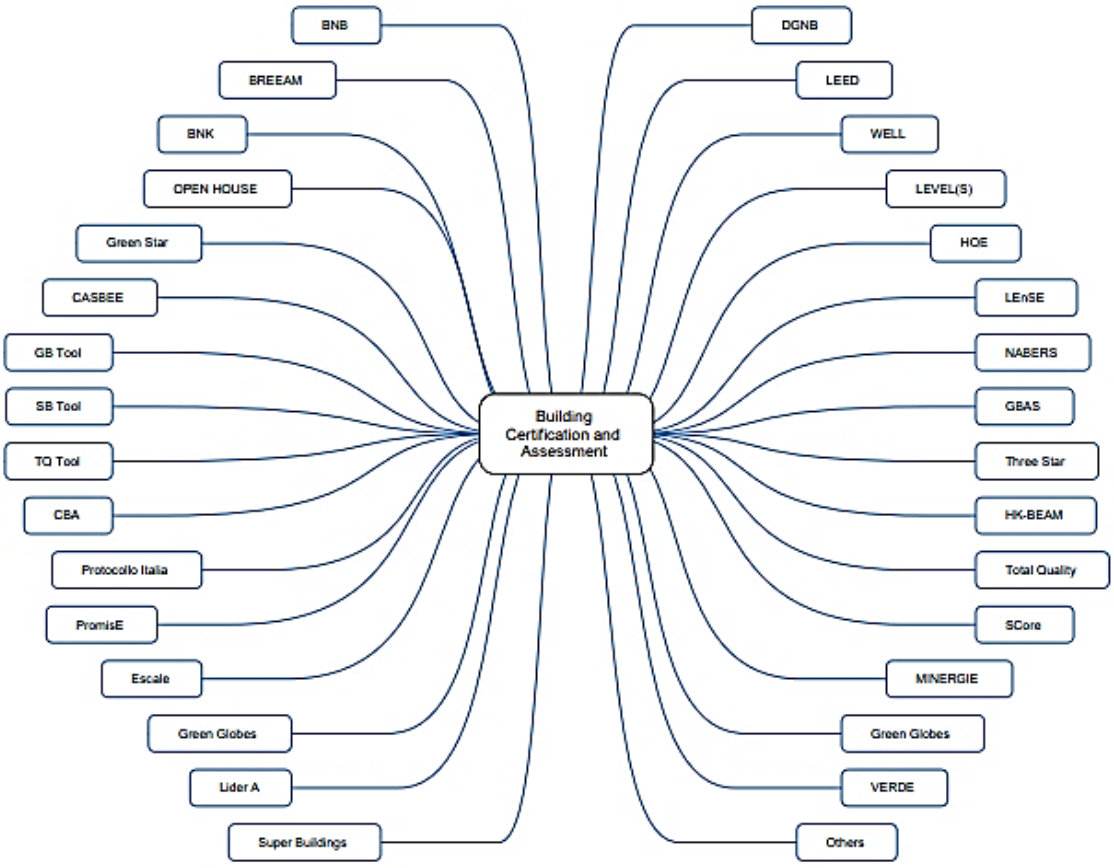


Ilustração 64 – Exemplos de sistemas de certificação de sustentabilidade de edifícios. (Heinrich e Lang, 2019, p. 43)

Em Portugal, para além dos *players* internacionais de maior notoriedade – BREEAM e LEED – têm posição no mercado português os sistemas LiderA, SBtoolPT e, mais recentemente, Domus Natura.

De relevante importância é a aproximação à economia circular por parte da última geração de sistemas de certificação de sustentabilidade de edifícios. A título de exemplo, iremos fazer uma breve alusão a três situações: um sistema internacional (BREEAM), um sistema nacional (LiderA) e um sistema especialista de avaliação da circularidade em edifícios: Circular Building Asssessment (CBA).

O BREEAM In-Use (BIU) Version 6 (2020) introduz novos aspetos, com enfoque na resiliência às alterações climáticas, no valor social e nos princípios da economia circular, estes últimos englobados na categoria *Resources* que substitui *Materials* e *Waste* (Tabela 15) (Luker, 2020).

No entanto, a montante é fundamental definir os critérios de circularidade. O conceito de edifício circular, assim como os objetivos principais e que constam na nova versão, foram inspirados no documento neerlandês **Circular Construction Economy Transition Agenda** (Circular Construction Economy, 2018, p. 10; Vos, Oostra e Oppen, 2020, p. 8), e cuja definição é a seguinte (Kubbinga *et al.*, 2018, p. 11):

> A building that is developed, used and reused without unnecessary resource depletion, environmental pollution and ecosystem degradation. It is constructed in an economically responsible way and contributes to the wellbeing of people and the biosphere. Here and there, now and later. Technical elements are demountable and reusable, and biological elements can also be brought back into the biological cycle (Kubbinga *et al.*, 2018, pp. 11, 12).

Tabela 15 - As categorias ambientais consideradas no BIU Version 6.

Environmental category	Part 1		Part 2	
	2015	V6	2015	V6
Management	0	0	15%	11%
Health and Wellbeing	17%	20%	15%	17%
Energy	26.5%	25%	31.5%	27%
Transport	11.5%	5%	0	0
Water	8%	11%	5.5%	9%
Materials	8.5%	N/A	7.5%	N/A
Resources	N/A	13%	N/A	11%
Waste	5%	N/A	0	N/A
Resilience	N/A	13%	N/A	11%
Land use and ecology	9.5%	4%	12.5%	7%
Pollution	14%	9%	13%	7%
Total	100%	100%	100%	100%
Exemplary (additional)	n/a	10%	n/a	9%

Fonte: [Adaptado a partir de:] Luker (2020)

O sistema promove quatro estratégias de conceção (*Reduce –Ssynergise –Supply – Manage*) aplicadas a cada uma das sete áreas de impacte, onde os materiais, energia e água representam áreas-chave (*key-impact areas)* para a efetivação da construção circular (Kubbinga *et al.*, 2018, p. 14).

De especial interesse para este trabalho, o caso dos materiais (categoria de impacte 12), com relevo para "M3 - Circular materials", nomeadamente, a recomendação da utilização de materiais renováveis ("10. Maximize use of renewable materials") (Tabela 16).

Tabela 16 – Estratégias e subestratégias de circularidade de materiais no BIU Version 6.

M1 - Optimal material use	M2 - Reutilisation of products	M3 - Circular materials	M4 - Knowledge development and sharing
1. Reduce amount of materials used 2. Design for flexibility 3. Design for resilience 4. Design for reassembly 5. Checks and balances on environmental impact (prerequisite)	6. Maximise amount of reused materials 7. Maximise amount of reused components 8. Maximise amount of reused elements 9. Future use	10. Maximise use of renewable materials 11. Minimise use of scarce/critical materials 12. Optimise environmental and social impact of materials	13. Availability/accessibility of material information

Fonte: [Adaptado a partir de:] Kubbinga *et al.* (2018, p. 15)

Também o sistema LiderA V4.0 aponta para a economia circular, principalmente em duas das suas seis vertentes: Princípio 2 – Fomentar a eficiência no uso dos recursos (P12 – Produtos e materiais de origem responsável e P13 – Durabilidade dos ambientes construídos) e no Princípio 5 – Fomentar as vivências socioeconómicas sustentáveis (P34 – Contributo para a economia circular), respetivamente (Tabela 17) (Pinheiro, 2019, p. 8).

Tabela 17 – Critérios e principais objetivos relacionados com a economia circular no LiderA V4.0.

	Área	Wi	Pré-Req.	Critério	Nº P	Objetivo	Wi
Vivências Socioeconómicas	Economia Verde (e Sustentável)	7 %	S	Baixos custos no ciclo de vida	P33	Desenvolver soluções de custo mais reduzido no ciclo de vida (desde a fase inicial até ao seu final).	5 %
				Contributo para economia circular	P34	Contribuir ou criar condições para a economia circular e as atividades locais endógenas.	1 %
				Contributo empregos ambientais	P35	Contribuir ou criar condições para os serviços e atividades mais ecológicas e/ou emprego local.	1 %
Recursos (Fluxos)	Energia	15 %	S	Desempenho Passivo	P7	Assegurar desempenho bioclimático. Melhorar o desempenho passivo do edificado.	5 %
				Sistemas energéticos	P8	Assegurar eficiência energética nos sistemas energéticos.	5 %
				Gestão do carbono	P9	Contribuir para reduzir as emissões de carbono. Utilizar energias renováveis e soluções de baixo carbono.	5 %
	Água	7 %	S	Uso ponderado de água	P10	Utilizar água de forma racional para o serviço, assegurando sistemas eficientes.	5 %
				Gestão da água local	P11	Contribuir para gerir as águas localmente.	2 %
	Materiais	7 %	S	Produtos e materiais de origem responsável	P12	Aumento da durabilidade das materiais, soluções construtivas e sistemas, nos casos que não são temporários, ao longo do seu tempo de vida.	1 %
				Durabilidade dos ambientes construídos	P13	Fomentar a utilização de materiais com bons desempenhos ambientais e outras origens responsáveis.	6 %

Fonte: [Adaptado a partir de:] LiderA (2019)

No entanto, também o Princípio 3 - Reduzir o impacte das cargas (quer em valor, quer em toxidade), especificamente o P15 – Gestão das águas residuais e o P16 – Gestão dos resíduos (P16), vão ao encontro da circularidade (Tabela 18) (Pinheiro, 2019, p. 18).

Tabela 18 – Critérios e objetivos de circularidade da gestão das águas residuais e dos resíduos no LiderA V4.0.

Gestão Das Cargas Ambientais (Emissões)	Águas Residuais	1 %	S	Gestão das águas residuais	P15	Reduzir as águas residuais, separar as águas negras e cinzentas, tratar e reaproveitar as pré-águas tratadas.	2 %
	Resíduos	3 %	S	Gestão dos resíduos	P16	Reduzir a quantidade de resíduos e criar condições para poderem ser valorizados, reutilizar, reciclar e recuperar materiais e energia (4Rs).	3 %
	Outras Emissões	3 %	S	Gestão do ruído	P17	Reduzir as fontes de ruído e gerir as emissões acústicas (localização, horários, isolamentos).	3 %
5 Critérios		2 %	S	Gestão das emissões atmosféricas	P18	Reduzir as fontes emissão atmosféricas, suas cargas e toxicidade, se possível aproveitar as suas componentes térmicas ou outras.	1 %
10 %		1 %		Outras cargas	P19	Redução do efeito de ilha de calor e de iluminação (evitar poluição radiante).	1 %

Fonte: [Adaptado a partir de:] LiderA (2019)

No contexto da construção circular (termo que não encontrámos explicitamente enunciado na Versão 4.0), parece-nos relevante mencionar Pinheiro (2019):

> Os edifícios e as atividades associadas colocam-nos entre os maiores consumidores de recursos materiais, que durante o seu tempo de vida ocupam o solo, consomem minerais, combustíveis fósseis, outros materiais naturais e produzem resíduos. A produção e o uso dos materiais do edifício têm um impacte significativo no ambiente e nos custos do projeto. Nesse sentido, na procura da sustentabilidade dos materiais importa reduzir a intensidade de materiais utilizados e privilegiar, se possível, a utilização de materiais locais, reciclados e/ou renováveis, bem como assegurar que dispõem de baixo impacte ambiental, preferencialmente evidente através da sua certificação ambiental. Na área dos materiais a procura da sustentabilidade, segundo o LiderA, assenta na procura de utilização de materiais de origem responsável (P12) nomeadamente no fomento da utilização dos materiais locais e materiais de baixo impacte ambiental, se aplicável na durabilidade (P13) (Pinheiro, 2019, p. 17).

Por último, uma referência a uma metodologia especialmente concebida para comparar e avaliar a circularidade de edifícios, e ainda em fase de protótipo. O Circular Building Assessment é uma ferramenta desenvolvida no contexto do programa BAMB com o objetivo de quantificar e comparar as diversas abordagens, sempre que possível, a partir do BIM (Building Research Establishment, 2019).

Tal poderá incluir a reutilização de materiais e componentes, projetar para a desconstrução e para a utilização dos passaportes de materiais, indo ao encontro dos princípios do Reversible Building Design (RBD) ao mesmo tempo que se potenciam e realçam os benefícios ambientais e económicos da construção circular (Ilustração 65) (Buildings As Materials Banks, 2018).

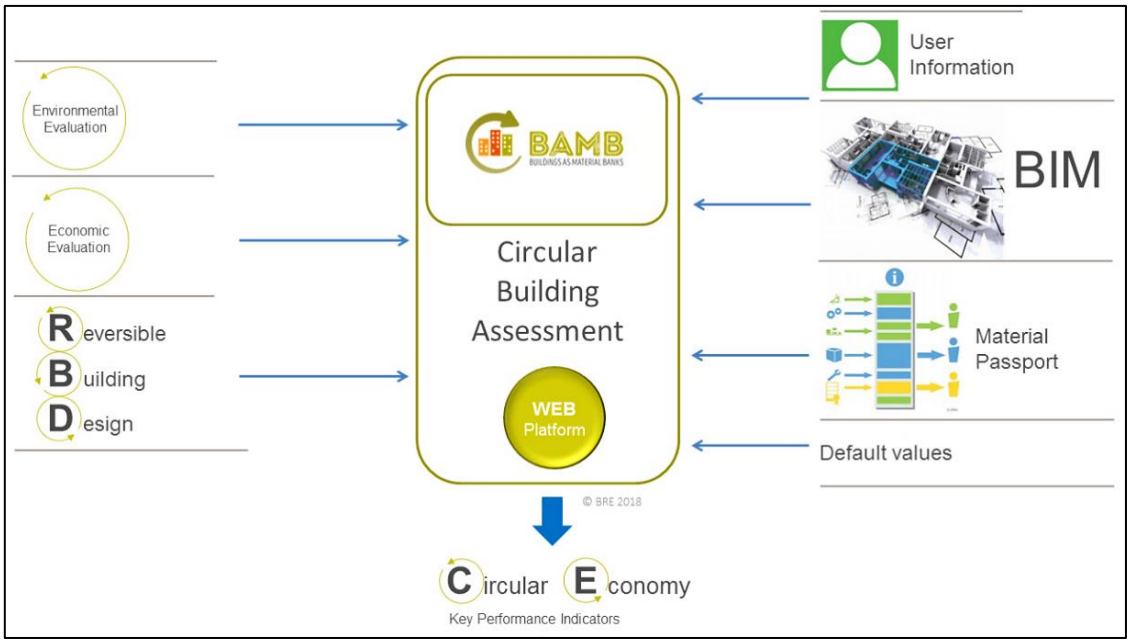


Ilustração 65 – Visão esquemática da ferramenta CBA. (Buildings As Materials Banks, 2018)

Esta interação com o BIM, além de em primeiro grau avaliar o potencial de reutilização do edifício, determinado pelas decisões da arquitetura e pelos critérios de escolha de materiais, produtos e sistemas, como no caso do PM (Ilustração 66), também permite determinar outros parâmetros mais convencionais (planeamento, custos, desempenho energético e hídrico, acústica, carbono, etc.), obtendo-se uma visão integrada e completa do edifício e dos seus impactes (Buildings As Materials Banks, 2020).



Ilustração 66 – Versão simplificada de um Passaporte de Materiais num edifício residencial. (Blok, Schouten e Dasnois, 2020)

2.3.2. O PACTO ECOLÓGICO EUROPEU

Tornar a Europa no primeiro continente neutral em termos climáticos até 2050 é o grande objetivo do Pacto Ecológico Europeu (PEE), apresentado pela primeira vez em dezembro de 2019, como um pacote de medidas que deverá permitir às empresas e aos cidadãos europeus realizar uma transição ecológica da economia e da sociedade, rumo à sustentabilidade.

Estas medidas serão acompanhadas de um roteiro inicial de políticas fundamentais, que vão desde uma redução ambiciosa das emissões (zero emissões líquidas de gases com efeito de estufa até 2050) até ao investimento na investigação e na inovação de ponta de modo a capacitar a economia para se tornar cada vez mais competitiva, inclusiva e eficiente na utilização dos recursos.

O PEE apresenta um roteiro com ações para impulsionar a transição para uma economia circular, tendo em conta os investimentos necessários e os respetivos instrumentos para a sua efetivação (Comissão Europeia, 2019, p. 2,3; Marques, 2023; Comissão Europeia, 2021).

2.3.2.1. OBJETIVOS PRINCIPAIS

O pacto tem como macro objetivo tornar a Europa climaticamente neutra até 2050 e, nesse contexto, proteger e beneficiar as pessoas, o planeta e a economia.

De forma a poder concretizá-lo, a Comissão Europeia enunciou os sete objetivos principais: 1. Transformar a economia e a sociedade; 2. Transportes sustentáveis para todos; 3. Liderar a terceira revolução industrial; 4. Despoluir o sistema energético; 5. Renovar os edifícios, adequando-os a estilos de vida mais ecológicos; 6. Trabalhar com a natureza para proteger o planeta e a saúde humana; 7. Impulsionar a ação climática a nível mundial (União Europeia. Comissão, 2021).

Dentro destes destacam-se com especial interesse para o tema deste trabalho: o compromisso na redução das emissões de carbono em 55% até 2030, em relação a 1990 – pacote Objetivo 55 (Marques, 2023), a renovação de trinta e cinco milhões de edifícios e a criação de cento e sessenta mil novos empregos no setor da construção, além do acréscimo da quota de utilização de energias renováveis em 40%, a par com a

redução do consumo de energia primária e final entre 36 a 39%, por conta das medidas de eficiência energética na economia (União Europeia. Comissão, 2021).

2.3.2.2. O NOVO BAUHAUS EUROPEU

Diretamente relacionada com o Pacto Ecológico Europeu, a Comissão Europeia lançou em Setembro de 2021 um conjunto de ações e de financiamento designado de Novo BauHaus Europeu (NBE) ou New European Bauhaus (NEB) – COM(2021) 573 final – com o objetivo de acelerar a transformação de vários sectores económicos e possibilitar o acesso dos cidadãos a bens mais circulares e de baixo-carbono, ao mesmo tempo que se promove a regeneração da natureza e a biodiversidade (Loonela e Dejond, 2021); União Europeia. Comissão, 2021, p. 2).

Sendo o setor da construção, pela sua relevância, um dos especialmente referidos, o NBE aporta uma dimensão prática ao Pacto Ecológico Europeu, trazendo para o terreno soluções inovadoras e sustentáveis:

> The New European Bauhaus combines the big vision of the European Green Deal with tangible change on the ground. Change that improves our daily life and that people can touch and feel - in buildings, in public spaces, but also in fashion or furniture. The New European Bauhaus aims at creating a new lifestyle that matches sustainability with good design, that needs less carbon and that is inclusive and affordable for all (Loonela e Dejond, 2021).

O Novo Bauhaus Europeu assenta em três valores – sustentabilidade, inclusão e estética (Ilustração 67) – e em três princípios fundamentais: 1. Combinação do global e do local; 2. Participação; 3. Transdisciplinaridade (União Europeia. Comissão, 2021, p. 5).

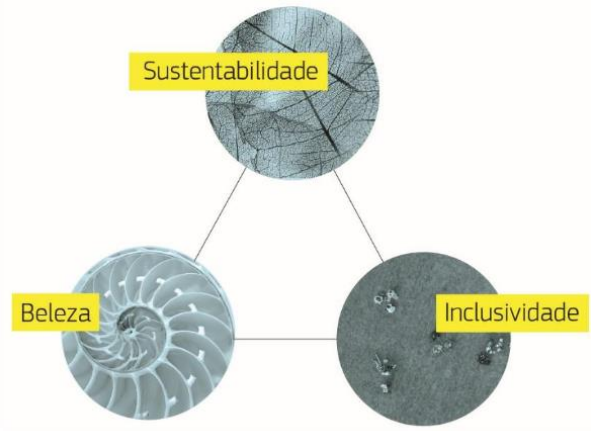


Ilustração 67 – O triângulo de valores do NBE. (União Europeia. Comissão, 2021, p. 5)

O NBE é definido como sendo "…transversal por natureza e transdisciplinar desde a conceção […] e visa criar pontes e ligações entre disciplinas, locais e pessoas, utilizando a inteligência e os conhecimentos coletivos para fazer face à complexidade dos desafios que temos pela frente." (União Europeia. Comissão, 2021, p. 3), à semelhança da iniciada em 1939 pelo histórico movimento Bauhaus (União Europeia. Comissão, 2021, p. 4)

Na sequência dos contributos recebidos durante a fase de conceção conjunta, foram identificados e adotados quatro eixos temáticos ou fundamentais para a execução do NBE: 1. Restabelecer a ligação com a natureza; 2. Recuperar um sentimento de comunidade e de pertença; 3. Dar prioridade aos lugares e às pessoas que mais necessitam; 4. Necessidade de efetuar uma reflexão (circular) de longo prazo centrada no ciclo de vida e integrada no ecossistema industrial (União Europeia. Comissão, 2021, p. 16),

De especial interesse para o nosso tema, o eixo temático 4: necessidade de efetuar uma reflexão circular de longo prazo centrada no ciclo de vida e integrada no ecossistema industrial, evidencia uma clara necessidade de uma maior circularidade de modo " […] a combater a utilização insustentável dos recursos e resíduos, nomeadamente a nível da utilização de edifícios, infraestruturas e outros espaços físicos obsoletos." (União Europeia. Comissão, 2021, p. 10).

A mensagem principal para o setor é o de evitar a demolição de edifícios e infraestruturas existentes (promovendo, em seu lugar, a reabilitação e a reutilização adaptativa), em simultâneo com a utilização de materiais e componentes reciclados, reutilizados ou renováveis (União Europeia. Comissão, 2021, p. 10; União Europeia. Comissão, 2021, p. 22).

As soluções baseadas no mundo natural são essenciais para uma abordagem integrada e circular, devendo, também os edifícios, serem considerados como parte do ecossistema (União Europeia. Comissão, 2021, p. 22) e os materiais renováveis (madeira, palha, cortiça, cânhamo, etc.) devem fazer parte dos paradigmas de conceção das obras novas e de reabilitação: "A conceção e a arquitetura circulares e sustentáveis devem tornar-se o novo normal." (União Europeia. Comissão, 2021, p. 10).

> Novas técnicas e materiais poderiam oferecer soluções para uma perspetiva de longo prazo no setor da construção. A utilização de materiais ou resíduos de demolição submetidos a reciclagem com valorização, bem como materiais de base biológica para

> a reabilitação, seria útil em termos de reforço da integridade estrutural ou da melhoria do isolamento térmico de edifícios antigos. Para além das soluções circulares e baseadas na natureza, outras tecnologias e inovações podem representar um papel significativo (União Europeia. Comissão, 2021, p. 22).

O Novo Bauhaus Europeu atraiu, na fase de contributos, um grande interesse de participantes do setor ACE (arquitetos e engenheiros), não só devido à referência explicita da terminologia (*Bauhaus*), mas também às oportunidades e desafios planteados (Ilustração 68) (União Europeia. Comissão, 2021, p. 14).

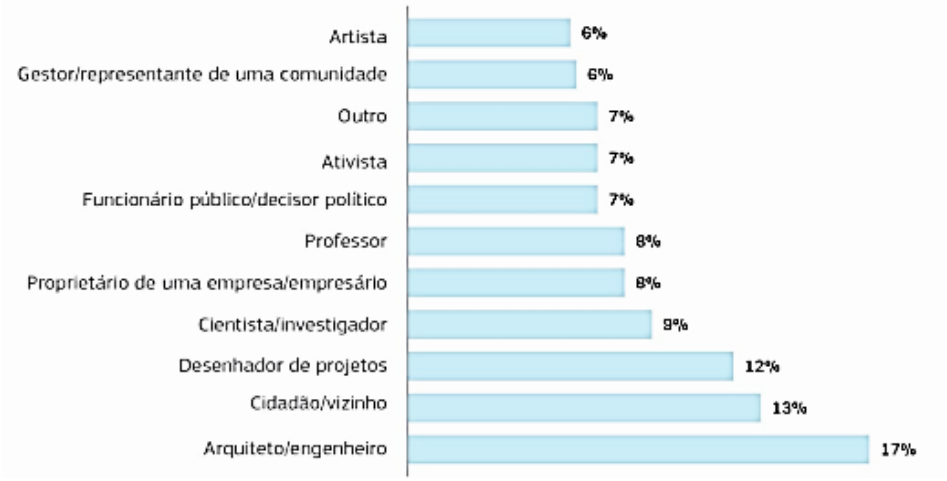


Ilustração 68 – Arquitetos e engenheiros entre os profissionais mais participativos no NBE. (União Europeia. Comissão, 2021, p. 14)

2.3.2.3. DESCARBONIZAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

A descarbonização do sistema energético da União Europeia (UE), a par da eficiência energética do edificado, são dois dos principais objetivos do PEC (em simultâneo com a redução das emissões e do aumento da quota de energias renováveis), sendo a sua prossecução feita através de nove grandes áreas de intervenção, por via do desenvolvimento e na implementação de estratégias, esquemas de financiamento e iniciativas legislativas.

Três dessas áreas são relacionadas, de forma direta ou indireta, com o ambiente construído: neutralidade carbónica, economia circular na indústria, construção e renovação de edifícios com eficiência de energia e de recursos (Ilustração 69) (Hayes *et al.*, 2022, pp. 2, 4).

Complementarmente, a COM assume que é fundamental, numa transição para as energias limpas, "[…] dar prioridade à eficiência energética, melhorar o desempenho

energético dos nossos edifícios e desenvolver um setor da energia fundado principalmente em fontes renováveis." (União Europeia. Comissão, 2022).

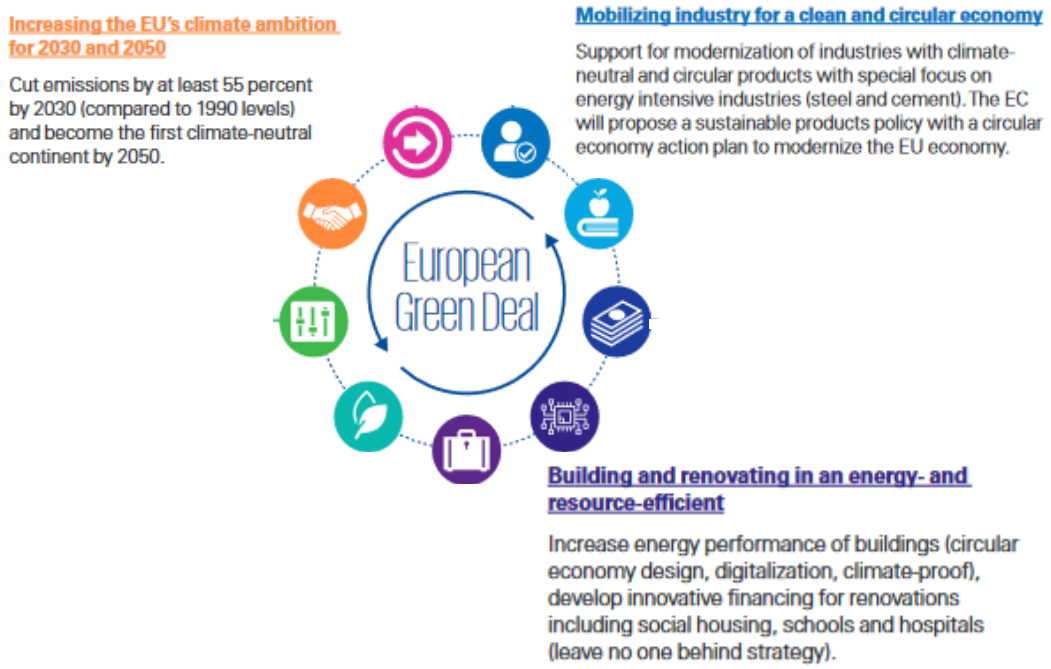


Ilustração 69 – Três áreas do Pacto Ecológico Europeu relacionadas com a descarbonização da economia e dos edifícios. ([Adaptado a partir de:] Hayes *et al.*, 2022, p. 4)

Para alcançar este objetivo, têm especial relevância no contexto da descarbonização do edificado os seguintes dois instrumentos: a estratégia "Vaga de Renovação na Europa**"** (VRE) (COM(2020) 662 final) e a "Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios" (Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho (reformulação)).

A VRE aponta para que na União Europeia, e até 2030, se duplique a renovação energética do edificado (edifícios residenciais e não residenciais), com aumento da taxa e da intensidade de renovação após 2030, de modo a alcançar a neutralidade climática até 2050, superar a pobreza energética, bem como promover a eficiência na utilização dos recursos e a economia circular (Ilustração 70) (União Europeia. Comissão, 2020, p. 3; União Europeia. Conselho, 2021):

> O setor dos edifícios é um dos maiores consumidores de energia na Europa sendo responsável por mais de um terço das emissões de gases com efeito de estufa da UE. Com milhões de europeus sem meios para manter a sua casa aquecida convenientemente, a renovação é também uma resposta importante à pobreza energética e à qualidade de vida dos cidadãos (União Europeia. Conselho, 2021).



Ilustração 70 – Vaga de Renovação na Europa. ([Adaptado a partir de:] União Europeia. Conselho, 2021)

Os princípios fundamentais desta estratégia – abrangente e integrada – são os seguintes:

1. Prioridade à eficiência energética;
2. Acessibilidade dos preços;
3. Descarbonização e integração das energias renováveis;
4. Conceito de ciclo de vida e circularidade;
5. Normas rigorosas em matéria de saúde e ambiente;
6. Enfrentar simultaneamente o duplo desafio das transições ecológica e digital;
7. Respeitar a estética e a qualidade arquitetónica ((União Europeia. Comissão, 2020, pp. 3–5).

Tendo a conta o tema deste trabalho, vamos dedicar especial atenção a dois dos pontos acima enunciados, nomeadamente a integração do "conceito de ciclo de vida e circularidade" e o respeito pela "estética e a qualidade arquitetónica".

O primeiro aspeto diz respeito à minimização da pegada ecológica dos edifícios a par da " […] transformação de parte do setor da construção num sumidouro de carbono, por exemplo mediante a promoção de infraestruturas verdes e a utilização de materiais

orgânicos que permitem armazenar carbono, tais como madeira de origem sustentável" (União Europeia. Comissão, 2020, p. 4).

O segundo realça o respeito pelos "[…] princípios de conservação da conceção, da mestria, do património e do espaço público." (União Europeia. Comissão, 2020, p. 5) alinhados com a **Declaração de Davos** (2018), em que a arquitetura de qualidade é definida "[…] também pela sua contribuição para a qualidade de vida das pessoas e para o desenvolvimento sustentável das nossas cidades e zonas rurais." (União Europeia. Comissão, 2020, p. 5).

Por último, referir que a sustentabilidade é um dos pilares desta estratégia que recomenda (no âmbito do grande volume e intensidade das renovações a efetuar na Europa) a utilização de materiais, produtos e soluções baseadas na natureza e de base biológica, assim como de materiais reciclados, tendo como suporte a ACV e os princípios da economia circular (União Europeia. Comissão, 2020, p. 19).

Foram identificados sete grandes domínios de intervenção e respetivas ações essenciais com vista a impulsionar " […] uma mudança radical na profundidade e na escala das renovações: […] "(União Europeia. Comissão, 2020, p. 6), donde se realça o quinto domínio, parcialmente transcrito abaixo:

> Dotar o setor da construção das capacidades necessárias para realizar renovações sustentáveis, baseadas em soluções circulares, na utilização e reutilização de materiais sustentáveis e na integração de soluções baseadas na natureza. A Comissão pretende promover o desenvolvimento de soluções industriais normalizadas e sustentáveis e a reutilização de resíduos. Para tal, irá elaborar um roteiro com vista à redução das emissões de carbono ao longo do ciclo de vida dos edifícios até 2050, incluindo por meio da utilização de produtos de base biológica, e rever as metas de valorização de materiais (União Europeia. Comissão, 2020, p. 7).

A questão da eficiência energética está diretamente relacionada com várias diretivas comunitárias, tais como a Diretiva Eficiência Energética, a Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios, a Diretiva Energias Renováveis e a Diretiva Conceção Ecológica, entre outros atos legislativos (União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2023, p. 5).

No âmbito do pacote legislativo **Energias Limpas para Todos os Europeus**, que visa uma transição justa para a neutralidade carbónica em 2050, o princípio da prioridade à eficiência energética é central e comum a todos os setores, nomeadamente ao da

construção, assumindo uma especial relevância no combate à pobreza energética (União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2023, pp. 3, 5).

Desde logo, a nova Diretiva Eficiência Energética (2023) realça o papel da economia circular e do PEC para a descarbonização do edificado, chamando a atenção para as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida dos edifícios (carbono incorporado), e do respetivo PAG (União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2023, pp. 10, 11):

> O potencial de aquecimento global ao longo de todo o ciclo de vida mede as emissões de GEE associadas ao edifício em diferentes fases do seu ciclo de vida. Mede, por conseguinte, a contribuição global do edifício para as emissões que conduzem às alterações climáticas, sendo por vezes referido como avaliação da pegada de carbono ou medição do carbono ao longo de todo o ciclo de vida. Reúne as emissões de carbono incorporadas nos materiais de construção com as emissões diretas e indiretas de carbono decorrentes da fase de utilização. Os edifícios são um reservatório de materiais significativo, constituindo depósitos de recursos com elevado teor de carbono ao longo de muitas décadas, pelo que é importante promover projetos que facilitem a reutilização e a reciclagem no final do seu tempo de vida útil, em conformidade com o novo Plano de Ação para a Economia Circular. Os Estados-Membros deverão promover a circularidade, a durabilidade e a adaptabilidade dos materiais de construção, a fim de abordar o desempenho dos produtos de construção em matéria de sustentabilidade (União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2023, p. 11).

Na continuidade do acima descrito, e como forma de implementar a VRE, surge a necessária e urgente revisão da Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios (Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho), também ela um instrumento indispensável para a efetiva aplicação do NBE e da missão **Cidades com Impacto Neutro no Clima e Inteligentes** (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 3).

O Parlamento Europeu aprovou, em março de 2023, uma proposta de alterações à diretiva e que constitui a base da futura versão final reformulada, com o intuito de dar resposta aos novos desafios, nomeadamente a neutralidade climática e a circularidade no edifícios, como já referido (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, pp. 6–9).

Integrando novos requisitos, nomeadamente a quantificação do PAG, a eliminação progressiva de combustíveis fósseis, a integração de energia solar e as soluções baseadas na natureza, "[…] com o propósito de alcançar um parque imobiliário com emissões nulas até 2050 […] (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 37), a futura diretiva contempla no seu articulado o Novo Bauhaus Europeu (Artigo 7.º-A), refletindo a sua importância no contexto do desempenho energético (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 61).

Nos considerandos do texto aprovado pelo Parlamento Europeu (P9_TA(2023)0068), pode ler-se o seguinte, o qual, pela importância de que se reveste, o autor passa a transcrever extensivamente:

> Convém estabelecer uma ligação com os princípios da economia circular e o papel de liderança da iniciativa Novo Bauhaus Europeu, que visa promover uma maior circularidade no ambiente construído, promovendo a renovação e a reutilização adaptativa em detrimento da demolição e das novas construções, conforme o caso. A introdução de requisitos para as emissões ao longo de todo o ciclo de vida encorajará a inovação industrial e a criação de valor, por exemplo, através do aumento da utilização de materiais naturais e de natureza circular. É fundamental promover e incluir a utilização de materiais de construção mais sustentáveis, em particular de materiais de origem biológica e geológica, bem como técnicas simples de construção passivas, de baixa tecnologia e testadas a nível local, a fim de apoiar e promover a utilização e investigação de tecnologias dos materiais que contribuam para o isolamento ideal e o apoio estrutural dos edifícios. Tendo em conta a crise climática e o aumento da probabilidade de ondas de calor no verão, é necessário dar especial atenção à proteção térmica dos edifícios. Para minimizar as emissões de gases com efeito de estufa de todo o ciclo de vida dos edifícios, é necessária uma utilização eficiente, suficiente e circular dos recursos, bem como a transformação de partes do parque imobiliário num sumidouro de carbono. O facto de os edifícios serem responsáveis por emissões de gases com efeito de estufa antes da sua vida útil deve-se ao carbono já incorporado em todos os materiais de construção. O aumento da utilização de materiais de construção baseados na natureza, sustentáveis e locais, em conformidade com os princípios da iniciativa Novo Bauhaus Europeu e do mercado interno, poderá contribuir para a substituição de materiais de maior intensidade carbónica e para o armazenamento de carbono no ambiente construído através da utilização de materiais à base de madeira. As políticas de suficiência são medidas e práticas diárias que evitam a procura por energia, materiais, solo, água e outros recursos naturais ao longo do ciclo de vida dos edifícios e bens, enquanto contribuem para proporcionar bem-estar a todos os habitantes do planeta. Os princípios de circularidade evitam a utilização linear de materiais e bens através da aplicação dos princípios de suficiência ao nível do produto e dos materiais de construção. As medidas para utilizar e prolongar o tempo de vida útil de materiais secundários são essenciais para assegurar que o setor da construção da União contribui com a sua quota-parte para a consecução do objetivo de neutralidade climática. (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, pp. 7, 8).

De forma a implementar o Pacto Ecológico Europeu, várias ferramentas e iniciativas legislativas têm sido sucessivamente lançadas, sendo uma delas, de carácter eminentemente prático e abrangente: o Plano de Ação para a Economia Circular (PAEC), nomeadamente o português, adaptado à realidade nacional.

2.3.3. O PLANO DE AÇÃO PARA A ECONOMIA CIRCULAR

Em 2015, e na sequência de um pacote legislativo específico, a Comissão Europeia publicou o primeiro Plano de Ação para a Economia Circular (PAEC) – COM(2015) 614

final, que "[…] define um mandato da UE concreto e ambicioso para apoiar a transição para uma economia circular." (União Europeia. Comissão, 2015, p. 24).

Neste documento, a economia circular é considerada como uma ferramenta essencial para desenvolver uma europa competitiva, hipocarbónica e ecoeficiente, além de ser um vetor de crescimento, emprego e desenvolvimento sustentável (União Europeia. Comissão, 2015, p. 1).

Em março de 2020, o **Relatório da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu, e ao Comité das Regiões sobre a aplicação do PAEC**, concluiu que as 54 ações previstas no PAEC Europeu estavam concluídas ou em execução, pelo que a Comissão lançou o novo Plano de Ação para a Economia Circular, um dos pilares do Pacto Ecológico Europeu (Portugal. Direção-Geral das Atividades Económicas, 2023).

2.3.3.1. O NOVO PLANO DE AÇÃO EUROPEU

O novo Plano de Ação para a Economia Circular (nPAEC) define uma estratégia orientada para o futuro, tendo por base as ações desenvolvidas desde 2015. Através da aplicação de medidas ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos, este novo plano de ação tem como objetivo adequar a economia e reforçar a competitividade no contexto do desenvolvimento sustentável, protegendo o ambiente e as pessoas (Portugal. Direção-Geral das Atividades Económicas, 2023).

Em relação ao ambiente construído é reconhecido o papel de destaque na economia e no ambiente, e a importância de eficiência do setor na diminuição drástica das emissões, da poluição e dos resíduos. Neste sentido, está consignada o lançamento da **Estratégia para a Sustentabilidade do Ambiente Construído**, de modo a assegurar a coerência nos domínios de ação em causa, promovendo princípios de circularidade em todo o ciclo de vida dos edifícios (União Europeia. Comissão, 2020, p. 12).

Devido à relevância desta proposta, passamos a transcrever na íntegra as suas medidas:

- Abordar o desempenho dos produtos de construção no que à sustentabilidade diz respeito no contexto da revisão do Regulamento Produtos de Construção, incluindo a eventual introdução de requisitos para o teor reciclado de determinados produtos de construção, tendo em conta a sua segurança e funcionalidade;

- Promover medidas para melhorar a durabilidade e adaptabilidade dos ativos construídos, em consonância com os princípios da economia circular para a conceção de edifícios, e criar registos digitais dos edifícios;

- Utilizar a abordagem Level(s) para integrar a avaliação do ciclo de vida nos contratos públicos e no quadro da UE para o financiamento sustentável, explorar a pertinência de fixar metas de redução das emissões de carbono e o potencial do armazenamento de carbono;

- Considerar uma revisão das metas fixadas na legislação da UE para a valorização de materiais dos resíduos de construção e demolição e as suas frações específicas por material;

- Promover iniciativas para reduzir o grau de impermeabilização dos solos, reabilitar espaços industriais abandonados ou contaminados e fomentar a utilização segura, sustentável e circular de solos escavados.

Além disso, a iniciativa «Vaga de Renovação», que foi anunciada no Pacto Ecológico Europeu e visa a melhoria significativa da eficiência energética na UE, será desenvolvida em consonância com os princípios da economia circular, incluindo o desempenho otimizado ao longo do ciclo de vida e uma vida útil mais longa dos ativos construídos. No âmbito da revisão das metas de valorização para os resíduos de construção e demolição, a Comissão prestará especial atenção aos materiais de isolamento, que estão a gerar um fluxo de resíduos crescente (União Europeia. Comissão, 2020, p. 14; União Europeia. Comissão, 2020, pp. 12, 13).

Igualmente relevante, e como forma de alcançar a neutralidade climática, é indicado que é necessário não só reduzir emissões, mas, também, sequestrar carbono da atmosfera. Nesse sentido, o aumento da circularidade dos produtos de construção e a sequestração por via do armazenamento em construções de madeira, e em outros materiais de base biológica, é uma estratégia importante e complementar dos métodos naturais de sequestração por via da regeneração dos ecossistemas, da silvicultura e da agricultura (União Europeia. Comissão, 2020, p. 20).

2.3.3.2. O PLANO DE AÇÃO PORTUGUÊS

Internamente, o Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal (PAEC-PT), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017, de 23 de novembro, tem como objetivo "[…] definir uma estratégia nacional para a economia circular assente na produção e eliminação de resíduos e nos conceitos de reutilização, reparação e renovação de materiais e energia" (Portugal. Direção-Geral das Atividades Económicas, 2023).

O PAEC-PT apresenta três níveis de ações, nomeadamente: 1. ações *macro*: de cariz transversal e de âmbito nacional, estrutural e sistémico que visam a adoção dos princípios da economia circular pela sociedade; 2. ações *meso*: na forma de agendas setoriais para os setores mais relevantes e intensivos da economia, com vista ao aumento da produtividade e à utilização eficiente dos recursos; 3. ações *micro*: através da elaboração de iniciativas regionais e/ou locais, centradas e adaptadas às especificidades socioeconómicas de cada região (Ilustração 71) (Portugal. Presidência do Conselho de Ministros, 2017, pp. 6584-(54, 58)).

Das sete ações *macro*, três delas assumem um interesse especial para o setor ACE: 1. Incentivar um mercado circular; 2. Educar para a economia circular; 3. Investigar e inovar para a economia circular, devido ao papel relevante que as empresas e as instituições de ensino superior desempenham (Portugal. Presidência do Conselho de Ministros, 2017, pp. 6584-(63, 64, 68)).

O setor da construção (entendido como toda a cadeia de valor) é tido como prioritário, todavia caracterizando-se pelo baixos níveis de circularidade, produtividade material e de eficiência de recursos, conduzindo a um metabolismo lento, ou seja, a uma economia cumulativa em materiais, agregados e produtos, incorporados nos edifícios e infraestruturas (Portugal. Presidência do Conselho de Ministros, 2017, pp. 6584-(55, 58, 59)).

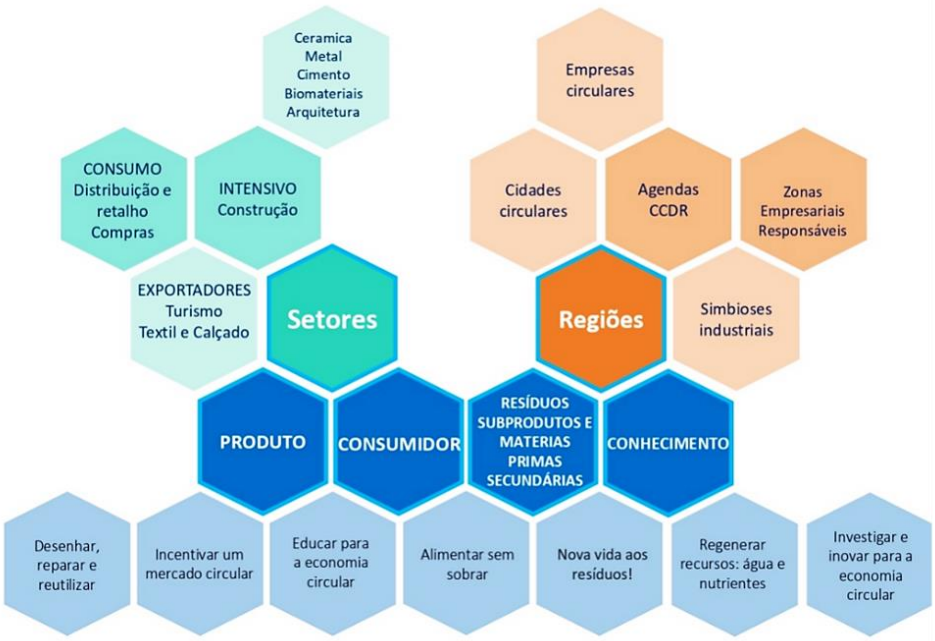


Ilustração 71 – Ações nacionais, setoriais e regionais no PAEC-PT. ([Adaptado de:] Portugal. Grupo Interministerial Economia Circular, 2017, p. 19)

Por esse motivo, e ao nível das ações setoriais, existiram condições para poder detalhar uma proposta de agenda de transição para o setor (Tabela 19), definindo orientações, objetivos, setores-chave e entidades alvo, entre outros, com vista à constituição de um futuro acordo circular para a construção.

Tabela 19 – Esquema parcial da proposta de agenda setorial para o setor da Construção no PAEC-PT.

Orientações

CONCEÇÃO

- Reabilitar e Usar: protocolos de incentivo à reutilização de componentes, materiais recuperados ou reciclados, desenvolvimento de passaporte de materiais, promoção do uso de espaço construído "em vazio" (público e/ou privado)
- Construção circular: infraestruturas públicas e privadas como projetos demonstradores da aplicação de soluções circulares (p.e. cradle-to-cradle, reutilização de componentes, rótulo ecológico, guias de desconstrução, declarações ambientais de produto)

Ambiente construído: mais eficiência e produtividade material

Objetivos

- Aumentar a introdução de matérias primas secundárias na economia;
- Diminuir a produção de resíduos;
- Reduzir a procura de matérias-primas (primárias);
- Diminuir a emissão de gases de efeito de estufa;
- Reduzir o consumo de água;

Setores - chave

- Fabricantes de material de construção
- Donos de obra (Entidades públicas/ municípios/ Empresas públicas)
- Empresas de remodelação/ demolição/ construção
- Projetistas/ Design
- Utilizadores do ambiente construído
- Empresas de remodelação/demolição
- Municípios
- Empresas da distribuição

Entidades alvo

- Ministério do Ambiente e entidades tuteladas: reabilitação urbana, resíduos, ordenamento do território;
- Ministério do Planeamento e Infraestruturas e entidades tuteladas: desenvolvimento e coesão, infraestruturas – construção, imobiliário, contratos públicos;
- Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, Ministério da Economia e entidades tuteladas: indústria, inovação, investimento;
- Institutos públicos com foco no imobiliário;
- Laboratórios, universidades e centros tecnológicos com currículo na área do design, construção (engenharia e materiais);
- Associações industriais e técnicas;
- Empresas: fabricantes materiais, componentes, gabinetes engenharia & arquitetura.

Fonte: [Adaptado a partir de:] Portugal. Grupo Interministerial Economia Circular (2017, p. 48)

De salientar o papel de relevo conferido aos projetistas (setores-chave) e aos gabinetes de arquitetura e engenharia, assim como às instituições de ensino superior, laboratórios e centros tecnológicos das áreas da arquitetura, *design* e construção (entidades-alvo), tal como consta na proposta de agenda (Portugal. Presidência do Conselho de Ministros, 2017, pp. 6584-(69)).

De momento, encontra-se em preparação na Agência Portuguesa do Ambiente (APA, o novo Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal (nPAEC-PT), a partir do trabalho anterior realizado no âmbito do PAEC-PT, e de forma a ir ao encontro das diretrizes do novo Plano Europeu (Portugal. Ambiente e Ação Climática, 2023).

2.3.3.3. CONSEQUÊNCIAS PARA O SETOR ACE

Para além das ações *macro*nacionais, estruturais, transversais, sistémicas e articuladas a nível europeu – que necessariamente irão influenciar o setor interessa sobretudo aprofundar as consequências da agenda setorial, tendo em conta os respetivos objetivos e orientações.

Desde logo, esta propõe-se alterar o paradigma dominante ao promover a reabilitação e renovação do edificado (em detrimento da obra nova), desde a fase de conceção, a reutilização de componentes e a reciclagem de materiais e produtos, como forma de diminuir a forte pegada ecológica e hídrica do ambiente construído:

> […] Conceção:
>
> - Reabilitar e usar: protocolos de incentivo à reutilização de componentes, materiais recuperados ou reciclados, desenvolvimento e/ou utilização de passaportes de materiais, promoção do uso de espaço construído «em vazio» (público e/ou privado);
>
> - Construção circular: infraestruturas públicas e privadas como projetos demonstradores da aplicação de soluções circulares (p. ex. reutilização de componentes, rótulo ecológico, guias de desconstrução, declarações ambientais de produto, abordagem cradle-to-cradle)[…] (Portugal. Presidência do Conselho de Ministros, 2017, pp. 6584-(69)).

De salientar a recomendação e a divulgação da utilização de passaportes de materiais, rótulos ecológicos, guias de desconstrução, declarações ambientais de produto e abordagem *Cradle-to-Cradle* no meio técnico nacional, o que até agora tem sido residual e pouco significativo, devido a um conjunto de fatores, entre os quais a falta de capacitação nesta matéria.

De igual modo, orientações relativas ao fabrico de materiais e produtos, nomeadamente a integração de RCDs no processo produtivo, a promoção da eficiência de recursos na cadeia de valor, a implementação de sistemas de logística reversa, a aplicação do **EU Construction & Demolition Waste Protocol**, bem como a prática de reutilização de componentes, são o caminho a trilhar pelo setor na direção da economia circular e da sustentabilidade (Portugal. Presidência do Conselho de Ministros, 2017, pp. 6584-(69)).

3. ECONOMIA CIRCULAR E CONSTRUÇÃO CONTEMPORÂNEA

A arquitetura contemporânea encontra-se relacionada com a sustentabilidade, sendo esta uma das suas características distintivas. A economia circular, traduzida para a materialidade pela construção circular, tem na arquitetura um fator determinante. Projetos mais sustentáveis implicam a prescrição e a execução de sistemas construtivos mais circulares, utilizando materiais renováveis, de baixo carbono incorporado e energeticamente eficientes, que abranjam as seis camadas construtivas que compõem um edifício, com destaque para a estrutura e o envelope.

Devem contemplar uma conceção baseada em sistemas construtivos prefabricados, de modo a possibilitar não só uma construção rápida e ecoeficiente, com o mínimo de poluição e resíduos, mas também a descarbonização, adaptação, flexibilidade e desconstrução seletiva. A adoção de ferramentas e plataformas informáticas, como o BIM ou o Passaporte de Materiais, são indispensáveis para poder usufruir das vantagens de desassemblagem de estruturas, fachadas e coberturas e poderem vir a ser utilizadas futuramente como um banco de materiais.

Um dos aspetos da sustentabilidade na construção com menos notoriedade é a relação existente entre a saúde humana e o edificado, transcendendo a simples questão da salubridade. Não só questões relacionadas com o local ou a implantação do edifício, mas sobretudo, os materiais e produtos prescritos e aplicados, são determinantes na saúde dos seus ocupantes.

É possível prescrever, em sede de projeto, sistemas construtivos em que a envolvente seja constituída por materiais renováveis, por isolamentos e acabamentos de baixa ou nula toxicidade, permeáveis ao vapor e com atraso térmico relevante, contribuindo para a qualidade do ar interior, elevado conforto térmico e acústico e elevado desempenho energético.

A integração da arquitetura e da engenharia, envolvendo todas as partes e suportada pelas ferramentas adequadas, constitui num aspeto a não subestimar para implementação bem-sucedida da construção circular. Como documento orientador, o Plano de Ação para a Circularidade na Construção contempla os vários aspetos relativos á conceção circular de projetos de edifícios em Portugal.

3.1. ARQUITETURA CONTEMPORÂNEA

A arquitetura contemporânea é um movimento que se desenvolveu a partir da segunda metade do século passado, tendo emergido da designada *arquitetura moderna*, com raízes no movimento modernista, e que eclodiu em meados do século XIX, num contexto de progresso tecnológico e de forte industrialização (De Fusco, 1996, p. 11, 30). No entanto, tanto Zevi (1954), como Collins (1998) entendem que o início deste movimento se origina um século antes, a partir de 1750 (Collins, 1998, p. 9; Zevi, 1954, p. 15).

A arquitetura moderna está intrinsecamente relacionada com o advento da revolução industrial e da pré-fabricação, em relação à qual os arquitetos não estavam capacitados para retirar o melhor partido. Excecionalmente, os primeiros a projetarem edifícios a partir destes novos materiais industriais disponibilizados pela indústria (p.e., ferro, aço, vidro), foram John Nash, com o Royal Brighton Pavilion (1824) e Joseph Paxton com o Crystal Palace (1851) (Ilustração 72), ambos no Reino Unido e inspirados no classicismo estrutural de Labrouste, Rondelet e Choisy (Frampton, 1993, p. 18; Benevolo, 1999, pp. 23, 129–135; Pinto, 2022, p. 103).

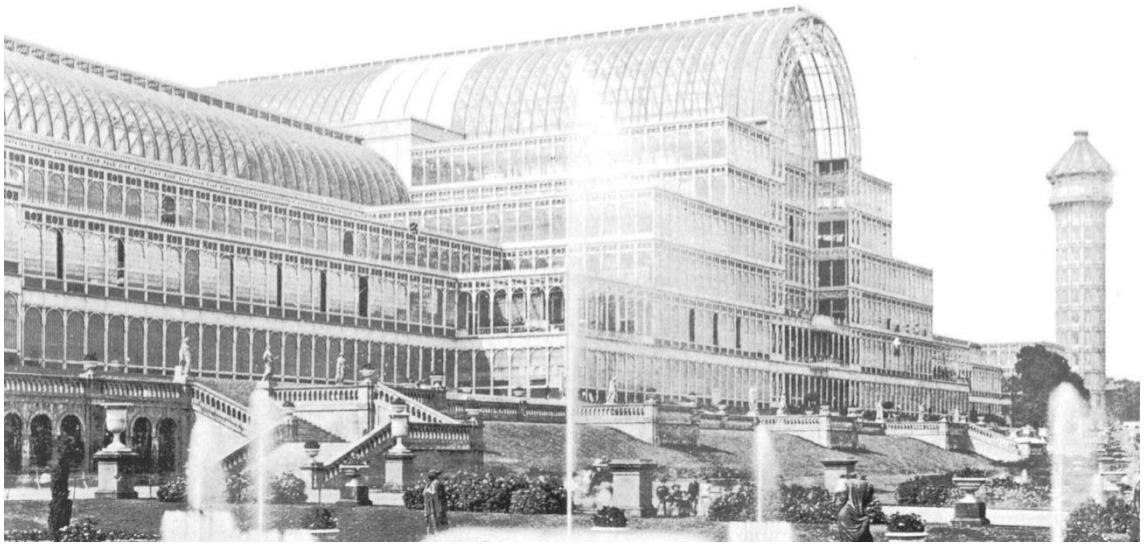


Ilustração 72 – "The Crystal Palace". (Tietz, 2008, p. 7)

Em consequência, gerou-se uma alteração da relação entre a arquitetura e a tecnologia, através da utilização de aço, betão armado ou vidro, e que possibilitou a separação, "[…] conceptual e processual, entre a estrutura e o revestimento epidérmico do edifício […]" como até aí era apanágio e reflexo da própria qualidade estrutural." (Grande, 2000, p. 31).

Tal possibilidade levou a uma modificação radical na conceção da arquitetura, tendo em conta, a partir desse momento, a existência de uma alternativa técnica ao determinismo das paredes portantes, conferindo flexibilidade e liberdade ao projeto, principalmente no que concerne à distribuição das paredes interiores e à inserção e dimensão de vãos (Richards, 1959, p. 42 - 45).

De facto, desde as primeiras décadas do século passado, os arquitetos modernistas – para além de estruturas reticuladas de betão armado ou metálicas – passam a poder projetar fachadas, parcial ou totalmente envidraçadas (fachadas-cortina), como as das fábricas de Gropius (1910 e 1914) ou os arranha-céus envidraçados de Mies van der Rohe (1919 e 1922) (Estévez, 2007, p. 11).

Num aspeto mais conceptual, Martek *et al.* (2018) salientam o facto de, também em relação à missão da arquitetura na preservação da tradição e do sistema de valores sob a forma construída, o movimento modernista representar uma descontinuidade, uma rutura efetiva com o passado, a partir da relação com a ciência e a engenharia:

> However, with the advent of industrialisation and the rise of the Modern Movement, architecture relinquished the past in favour of the future. The aims of 20th century architecture—in their various manifestations—was to generate utopias that embraced technology. […] If the Modern Movement stood for anything, it stood for the belief that science and engineering, through the power of the human intellect, could solve any problem (Martek *et al.*, 2018, pp. 1, 6).

Segundo Zevi (1954), o surgimento da arquitetura moderna, deveu-se a quatro tipos de fatores: "[…] por la evolución natural del gusto; a causa del progreso científico y técnico en las construcciones; como consecuencia de las novas teorías de la visión estética; como resultado de una radical transformación social.", tendo em conta a difusão do movimento racionalista, à escala internacional (Zevi, 1954, p. 15).

Se, por um lado, a evolução do gosto arquitetónico se justifica com a modernização derivada da evolução moral, social e técnica da sociedade, já a causa mecanicista tem a ver diretamente com o desenvolvimento da ciência aplicada à construção, e do surgimento de disciplinas como a Resistência de Materiais, que irão conduzir à disponibilização de materiais inovadores e alternativos, como já anteriormente indicado: "[…] resulta innegable que para la génesis de la arquitectura moderna el elemento técnico há sido de una importancia como no la había tenido nunca en la historia desde la edad gótica" (Zevi, 1954, p. 20).

Em termos estéticos, Zevi aponta cinco teorias figurativas relacionadas concretamente com a arquitetura moderna: cubismo, neoplasticismo, expressionismo, purismo e futurismo. Destas, destacam-se o cubismo, pela sua relevância, e o futurismo, como teoria residual (Zevi, 1954, p. 21).

Por último, as transformações ocorridas a partir do século XIX, com a industrialização e os consequentes desafios urbanísticos (originados pelo crescimento populacional e o fluxo migratório para as cidades), levou à rutura com o paradigma arquitetónico vigente por via da resposta social, urgente e necessária:

> Aun en el caso que no pudiese aducir en su favor esplendores artísticos dignos de ser parangonados con los de los siglos pasados, la arquitectura moderna hubiera significado un gran progreso en términos de civilización: ni siquiera el espíritu más reacio a las razones de la inspiración poética moderna puede desconocer el hecho positivo y documentado de que, a través del trabajo desarrollado en los cincuenta años del periodo de exploración y en la década racionalista , el arte de la edificación europeo ha asimilado la lección de la revolución industrial y de sus consecuencias urbanísticas, ha elaborado una lingüística, un vocabulario figurativo apto para responder al programa social de la arquitectura contemporánea (Zevi, 1954, pp. 45, 46).

Sendo definida por um conjunto de características (entre as quais as 5 enunciadas por Le Corbusier) teve vários nomes sonantes, nomeadamente aqueles que são reconhecidos como "[…] os três mestres da arquitetura moderna: Le Corbusier, Gropius e Mies van der Rohe." (Benevolo, 1997, p. 23) (Ilustração 73).

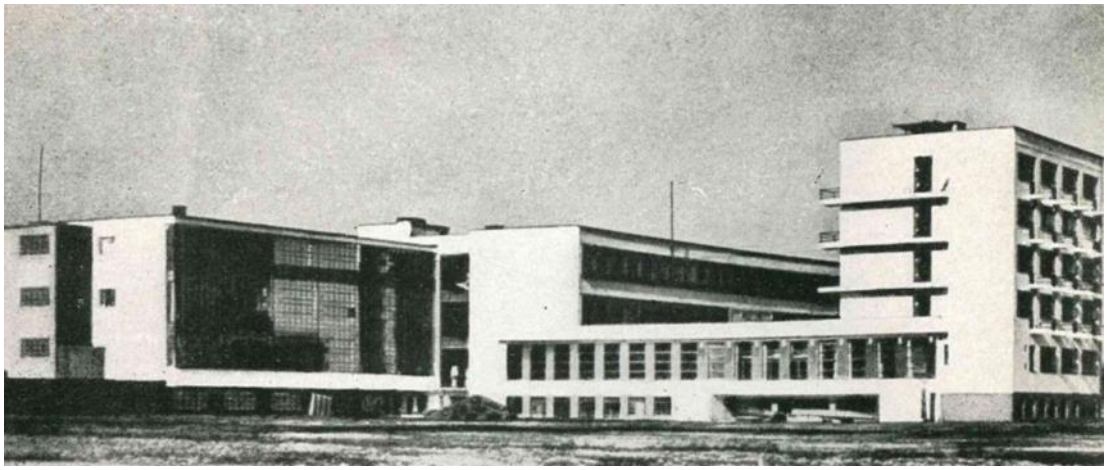


Ilustração 73 – Gropius. Bauhaus. Nassau, Alemanha (1926). (Zevi, 1955, p. 98)

A partir do trabalho dos pioneiros franceses da nova tecnologia do betão armado (p.e., Hennebick, Baudot, Garnier, os irmãos Perret, etc.), e no seguimento da invenção da Maison Dom-ino (1914) (um sistema construtivo reticulado e suscetível de ser fabricado em série), Le Corbusier baseia-se – do ponto de vista estrutural e arquitetónico – para

a elaboração e lançamento do manifesto **Les 5 points d`une architecture nouvelle** (1926), em conjunto com Pierre Jeannerret (Von Moos, 2009, p. 79; Benevolo, 1999, p. 461; Gans, 1988, pp. 18, 19), e cujos principais aspetos são os seguintes (Ilustração 74):

1. *Pilotis* (a casa suspensa acima do solo, sem contacto com humidade e cercada de jardim);

2. Coberturas ajardinadas (jardim de cobertura isolando termicamente e compensando o terreno ocupado pela construção);

3. Planta livre (separação entre a estrutura portante e as paredes interiores, libertando o espaço);

4. Janela alongada (os vãos podem alongar-se horizontalmente, sem obstáculos estruturais);

5. Fachada livre (as fachadas são leves membranas que assentam em lajes em consola, existindo liberdade para inserção de vãos de qualquer dimensão) (Frampton, 1993, p. 188; Benevolo, 1999, pp. 461, 462; Von Moos, 2009, pp. 79–87).

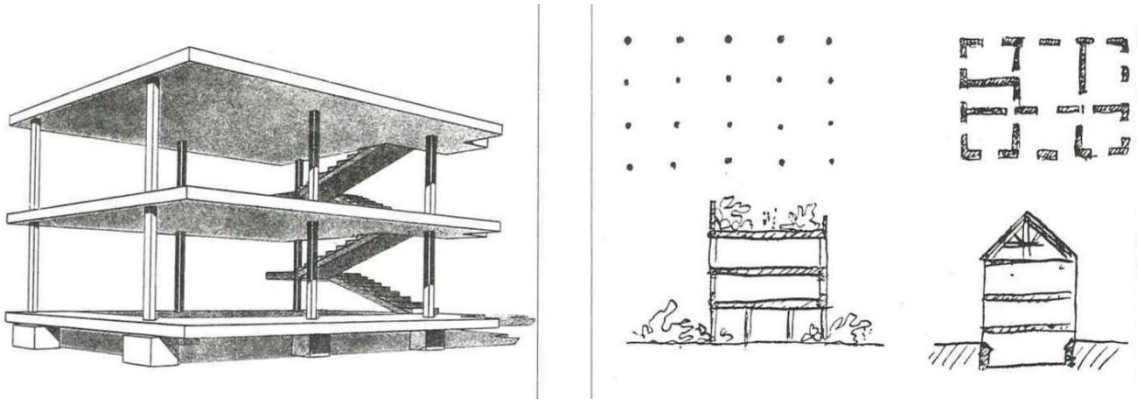


Ilustração 74 – Maison Dom-ino e os 5 pontos da nova arquitetura. (Gans, 1988, p. 18)

De notar que, para Le Corbusier, todas estas características são possibilitadas pela utilização da tecnologia de betão armado, a qual, ao longo da sua carreira, elegeu como preferencial (Benevolo, 1999, pp. 461, 462; Von Moos, 2009, pp. 83, 84). Ao mesmo tempo, traz a nova arquitetura para o plano das ações concretas: a modificação do cenário físico, necessário à organização da sociedade moderna:

> A partir de 1890 cualquier tendencia se presentaba como el cumplimiento de las más peregrinas teorías generales sobre el universo y el hombre; de esta manera la cultura de vanguardia – además de desfigurar obviamente los resultados de la reflexión filosófica – recalcaba substancialmente el carácter desempeñado por la actividad artística, a la que se atribuía un campo universal e ilimitado. En 1926, por primera vez, Le Corbusier no dice si la nueva arquitectura deba ser subjetiva o objetiva, inmanente o transcendental, sino que dice que debe ser así y así: debe tener *pilotis*, la planta libre e incluso el tejado-terraza y la ventana alargada (Benevolo, 1999, p. 462).

Para além dos três nomes acima citados, também Frank Lloyd Wright, Alvar Aalto, Buckminster Fuller ou Oscar Niemeyer, entre muitos outros, tiveram destaque, naquilo que se designou como a primeira e segunda geração da arquitetura moderna (Montaner, 2001, p. 36).

Merece especial destaque para o objetivo deste trabalho referir a designada arquitetura orgânica, […] cujos sinais se manifestam antes, durante e depois do período racionalista […] (De Fusco, 1996, p. 352), e mencionar dois dos seus expoentes máximos: Frank Llyod Wright (F.L. Wright) e Alvar Aalto (De Fusco, 1996, p. 351; Tafuri e Dal Co, 1992, p. 322).

Esse termo foi aplicado pela primeira vez à arquitetura por Louis Sullivan, em 1915, numa conferência realizada em Chicago (EUA), intitulada Arquitetura Orgânica, onde advogava a tese de que a história da arquitetura moderna apresentava um inevitável dualismo porque "[…] ha sido *orgánica* (o sea, ha seguido la ley de los organismos naturales) o ha estado *dirigida* por algún ideal euclidiano inventado por el hombre." (Zevi, 1954, p. 362).

Para F. L. Wright (que iniciou a carreira no atelier de Sullivan), a sua arquitetura era, por definição, *orgânica* (Zevi, 1954, p. 362). Segundo Tietz (2008), e citando F. L. Wrigth : "Um edifício só é orgânico quando o exterior e o interior estabelecem uma correspondência entre si, quando ambos se harmonizam com o carácter e a natureza da sua função, da sua realização, da sua localização e do seu tempo de génese" (Tietz, 2008, p. 16).

No seu ensaio **In the cause of Architecture** (1914), complementa a definição com a seguinte frase: "Por arquitectura orgánica entiendo la arquitectura que se desarrolla de dentro hacia afuera en armonía com las necesidades, diferenciándose de la que aplica desde el exterior." (Collins, 1998, p. 154).

No entanto, a utilização do adjetivo orgânico pode gerar várias interpretações, pelo que, desde 1943 é possível definir o seu significado neste contexto, desfazendo os equívocos biológico e naturalista (Zevi, 1954, p. 361).

Essencialmente, mais do que uma estética alternativa ou de qualquer outra novidade, a principal característica que distingue a arquitetura orgânica dos demais movimentos da arquitetura moderna é uma nova abordagem psicológica e espacial, que tem em conta as reais necessidades de vivência dos utentes, indo além do racionalismo vigente (Zevi, 1954, pp. 372, 373):

> Existe todavía la costumbre de ver una casa descompuesta en cuadros bidimensionales, como ocurriría si sus diversas vistas en perspectiva fueran pintadas separadamente; incluso los críticos más penetrantes saben analizar mejor una planta, una sección, una fotografía de un edificio, que la completa realidad estructural y espacial del mismo. Y es a ésta a lo que el movimiento orgánico presta atención, a la proyección en el edificio del complejo de las actividades humanas que en él se desarrollan. Orgánico por cuanto en los espacios internos de la arquitectura busca la felicidad material, psicológica y espiritual del hombre; orgánico porque extiende esta exigencia del ambiente aislado a la casa, de la casa a la ciudad. Orgánico era por lo tanto un atributo que tenía en su base una idea social y no una idea figurativa; en otras palabras, que se refería a una arquitectura que quiere ser, antes que humanística, humana (Zevi, 1954, p. 373).



Ilustração 75 – "Fallingwater". (Frank Lloyd Wright Foundation, 2023)

Um exemplo icónico desta abordagem orgânica, por parte de F.L.Wright, é a famosa Fallingwater ou Casa Kaufmaan (Ilustração 75), pela simbiose que estabelece com a cascata sobre a qual foi construída, harmonizando a forma com a construção e com os

materiais, corporizando o ideal da fusão entre o lugar vivencial e a natureza (Tietz, 2008, p. 16; Frampton, 2000, p. 228).

A partir do maciço rochoso onde está fundada, projeta-se uma arriscada consola de betão armado que paira sobre uma cascata, como se de uma forma natural se tratasse, enquanto, verticalmente, vários terraços e em diferentes níveis, surgem suspensos no espaço. A fusão com a paisagem é total, tanto no exterior (estrutura e amplos vãos horizontais), como interiormente (paredes de pedra rústica e piso lajeado), emulado no pormenor da escadaria da sala de estar que conduz, apenas e só, à cascata (Frampton, 2000, p. 227):

> La casa Kaufmann o *Fallingwater*, construida entre 1936 y 1939, no se explica sin la intención de una estereometría más pura y sobre todo sin la voluntad de desarticular de la manera más programática y asimétrica los volúmenes y los espacios, exigencias éstas que constituyen en definitiva la mayor aportación de la vanguardia figurativa a la arquitectura. Ni, por otra parte, la configuración espacial y la inserción en el paisaje de esta casa habrían sido posibles sin el particular interés por la naturaleza, por las características de los materiales, por lo imprevisto, por la arriesgada relación entre artificio y naturaleza, por la arriesgada relación entre artificio y naturaleza que fundamentan la poética orgánica (De Fusco, 1996, p. 364).

Como acima referido, nesta e em outras obras de F.L.Wright, a aproximação audaz e inovadora à natureza, a utilização que confere aos materiais naturais, assim como a importância dada à relação entre o edifício e a paisagem, entre outros aspetos, apontam no sentido da integração harmoniosa da arquitetura com o ambiente (Richards, 1959, pp. 62, 63; Behrendt, 1959, p. 141; Tafuri e Dal Co, 1992, p. 322).

Neste sentido, a arquitetura deve retornar à natureza, extraindo dela uma conceção firme e precisa: “El sentido de lo orgánico en la Naturaleza es indispensable para un arquitecto y el conocimiento de la relación entre forma y función está en la base de su actividad.” (Behrendt, 1959, p. 136)

Interessante a ambivalência da relação que F.L.Wright mantinha com a técnica, singularmente expressa na Fallingwater; apesar de a tecnologia de betão armado ter tornado exequível tão ambicioso projeto estrutural (estrutura reticulada de betão armado, com grandes vãos em consola, vencendo sobrecargas e peso-próprio). Apesar disso considerava o betão “ […] como um material ilegítimo – como um “conglomerado” que tinha “pouca qualidade em si”.” (Frampton, 1993, p. 229).

Em contraponto, a referência europeia da arquitetura orgânica é Alvar Aalto, onde, para além de uma liberdade estereométrica, plantas informais e formas inclinadas e onduladas, também a escolha e a expressividade dos materiais são uma característica da sua obra, nomeadamente a utilização da madeira nas estruturas, nos revestimentos e no mobiliário, tanto no seu estado natural, quer como produto industrial transformado (De Fusco, 1996, pp. 373, 376; Tietz, 2008, p. 72; Montaner, 2001, p. 86).

Sendo reconhecido como um dos arquitetos mais influentes do século XX, desenvolveu "[…] um método de projetar aberto que está baseado na articulação, deslocamento e rotação dos corpos nos edifícios." (Montaner, 2001, p. 88), tendo influenciado, neste aspeto, vários arquitetos nacionais e estrangeiros. De igual modo, na sua obra, o fator *ambiente*, entendido no sentido mais amplo, é uma constante, embora suscetível de ser interpretado e aplicado de várias formas (De Fusco, 1996, pp.377).



Ilustração 76 – "Villa Mairea". (Alvar Aalto Foundation, 2023)

Uma das obras mais representativas de Aalto é a Villa Mairea (1939), onde conjuga o modernismo com a tradição do movimento romântico nacional (Frampton, 2000, p. 242; Tietz, 2008, p. 72). De realçar, a fachada executada com elementos verticais de madeira (Ilustração 76), as janelas de grandes dimensões, permitindo a interação com a floresta, a madeira presente nos elegantes pilares de madeira do interior e na estrutura da sauna, assim como outras propostas orgânicas, presentes quer nos materiais vernaculares

utilizados (alvenarias, revestimentos e juntas), quer na fluidez do espaço interior (Tietz, 2008, p. 72).

A temática dos materiais naturais e do bem-estar é uma marca da indelével da sua arquitetura (Ilustração 77) superando a distinção entre estrutura e volume através da utilização de madeira e da investigação psicológica indo ao encontro das necessidades dos utentes, não a partir de um plano teórico, mas "[…] de un profundo y solidario amor por los problemas concretos de la vida cotidiana." (Zevi, 1954, p. 320):

> Tornar a arquitetura mais humana significa criar uma arquitetura melhor, o que, por sua vez, implica um funcionalismo muito mais amplo do que aquele com bases exclusivamente técnicas. Este objetivo só pode ser alcançado por métodos arquitetônicos – pela criação e combinação de coisas diferentes, de tal modo que elas possam oferecer ao ser humano uma vida extremamente harmoniosa (Frampton, 2000, p. 241).



Ilustração 77 – Villa Mairea: detalhes da utilização de materiais naturais: bambu e madeira. ([Adaptado de:] Mairea Foundation, 2023)

Esta abordagem tão caracteristicamente orgânica, no sentido de satisfazer os critérios sociais e psicológicos, esteve sempre presente ao longo de toda a sua obra, e caracterizando-o como pertencente ao grupo de arquitetos expressionistas "[…] que se empenharam em fazer com que a construção fosse uma fonte de vida e não de repressão." (Frampton, 2000, pp. 244, 245).

Essa tendência, que precedeu a arquitetura contemporânea nas suas preocupações ambientais, sociais e estéticas, é expressa nos dias de hoje pela Alvar Aalto Foundation, através da atenção que presta aos materiais renováveis e ao *design* regenerativo.

Um dos exemplos desse interesse foi a realização do 9th International Alvar Aalto Design Seminar 2022 – BIOSYMBIOSIS; Top bio-based design and innovations, orientado para soluções baseadas na natureza e na economia circular (Alvar Aalto Foundation, 2022; Scandinaviandesign.com, 2022), entre outros eventos (Ilustração 78).



Ilustração 78 – "Design Seminar 2022: biomaterials, innovations and regenerative design." (Scandinaviandesign.com, 2022)

3.1.1. CARACTERIZAÇÃO

A arquitetura contemporânea não é facilmente caracterizável, desde logo porque ainda não existe o distanciamento temporal necessário para distinguir o durável do efémero, e também porque não se trata de um estilo homogéneo, mas antes de um conjunto de "[…] técnicas, tendências e movimentos arquitetônicos atuais que romperam radicalmente com a arquitetura moderna." (Melotto *et al.*, 2017, p. 6), sendo marcado pelo ecletismo e a diversidade.

Devido a essa heterogeneidade de estilos e tendências, não é fácil encontrar um consenso quanto à totalidade das suas características. No entanto, e sem prejuízo de uma adenda posterior, podemos identificar quatro características principais, isoladas ou combinadas entre si: 1. Complexidade; 2. Simplicidade; 3. Contextualismo; 4. Sustentabilidade (Ferraz, 2010).

A complexidade, materializada no desconstrutivismo e na arquitetura contrastante e monumental, só é possível mediante a adoção das tecnologias digitais mais avançadas, como é o caso do Walt Disney Concert Hall (Los Angeles, Califórnia) ou *do* Changsha

Meixihu International Culture & Arts Centre, (Changsha, China), da autoria de Frank Gehry (1929) e Zaha Hadid (1950 – 2016), respetivamente (Ilustração 79).



Ilustração 79 – Frank Gehry e Zaha Hadid*:* Walt Disney Concert Hall e Changsha Meixihu International Culture & Arts Centre. ([Adaptado a partir de:] Sokol, Mafi e McLaughlin, 2023; Zaha Hadid Architects, 2023)

Por outro lado, a simplicidade, baseada no minimalismo e na pureza das formas (*menos é mais*, na expressão de Mies Van der Rohe) inspirou vários outros arquitetos contemporâneos, nomeadamente nipónicos, como Tadao Ando (1941) ou Shigeru Ban (1957), sendo exemplos respetivos, o Pulitzer Arts Foundation (St. Louis, Missouri) e o Aspen Arts Center (Aspen, Tenesse) (Ilustração 80).



Ilustração 80 – Tadao Ando e Shigeru Ban: Pulitzer Arts Foundation e Aspen Arts Center. ([Adaptado a partir de:] Rosenfield, 2014; Shigeru Ban Architects, 2014)

Pode-se também considerar a existência de um estilo de fusão, que unifica a complexidade e a simplicidade, através de uma arquitetura de formas simples, aliada a uma complexidade técnica e construtiva, e que se pode comprovar no trabalho de Norman Foster (1935) no Alif – The Mobility Pavillion, Expo 2020 Dubai (Dubai, Emiratos Árabes Unidos) ou de Rem Koolhaas (1944), na Casa da Música (Porto, Portugal), entre muitos outros exemplos (Ilustração 81) (Ferraz, 2010).



Ilustração 81 – Norman Foster e Rem Koolhaas: Alif - The Mobility Pavillion e Casa da Música. ([Adaptado a partir de:] Foster + Partners, 2023; Arquitectura Viva, 2023)

A par destas duas características, também o contextualismo– referências ao contexto, à cultura, aos materiais ou elementos marcantes do local, região ou país onde se se insere a obra – e a sustentabilidade – que se pode definir como um novo paradigma na arquitetura – são tendências que se tendem a universalizar nos projetos contemporâneos (Ferraz, 2010).

O arquiteto Renzo Piano, conhecido por ao longo da sua carreira conjugar magistralmente estes dois conceitos, tem colocado a sustentabilidade no cerne das suas obras (Ferraz, 2010), o que se tem vindo a acentuar, por via dos novos materiais e técnicas construtivas, bem como pela existência de sistemas de certificação de sustentabilidade do edificado disponíveis, fiáveis e reconhecidos pelo mercado.

Tal é caso de um dos seus mais recentes projetos, o edifício Marunouchi Tokio Marine (Tóquio, Japão), iniciado em 2019, e que engloba desafios arquitetónicos, urbanísticos, tecnológicos (especialmente engenharia sísmica), ambientais e sociais, tendo em vista a futura certificação de sustentabilidade de edifícios (LEED), indispensável para a efetiva valorização do imóvel, na perspetiva dos *stakeholders* (Renzo Piano Building Workshop, 2023; Ward, 2022).

> A forest of wooden columns, becoming thinner as they rise towards the sky, will provide support to the building and define its character and identity. The building's hybrid structure, designed to withstand severe seismic events, will employ wood on an unprecedented scale both in terms of quantity and size, to the benefit of the building's embodied carbon, which will be notably reduced. The slabs will be a hybrid of CLT and concrete. The columns, measuring 2x2m on the ground and 1x1m at the top of the building, will be a hybrid of glulam timber and steel.
>
> With its vibrant and intelligent facades, conceived to minimize solar gains during summer while maximizing incoming sunlight and views to the outside, the building aims to achieve

> very high standards of environmental performance and targets LEED platinum certification.
>
> Wellness will also be at the core of the design with well-lit, open-plan office spaces, communal amenities on all floors and a system of convenience open staircases to encourage mobility and communication.
>
> The lower levels of the building, conceived with the public in mind, will be very permeable. The boundary between exterior and interior will be softened by the use of highly transparent facades encouraging the people to enter the building. Inside, one will find a rich variety of spaces and activities, punctuated by the presence of the wooden columns.
>
> At the top of the building, 100m above the ground, a roof forest will provide a quiet and inspiring space for the employees to relax, to stroll around and to enjoy unique views of the city. The building is due to be completed in 2028 (Renzo Piano Building Workshop, 2023).

O novo edifício que terá uma área total de 130.000 m^2, desenvolvida por 20 pisos e perfazendo 100 m de altura, utiliza uma estrutura híbrida de madeira laminada colada e aço para os pilares, e de madeira laminada cruzada (CLT) e betão armado, no caso das lajes. Aplica várias estratégias passivas para a eficiência energética. bem como de promoção de saúde e bem-estar dos utentes, nomeadamente, através da implantação de uma floresta na cobertura (Ilustração 82).



Ilustração 82 – Renzo Piano: Marunouchi Tokio Marine: supraestrutura de madeira e jardim-floresta na cobertura. ([Adaptado a partir de:] Ward, 2022)

Quando concluída e em funcionamento, previsivelmente em 2028, a nova torre será um sequestrador de carbono (pela utilização intensiva dos elementos estruturais de madeira), terá um reduzido teor de carbono incorporado e um baixo valor de carbono operacional, comparativamente ao padrão corrente. Em simultâneo, irá contribuir para a mitigação do aumento da temperatura urbana (ilha-de-calor), assim como para a regularização e retardação do fluxo das águas pluviais, devido ao jardim-floresta da cobertura (Renzo Piano Building Workshop, 2023).

3.1.1.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS ESTÉTICO-CONSTRUTIVAS

Não sendo um movimento, e não estando por isso sujeita a nenhum constrangimento ou escola de pensamento, a arquitetura contemporânea pode ser entendida como a arquitetura da atualidade, incluindo as tendências alinhadas com a cultura dos nossos dias e as inovações do seculo XXI (Wagle, 2020; Friedman, 2023; Weishan, 2023).

O seu cerne, o seu traço distintivo é a transformação e a inovação, de modo a quebrar padrões e estilos, indo além dos conceitos e dos processos do passado. Para além da influência recebida da arquitetura moderna, é também fortemente inspirada pela arte contemporânea, pela cultura popular e pelas tendências sociais (Chaudhari, 2023; Surana, 2020; Friedman, 2023).

Apesar do acima mencionado, e de não existir uma clara definição do que é a arquitetura contemporânea, é indubitável que esta designação abrange um largo leque de estilos, muito diferentes entre si, e, nalguns casos, disruptivos, devido às capacidades potenciadas pela tecnologia e pelos novos materiais (Hohenadel, 2022; Mutuli, 2023).

> Contemporary architecture refers to the current style of architecture. Buildings from the late 20th century to the present moment might be referred to as works of contemporary architecture and may include elements such as unconventional forms, innovative materials, and sustainable building practices (Hohenadel, 2022).

De facto, as preocupações e práticas ambientais e ecológicas constituem um fator nunca abordado explicitamente nos movimentos arquitetónicos, constituindo um traço distintivo da arquitetura contemporânea (como já referido anteriormente), tendo colocado o ambiente e a sustentabilidade na agenda do setor (Hohenadel, 2022; Friedman, 2023; Mutuli, 2023): "Sustainability has emerged, arguably, as the premiere mission of contemporary architecture." (Martek *et al.*, 2018, p. 1).

Apesar de algumas variações, existe um alargado consenso quanto às características estético-construtivas dos edifícios contemporâneos, presente de vários modos, desde os edifícios unifamiliares e residenciais aos icónicos e monumentais: 1. Materiais não-convencionais; 2. Forma; 3. Composição de volumes; 4. Grandes envidraçados/ paredes-cortina; 5. Considerações ambientais; 6. Arquitetura animada; 7. Interiores abertos e iluminados; 8. Coberturas planas; 9. Simplicidade geométrica; 10. Harmonia com a natureza (Surana, 2020; Wagle, 2020; Mutuli, 2023; Hohenadel, 2022).

1. Materiais não convencionais: sendo a novidade e a transformação uma das principais características da arquitetura contemporânea, esta tende a utilizar e a combinar uma variedade de materiais, desde os convencionais (betão armado, aço, alvenaria, etc.) aos naturais e orgânicos (adobe, madeira, cânhamo, etc.);

2. Forma: em contraste com a retilinearidade e o minimalismo da arquitetura moderna, a arquitetura contemporânea tira partido das linhas curvas e cantos arredondados, exclusivamente ou em combinação com linhas retas;

3. Composição de volumes: a utilização de linhas curvas permite o desenho de espaços em que a composição de volumes é original;

4. Grandes envidraçados/paredes-cortina: amplos e múltiplos vãos, posicionados de forma estética e original, de modo a permitir vistas panorâmicas, abundante luz natural e, quando justificável, permitir ganhos solares (Ilustração 83);



Ilustração 83 – Tadao Ando: ampla janela ovalada em Il Teatro at Aljada, Sharjah (EAU). (Carlson, 2023)

5. Considerações ambientais: as considerações relacionadas com a eficiência energética, a geração e a utilização de energia solar fotovoltaica, a melhor integração com a envolvente, e outros aspetos relacionados com o desempenho ambiental dos edifícios, estão intrinsecamente relacionadas com a Arquitetura Contemporânea, indo frequentemente além dos padrões estabelecidos;

6. Arquitetura animada: é o termo utilizado para o conceito de trazer vida e animação aos edifícios, conseguindo efeitos visuais e sensoriais por via de uma sofisticada iluminação exterior, fachadas interativas ou de água sob a forma de fontes, jatos ou cascatas;

7. Interiores abertos e iluminados: a existência de amplas janelas e envidraçados, aliada a plantas arquitetónicas com poucas ou nenhumas paredes interiores, permite uma arquitetura inovadora com áreas interiores abundantemente iluminadas, amplas e funcionais (Ilustração 84);



Ilustração 84 – Áreas interiores iluminadas, amplas e funcionais. (Owoo, 2023)

8. Coberturas planas: as coberturas planas são uma das inovações construtivas proveniente do modernismo e disseminada pela arquitetura contemporânea. Para além de uma opção estética pode assumir também outros propósitos específicos, tal como sombreamento, terraços acessíveis ou jardins;

9. Simplicidade geométrica: em contraste com muitos dos edifícios icónicos – culturais, institucionais ou corporativos – os edifícios residenciais são conotados com linhas simples (fachadas retas ou curvas) com vista à obtenção de uma atmosfera e de uma estética distintas;

10. Harmonia com a natureza: a arquitetura contemporânea tem uma especial atenção à relação harmoniosa entre os edifícios e a natureza, quer através da transparência que dilui a barreira entre o exterior e o interior, de coberturas ajardinadas ou fachadas verdes, mas também pelos terraços, varandas ou *decks* que permitem o desfrute com a envolvente natural (Ilustração 85) (Surana, 2020; Wagle, 2020; Mutuli, 2023; Hohenadel, 2022).



Ilustração 85 – Logistics Center West (Países Baixos): cobertura verde, *deck* e envolvente natural. (Charles, 2023)

3.1.1.2. O CONTEXTO SOCIOECONÓMICO

Sendo um facto muitas vezes esquecido ou relegado para segundo plano, a arquitetura é um elemento relevante para o desenvolvimento económico e social, pela importância que o projeto e a construção de edifícios e infraestruturas têm na economia, e nas pessoas, organizações e comunidades (Evans, 2023).

Por definição, o âmbito da arquitetura tem sido associado principalmente com a estética, a funcionalidade e a construção de edifícios, no entanto, e cada vez mais, também como um instrumento para potenciar o valor económico de um determinado espaço (Satheesan, 2022):

> Architecture shouldn't just be perceived from an artistic point of view but should also be considered as an inherent part or element of the city's economic growth potential, social changes, and technological progress. Observing the practice of architecture as just a combination of objects and spaces where people coexist is the one of reasons why the potential of architecture is underestimated even today. (Satheesan, 2022).

De facto, a relação entre economia e arquitetura é complexa, multifacetada, interdependente e biunívoca. A arquitetura está no principio e no fim do processo: os fatores económicos influenciam a procura e a qualidade dos projetos arquitetónicos e das práticas construtivas, e estes, por sua vez, constituem um importante estímulo à economia (Evans, 2023).

Quando se considera o valor económico de um edifício ou empreendimento, os projetistas (e os promotores) devem levar em linha de conta o eventual impacto económico na zona e na região (investimento, emprego, atratividade), resultante, entre outros fatores, do valor arquitetónico do projeto, e de como tal pode afetar, num sentido ou noutro, a sua rentabilidade((Johnson, 2023; Pavithran, 2022).

Desse modo, ao incorporar considerações económicas no processo de conceção, e ao analisar os potenciais custos e benefícios das diferentes opções de projeto, os arquitetos, e outros agentes envolvidos, podem tomar decisões devidamente informadas, tendo em conta os custos laborais e dos materiais, da energia, dos métodos de construção, bem como de todos os demais recursos envolvidos (Evans, 2023; Johnson, 2023; Pavithran, 2022).

Compreender o conceito de Economia da Construção (*Building Economics*) é, portanto, um aspeto essencial para os arquitetos contemporâneos, permitindo conceber e

construir edifícios apelativos, de qualidade, e financeiramente viáveis: “Building economics is a critical aspect of architecture, as it involves the financial planning, budgeting, and management of construction projects.” (Evans, 2023).

Os princípios económicos devem ser usados para projetar edifícios sustentáveis, reduzindo os custos totais de um projeto por via da ecoeficiência (utilização eficiente dos recursos, incluindo abordagem de ciclo de vida) e ao identificar, e levar em linha de conta, também os respetivos impactes ambientais e sociais (Johnson, 2023).

Ao alargar esta perspetiva para o âmbito do desenvolvimento sustentável – relação entre o ambiente construído, o aspeto social e o desenvolvimento económico – pode-se introduzir o conceito de *arquitetura socioeconómica* que pode ser definida da seguinte maneira: “Socio-economic architecture is a discipline that combines the principles of architecture and economics to create buildings and spaces that promote social and economic development.” (Evans, 2023).

A arquitetura contemporânea pode ter um papel de destaque na promoção do desenvolvimento socioeconómico através da utilização de medidas de eficiência energética, da integração de energias renováveis e da utilização de materiais sustentáveis, enquanto cria espaços públicos, de trabalho e de habitação, de qualidade e acessíveis, suscetíveis de atrair turistas, investidores e residentes (Evans, 2023; Pavithran, 2022).

No entanto, existem alguns obstáculos devidamente identificados, para a adoção pelos arquitetos destes princípios: 1. Custo; 2. Falta de conhecimento; 3. Complexidade; Regulamentos e Legislação; 4. Resistência à mudança; 5. Recursos Limitados:

1. Custo: Os novos materiais e tecnologias mais sustentáveis podem, muitas vezes, terem um custo de aquisição superior aos convencionais, mercê de economias de escala e de externalidades;

2. Falta de conhecimento: frequentemente existe uma falta de conhecimento ou de divulgação, tornando difícil implementar as técnicas e as tecnologias sustentáveis;

3. Complexidade: devido à existência de vários aspetos (minimização de resíduos, gestão da água, eficiência energética, etc.), a sua incorporação nos projetos de arquitetura pode ser complexa;

4. Regulamentos e legislação**:** a ausência ou a proliferação de regulamentos e demais legislação, muitas vezes desadequados, pode ser desmotivante para aderir e implementar por parte dos arquitetos;

5. Resistência à mudança**:** Pode ser difícil implementar práticas mais sustentáveis nos projetos, por motivo da preferência por parte dos arquitetos, engenheiros ou clientes, dos materiais e técnicas convencionais;

6. Recursos limitados**:** a falta de tempo ou de financiamento pode tornar-se um impedimento para a prescrição e incorporação de inovação sustentável (Pavithran, 2022).

Outra influência socioeconómica dominante desde o final do seculo XX é a globalização, que conduziu à padronização e homogeneização da arquitetura contemporânea (Ilustração 86), sem levar em linha de conta a diversidade e as várias tradições culturais (Erandole, 2020).



Ilustração 86 – Homogeneização e globalização. (Erandole, 2020)

Tendo inicialmente sido responsável pela disseminação do modernismo europeu pelo resto do mundo, o fenómeno da globalização continua a ter um impacto crescente sobre

os estilos arquitetónicos, com a respetiva homogeneização e o desaparecimento de estilos vernaculares ou técnicas construtivas locais, em detrimento da internacionalização (Evans, 2023; Stern, 2011, p. 16).

> Globalization has increased the frequency with which architects are encouraged to ignore the history of places and local vernaculars, for it would appear that those vernaculars lose their advocates in the face of pressures in and by developing countries to occupy important places on the world stage and the demand for deracinated icons of modernity, be they constructed for institutional or commercial purposes (Stern, 2011, p. 17).

Com efeito, a preservação das distinções culturais sem impor um conceito pré-determinado de arquitetura só será efetivada no respeito pelas tradições locais e recorrendo ao potencial das novas técnicas e tecnologias, de forma a dar resposta os problemas da atualidade (Stern, 2011, p. 18).

Contudo, é expectável que este fenómeno possa, também, contribuir para a disseminação da sustentabilidade, o qual, como já mencionado anteriormente, é uma característica da arquitetura contemporânea, a par da utilização das novas tecnologias e do respeito devido pelas tradições, história e identidade dos diferentes povos e nações (Evans, 2023; Erandole, 2020; Majerska-Palubicka, 2020, p. 5).

3.1.1.3. PROJETOS DE REFERÊNCIA

De entre todos os arquitetos e projetos contemporâneos, não será fácil salientar aqueles mais relevantes, desde logo tendo em conta os diferentes contextos em que inserem e a finalidade a que se destinam.

Contudo, existe uma aceitação generalizada em considerar alguns arquitetos e respetivas obras como referências da arquitetura contemporânea, tais como: John Utzon, Jean Nouvel, Renzo Piano, Frank Gehry, Rafael Viñoly, Zaha Hadid, Tadao Ando, Shigeru Ban, Santiago Calatrava, Rem Koolhaas, Rick Joy, Peter Pennoyer, Norman Foster, (Hohenadel, 2022; Mutuli, 2023), Siza Vieira, Souto Moura, entre muitos outros. .

Tendo em conta as limitações e os objetivos deste trabalho, o autor dedica, por defeito, atenção apenas a três destes nomes, e exclusivamente a uma das suas obras, tidas como das mais representativas: 1. Frank Gehry (The Guggenheim Museum, Bilbao, Espanha); 2. Zaha Hadid (Heydar Aliyev Cultural Center, Baku, Azerbaijão); 3. Rem Koolhaas (CCTV Headquarters, Beijing, China):

1. Frank Gehry: The Guggenheim Museum, Bilbao, 1997



Ilustração 87 – Fachada do Guggenheim Museum. (Sokol, Mafi e McLaughlin, 2023)

Desde a sua inauguração, em 1997, o Guggenheim Museum foi alvo de especial atenção, nomeadamente devido ao forte impacto socioeconómico (durante os primeiros três anos, foi visitado por quatro milhões de turistas), tendo sido um dos mais importantes fatores da recuperação de Bilbao (*The Bilbao effect*) aquando da transição do paradigma económico. Atualmente, constitui um dos ativos mais importantes da cidade, com cerca de um milhão de visitantes anualmente, sendo que dois, em cada três, são estrangeiros (Bourbois, 2023; Pagnotta, 2013; Ferreira, 2022; Koumari, 2021; Lorente, 2023, pp. 1, 2).

Com mais de 50 metros de altura e facilmente reconhecido pela suas formas biomórficas e paramétricas (em oposição ao antropomorfismo pós-modernista), o edifício consiste num conjunto de vários módulos interligados, revestidos por 33.000 placas ultrafinas de titânio (0,38 mm) como se de uma pele ou escamas se tratasse, que combinam com o calcário e com as paredes-cortina de vidro (Ilustração 87) (Bourbois, 2023; Ferreira, 2022).

O complexo desenvolve-se ao longo de uma superfície total de 24.000 m^2, dos quais 9.000 m^2 são alocados e distribuídos por dezanove galerias, das quais, dez são revestidas exteriormente em calcário, e as restantes com titânio, conferindo um efeito visual característico.

As formas orgânicas e disruptivas dos módulos construtivos só foram possíveis de calcular e de executar, com o auxílio do *software* Computer Aided Three-dimensional Interactive Application (CATIA), como suporte à arquitetura paramétrica e à engenharia estrutural, uma vez que cada componente não só é autoportante, mas também especialmente dimensionado e posicionado (Pagnotta, 2013; Ferreira, 2022; Koumari, 2021).

2. Zaha Hadid: Heydar Aliyev Cultural Centre, Baku, 2013



Ilustração 88 – Alçado principal do Heydar Aliyev Cultural Centre – Baku, Arzeibeijão. (Zaha Hadid Architects, 2023)

Como oposição ao legado do modernismo soviético, o Azerbaijão tem investido fortemente, desde a sua independência, no desenvolvimento e modernização das suas infraestruturas, urbanismo e ambiente construído, do qual é exemplo o Heydar Aliyev Cultural Centre concebido para exprimir a sensibilidade e o otimismo da nação (ArchDaily, 2013; Zaha Hadid Architects, 2023).

Um dos aspetos mais desafiante e distintivo é o desenvolvimento arquitetónico da envolvente (Ilustração 88) feita a partir de painéis de poliéster reforçados com armadura de fibra de vidro , e que aparenta ser uma forma contínua e homogénea, sem juntas nem estrutura de suporte, tornada possível graças a uma engenharia complexa e sofisticada, facultada pela computação paramétrica avançada (Giovannini, 2013; ArchDaily, 2013).

3. Rem Koolhaas: CCTV Headquarters, Beijing, 2012

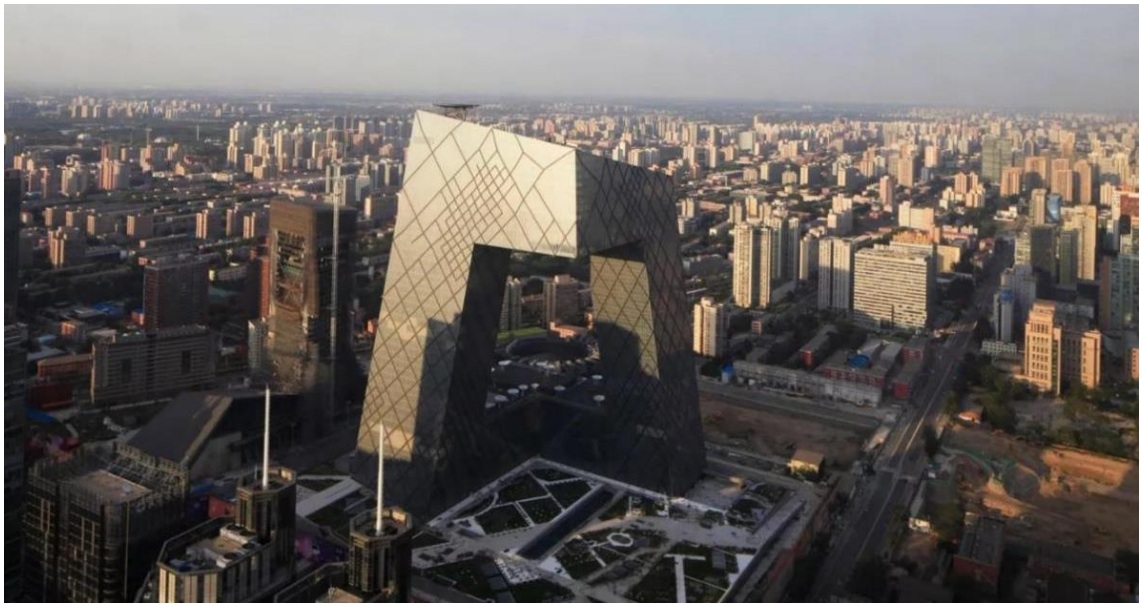


Ilustração 89 – Vista geral do edifício da sede da CCTV – Pequim, China. (OMA OFFICE WORK, 2023)

O edifício da sede da CCTV (televisão chinesa), com 54 pisos, 234 m de altura e uns impressionantes 352.000 m^2 de área, representa uma reinvenção da típica construção em altura, ligando as duas torres que constituem o complexo - numa experiência tridimensional desconstrutivista - através de uma desafiante consola de 75 metros de vão.(Ilustração 89).

Esta estrutura em consola – que reforça o sentido de comunidade, permitindo a circulação de pessoas entre duas torres distintas – é o resultado da colaboração entre engenheiros e arquitetos, e serve de suporte estrutural a uma unidade de 10 pisos de altura, que além da administração da empresa, alberga vários outros serviços como restaurantes, cafés e um miradouro, numa fachada revestida a vidro serigrafado, que minimiza os ganhos solares e suaviza a forma.

Ao mesmo tempo, as solicitações estruturais são aproveitadas e valorizadas arquitetonicamente, podendo-se apreciar as zonas de maior ou menor esforço através da existência de maior ou menor densidade de barras estruturais (OMA OFFICE WORK, 2023; ArchDaily, 2012; Griffiths, 2022).

3.1.2. ARQUITETURA, SUSTENTABILIDADE E AMBIENTE

As respostas da arquitetura às ameaças ambientais e aos desafios da sustentabilidade dependem, em primeira linha, da utilização eficiente dos recursos naturais. Na prática, tal significa implementar critérios de ecoeficiência (a interseção da componente ambiental e económica da sustentabilidade) nas soluções construtivas, previamente avaliadas e prescritas na fase de conceção e de projeto (Tietz, 2008, p. 110).

Sendo a questão do ambiente, da sustentabilidade e do desenvolvimento sustentável, (um dos principais problemas com que a Humanidade atualmente se debate), torna-se incontornável não realçar a enorme responsabilidade que a arquitetura tem no avolumar do problema, ou, em alternativa, contribuir para a sua resolução.

Como já referido anteriormente, o setor da arquitetura pode representar até cerca de metade do consumo dos recursos naturais do planeta (considerando materiais, energia, água e perda de terra arável), para além do impacte da poluição, resíduos de construção e demolição, sendo ainda um fator negligenciado da saúde humana e bem-estar (Tietz, 2008, p. 111; Edwards, 2001, p. 13):

> A arquitetura moderna, surgida para combater o desperdício inútil de decorações artificiais impostas pelo gosto eclético do século XVIII, adoptada pelo capitalismo em ascenção para a sua ética de austeridade e de simplicidade, transformou-se, paradoxalmente, numa arquitetura do esbanjamento energético, num gigantesco mecanismo de consumo dos recursos limitados existentes na terra, que, ainda mais, requer a contínua renovação do seu efémero património (Portoghesi, 1985, p. 28).

Tradicionalmente (e, em grande medida, ainda correntemente), os projetos de arquitetura têm sido valorizados em função da estética, espaço, forma, elementos construtivos, cor, entre outros, tipicamente associados com a arte ou a técnica, mas sem os considerar do ponto de vista dos ecossistemas e dos respetivos impactes, originados a partir das interações e dos fluxos de energia e de matéria.

Do ponto de vista da ecologia, os seres humanos e o ambiente construído são parte integrante de ecossistemas. Nesta perspetiva, um edifício é constituído por componentes bióticos (orgânicos) e abióticos (inorgânicos), sendo estes últimos, claramente predominantes no atual paradigma (Yeang, 2007, pp. 37–39).

Na União Europeia (UE27), e no período compreendido entre 2003 e 2011, foram consumidos – anualmente e para efeitos de obra nova e remodelação – entre 1.200 a 1.800 milhões de toneladas de materiais de construção, sendo que o betão (armado e

simples), os inertes (excluindo os necessários à execução do betão) e as alvenarias (tijolos) representavam cerca de 90% da totalidade da massa (Kg) dos materiais utilizados, seguidos do aço (2,5%) e da madeira (1,6%) (Herczeg *et al.*, 2014, pp. 20, 21).

Atualmente, as projeções da Housing Europe Observatory e da Metabolic`s Urban Mining Model para a UE27+UK, apontam para a necessidade de 9.020 milhões de toneladas de materiais de construção até 2030, das quais, os sete países com maior atividade e procura (Alemanha, França, Reino Unido, Itália, Polónia, Espanha e Países Baixos) reclamam para si cerca de 80% dessa quantidade (Ilustração 90) (Haisma *et al.*, 2023, pp. 8, 11).

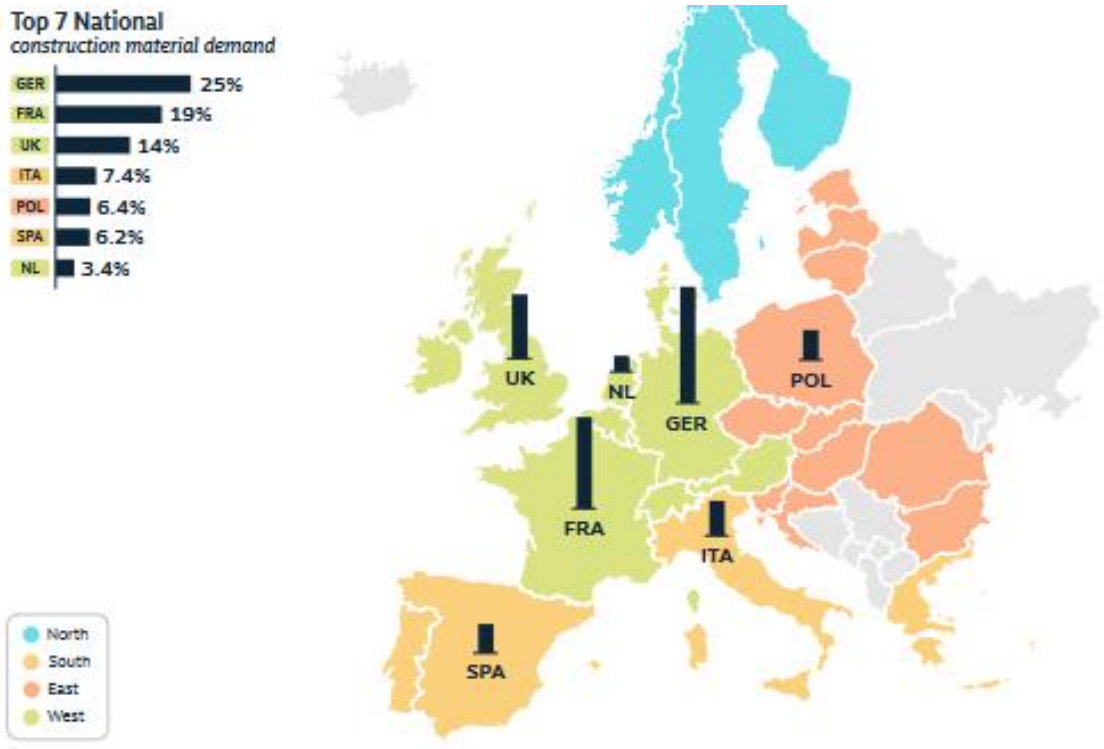


Ilustração 90 – Os sete países europeus com maior procura de materiais de construção. (Haisma *et al.*, 2023, p. 8)

Neste grupo, os quatro países que constituem a Europa Ocidental (Alemanha, França, Reino Unido e Países Baixos), representam aproximadamente dois terços da procura europeia de materiais, com uma quota de 25% para a Alemanha, 19% para a França e 14% para o Reino Unido (Ilustração 101) (Haisma *et al.*, 2023, p. 8).

Na Europa, a nova construção continua a ser predominante, com 97,4% dos materiais (medidos em unidade de massa) a estarem alocados à obra nova, e apenas 2,6% à renovação e à reabilitação. Nesta, os edifícios residenciais de várias tipologias

representam cerca de 70%, exatamente o mesmo valor da percentagem de utilização de betão (o material de construção mais utilizado), principalmente para efeitos estruturais (72%), e que constitui o principal fator para a massa e o impacte ambiental (Ilustração 91).

> Western Europe accounts for 66% of all material demand in Europe. Germany, France, and the UK have the highest material demand. Together, the seven countries with the highest material demand represent 81% of the total demand until 2030. In a business-as-usual scenario 9,020 Mton of construction materials will be needed until 2030. The majority of materials being used for development of new construction (97.4%) are used for residential buildings, with a share of 70.3%. Concrete stands out as the most impactful building material, playing a crucial role in the building's structure. The structure and the skin are identified as the most impactful layers by mass and environmental impact (ECI) (Haisma *et al.*, 2023, p. 11).

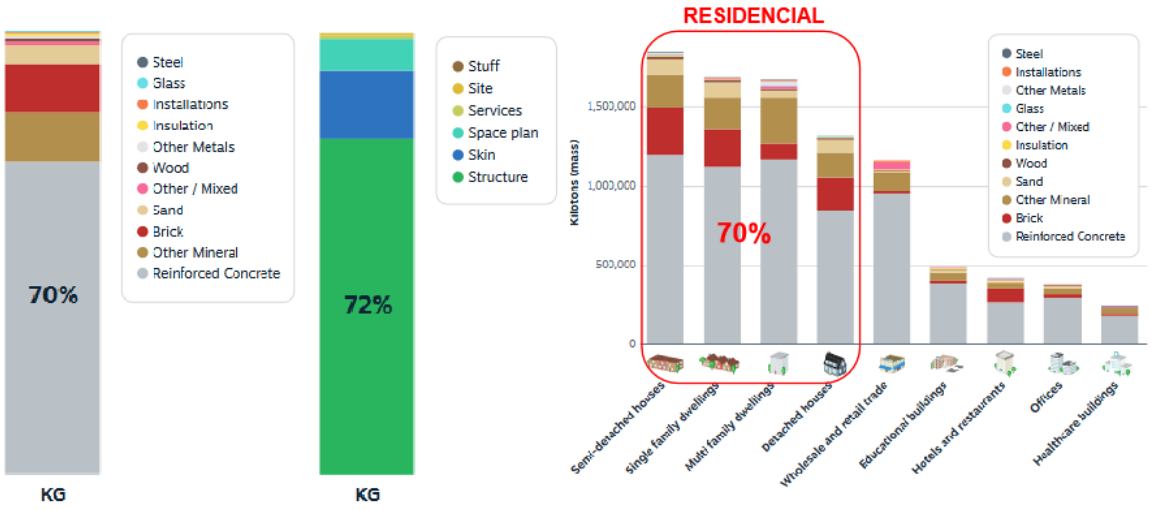


Ilustração 91 – Procura de materiais de construção por unidade de massa (Kg), camada construtiva e tipologia de edifícios na UE27+UK. ([Adaptado a partir de:] Haisma *et al.*, 2023, pp. 9, 10)

Contudo, e na hipótese de ocorrer uma substituição de 50% dos materiais convencionais para materiais alternativos *bio-based* no setor residencial da UE27+UK, aplicados principalmente nas camadas construtivas de estrutura e fachada, tal significaria uma eventual redução da pegada de carbono do setor até 18%, no período 2023 - 2030.

Tal é resultante, não só do facto de serem libertadas menos emissões durante a fase de produção e montagem, mas também devido à sequestração levada a cabo pelos materiais bióticos, como o CLT (estrutura) ou a cortiça (fachada), numa redução total prevista de 37 megatoneladas de CO_2 eq (Haisma *et al.*, 2023, p. 13).

Segundo Kibert (2008), a construção sustentável deve não só considerar e integrar a função dos ecossistemas, ao nível do conceito e de uma arquitetura consciente, mas

também como utilizador de serviços prestados pela natureza. A integração entre o ambiente construído e os ecossistemas permite substituir, com vantagem, sistemas convencionais ou tecnologias complexas no sentido de controlar "[…] external building loads, processing waste, absorbing stormwater, growing food, and providing natural beauty, sometimes referred to as *environmental amenity*." (Kibert, 2008, p. 9), em linha com os princípios regenerativos da economia circular.

Desta forma, a natureza deve passar a ser vista na ótica da prestação de serviços ao ambiente construído, serviços que devem ser quantificados e valorizados, mediante a aplicação do conceito de *capital natural* e, dessa forma, promover a construção sustentável, circular e regenerativa, tirando cada vez mais partido dos materiais renováveis e das soluções baseadas na natureza (Ilustração 92) (A collaboration of leading figures in the built environment, 2023, pp. 8, 9).

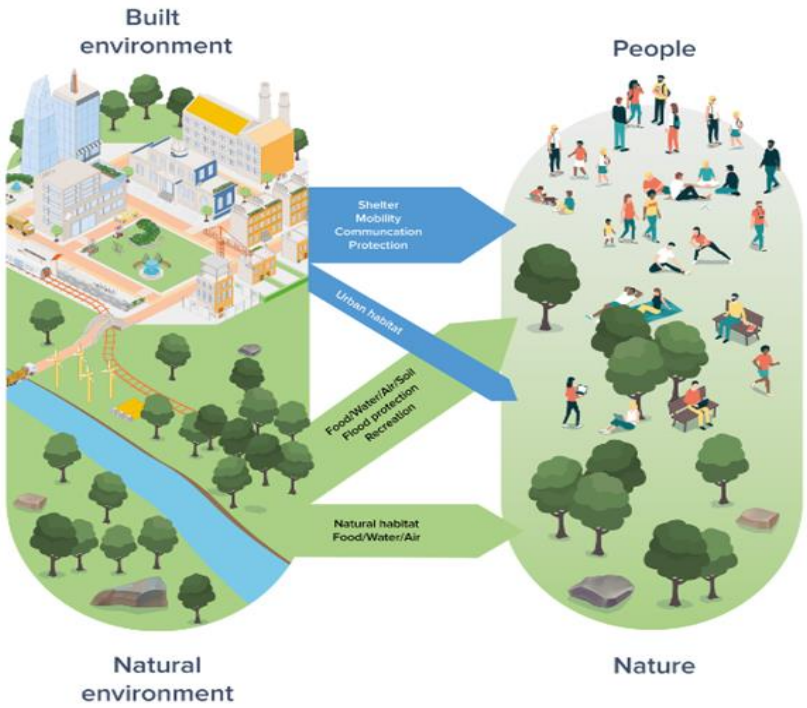


Ilustração 92 – Relação ente ambiente construído e natureza. (A collaboration of leading figures in the built environment, 2023, pp. 8, 9)

3.1.2.1. SUSTENTABILIDADE: UM NOVO PRESSUPOSTO

Tendo em conta que a população mundial deverá atingir o valor de 9.7 mil milhões de habitantes em 2050, concentrada principalmente em cidades e megacidades, as emissões de carbono derivadas da construção de edificações, poderão afetar entre 35

a 60% do *budget* de emissões disponível para a limitação do aumento de temperatura média global máxima em + 2º C até final do século, como já referido.

Por essa razão, a seleção e a utilização de materiais de construção adequados são um fator crítico no combate às alterações climáticas antropogénicas, devido ao facto de os edifícios e as construções poderem constituir um importante instrumento para a redução e sequestração de carbono, desde que para tal devidamente projetados e construídos com materiais biogénicos (Ilustração 93) (Churkina *et al.*, 2020, pp. 269, 270); (Organschi, 2025, p. 14).

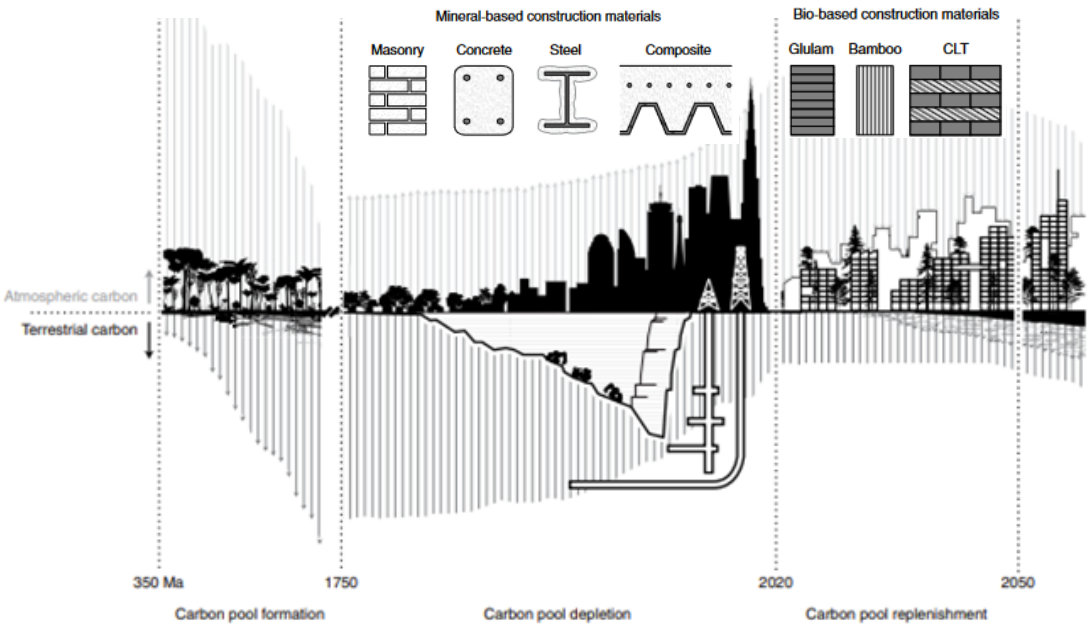


Ilustração 93 – A importância dos materiais renováveis *bio-based* e das cidades na sequestração de carbono da atmosfera. ([Adaptado de:] Churkina *et al.*, 2020, p. 270)

A captura e o armazenamento de carbono pelo edificado é um exemplo de que a sustentabilidade não deve ser tratada como algo extrínseco e independente ao projeto de arquitetura, nem dos restantes agentes do setor (Organschi, 2025, p. 14).

Desde logo, e como critério qualitativo, porque as características de função, qualidade e impacte dos edifícios têm a sua contrapartida na aferição das componentes sociais, económicas e ambientais, tornando mensurável a sua efetiva sustentabilidade.

De facto, um projeto não poderá ser sustentável se não cumprir a sua função eficazmente (critério económico), se não for durável (critério ambiental) ou se não for devidamente utilizado (critério social): a tríade vitruviana *firmitas*, *utilitas* e *vetusta*s tem,

deste modo, o seu paralelo contemporâneo na tripla linha de base da sustentabilidade (Ilustração 94) (Edwards, 2008, p. 161).

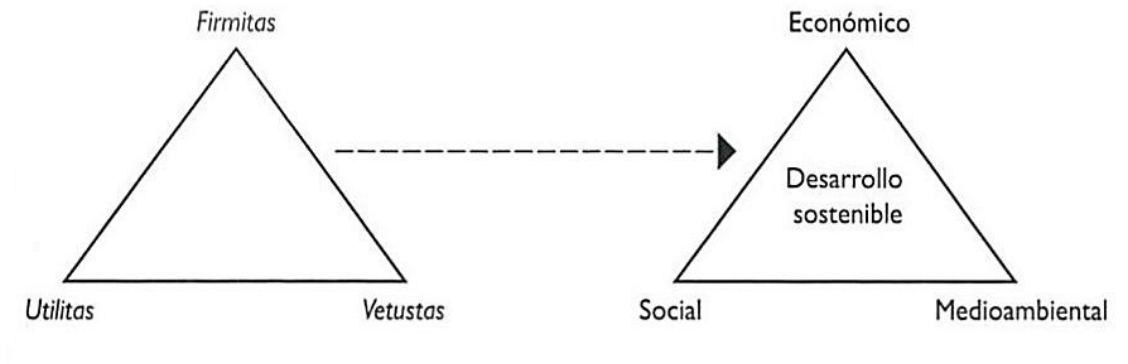


Ilustração 94 – A tríade vitruviana e a tripla linha de base da sustentabilidade. (Edwards, 2008, p. 161)

De referir que, para além da arquitetura contemporânea, onde a sustentabilidade é um conceito distintivo e central, também a arquitetura moderna, à época, abraçou o tema da ecologia e do ambiente, através do trabalho de alguns dos seus máximos expoentes: John Ruskin (1860); William Morris (1880); Patrick Geddes (1910); Frank Lloyd Wright (1930); Lewis Mumford (1948); Buckminster Fuller (1965), entre outros (Edwards, 2008, p. 45):

> Las tres dimensiones de la sostenibilidad (medioambiental, social y económica) han impulsado el crecimiento y la consolidación de la arquitectura. El proyecto ecológico se ha convertido en una gran fuerza regeneradora de la arquitectura en la última década, Sus principios fundamentales han sido sacudidos por corrientes ecológicas que influyen en todos los aspectos de la construcción, desde la ingeniería de los edificios hasta el diseño y la forma del espacio interior o la selección de los materiales. Aunque sería posible considerar la arquitectura sostenible como un estilo (de hecho, los edificios verdes son fáciles de identificar), se trata de algo más. Es una reordenación de los principios básicos del proyecto y de la tecnología, y por lo tanto reconfigura todos los elementos esenciales de la arquitectura (Edwards, 2008, p. 48).

Um marco do reconhecimento do papel da sustentabilidade na arquitetura foi o UIA/AIA World Congress of Architects**,** ocorrido em 1993, em Chicago (EUA), sob a égide da União Internacional dos Arquitetos – UIA, juntamente com o American Institute of Architects – AIA, onde foi elaborada a **Declaration of Interdependence for a Sustainable Future**, que articulava um conjunto de princípios e práticas arquitetónicas, alinhadas com a sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável (Kibert, 2008, p. 47).

Tais princípios foram reiterados e reforçados em 2014, no UIA World Congress, realizado em Durban (África do Sul), com a **Declaration 2050 Imperative**, onde se pode ler:

> […] Recognizing the architects' central role in planning and designing the built environment, and the need to reduce carbon emissions to zero by 2050 and provide equal access to shelter, we commit to promote the following actions; • Plan and design cities, towns, urban developments, new buildings, to be carbon neutral, meaning they use no more energy over the course of a year than they produce, or import, from renewable energy sources. • Renovate and rehabilitate existing cities, towns, urban redevelopments and buildings to be carbon neutral whilst respecting cultural and heritage values. • In those cases where reaching carbon neutral is not feasible or practical, plan and design cities, towns, urban developments, new buildings, and renovations to be highly efficient with the capability to produce, or import, all their energy from renewable energy sources in the future. • We commit to the principle of engaging in research and setting targets towards meeting the 2050 goal. • Advocate and promote socially responsible architecture for the community • Develop and deliver equitable access to the information and tools needed to: plan and design sustainable, resilient, inclusive and low-carbon/zero carbon built environments; design no-cost/low-cost, on-site renewable energy and natural resources systems (e.g., passive heating and cooling, water catchment and storage, solar hot water, daylighting, and natural ventilation systems) (Architecture 2030, 2014).

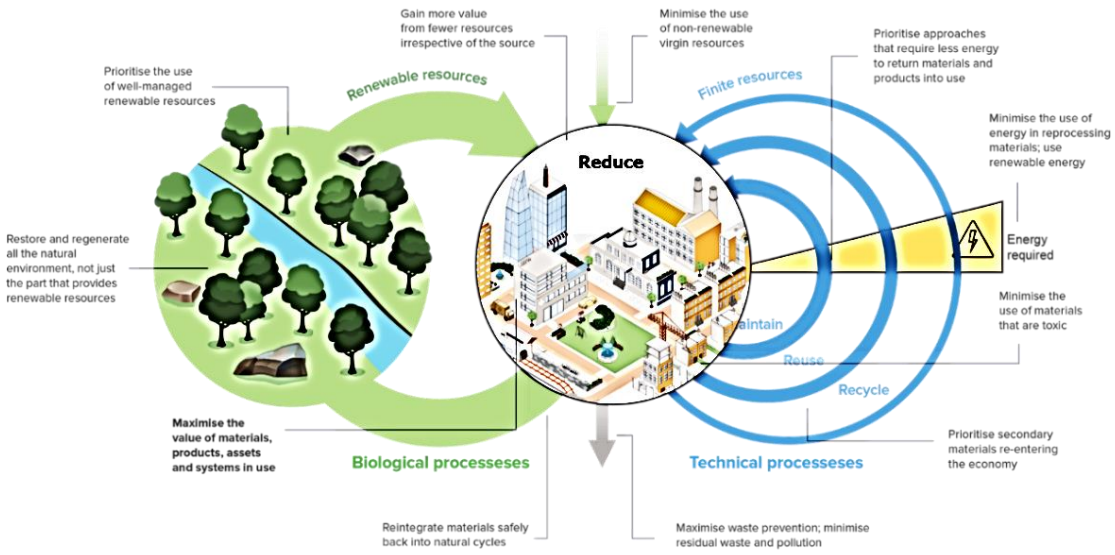


Ilustração 95 – Diagrama representativo da relação entre a economia circular e o ambiente construído. (A collaboration of leading figures in the built environment, 2023, pp. 6, 7)

A construção circular surge como prioridade para a arquitetura, tendo em conta o preconizado na Agenda 2030 e nos ODS, com o objetivo de maximizar o valor da utilização dos materiais, produtos e sistemas do ambiente construído (Ilustração 95).

Valor que, em última análise, é definido pelos resultados sociais, ambientais e económicos (A collaboration of leading figures in the built environment, 2023, pp. 6, 7).

Deste modo, pode-se afirmar que a sustentabilidade tem a capacidade de influenciar o projeto arquitetónico, de desafiar a visão fragmentária e redutora e de promover: a) Enfoque multidisciplinar; b) Pensamento ecológico; c) Visão ética do papel do arquiteto; d) Nova linguagem estética; e) Valores comunitários, sociais e culturais (Edwards, 2008, pp. 48, 49).

3.1.2.2. IMPACTE AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS

Como já referido anteriormente, os edifícios e demais construções, têm – como todos os produtos ou serviços – um determinado impacte ambiental, tendo em conta a utilização de matérias-primas, a manufatura e o transporte de materiais e produtos, da construção ou montagem, da sua utilização, dos trabalhos de manutenção e reabilitação, da demolição ou desconstrução seletiva e do destino a dar às partes, componentes, ou, eventualmente, resíduos.

De facto, as atividades construtivas podem ser vistas como uma transferência de fluxos de recursos materiais e energéticos, do exterior para o interior do edificado, originando interações (impactes) ambientais, em maior ou menor grau (Yeang, 2007, pp. 117, 118):

> De manera holista, los recursos que se introducen en el medio edificado están relacionados, y tienen una dependencia recíproca, con la descarga de productos, con el conjunto de operaciones que tienen lugar en el medio edificado y con las limitaciones de los ecosistemas y recursos de la Tierra (Yeang, 2007, p. 118).

O ambiente edificado (urbano e industrial) pode ser qualificado como um dos mais intensivos e impactantes que existem, consumindo porções substanciais de recursos naturais (incluindo espaço), para a sua construção e funcionamento, contribuindo, de forma considerável, com resíduos para a biosfera (Amado, 2025, pp. 17, 18).

Ao aceitar que a extração e transformação dos recursos naturais e energéticos implicam alterações nos ecossistemas (incluindo a depleção e a escassez dos recursos não-renováveis), a obra deve ser encarada como uma forma de gestão dos recursos energéticos e materiais, fazendo parte integrante do ecossistema, em vez de ser tratado como um “objeto estático e imutável” (Yeang, 2007, p. 44). .

Com esta conceção, o projetista vê-se obrigado a considerar o edificado como um elemento inserido e subordinado à biosfera, devendo estar consciente e atento às consequências (impactes) que vai originar, resultantes da sua intervenção como arquiteto e do inerente processo construtivo (Ilustração 96) (Yeang, 2007, pp. 45, 47).

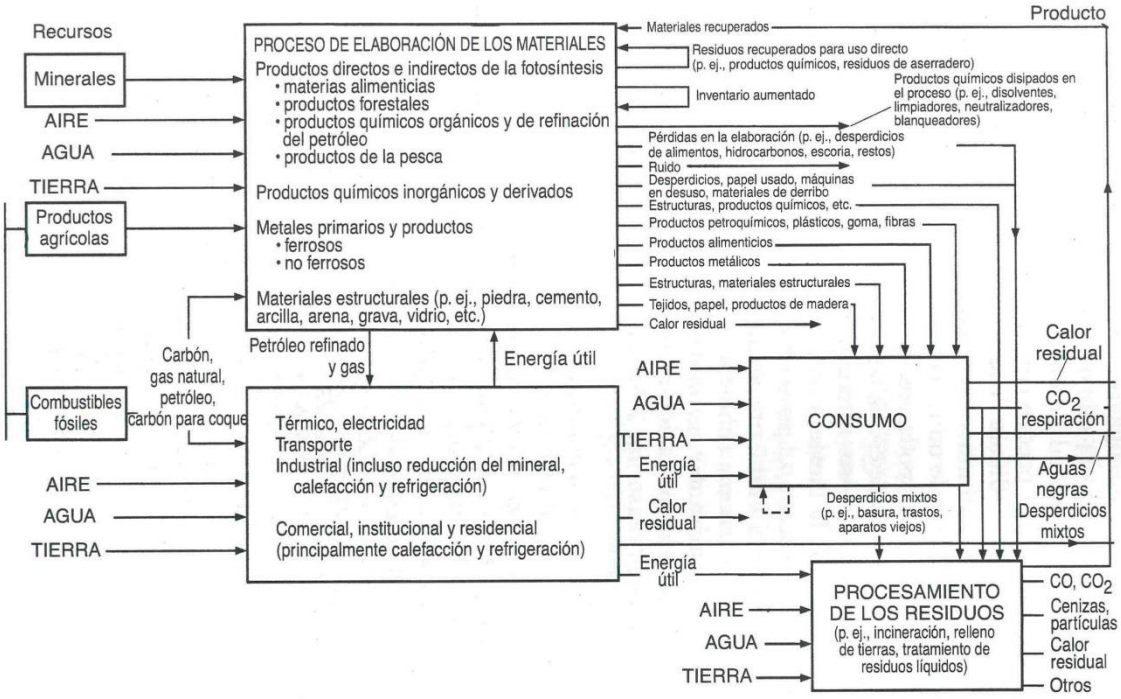


Ilustração 96 – Fluxos de recursos (*Inputs*) e produtos (*Outputs*) no ambiente construído. (Yeang, 2007, p. 46)

Os diferentes elementos da arquitetura, nomeadamente os edifícios, são grandes consumidores de materiais (tabela 20): estima-se que cerca de 60% de todos os recursos mundiais são destinadas à construção, nos quais se deve incluir a energia (50%) e a água (50%).

Sendo um facto por vezes esquecido, a ocupação do solo, no entanto, reveste-se de extrema importância ambiental e ecológica: 80% da melhor terra arável está afeta a atividades relacionadas com o setor, deixando de ser utilizada para fins agrícolas (Edwards, 2008, p. 24).

Ao longo das várias fases do ciclo de vida dos edifícios, vão sendo utilizados recursos, os quais, por sua vez, originam e determinam os respetivos impactes ambientais, que são entendidos como efeitos quantitativos ou qualitativos associados (Herczeg *et al.*, 2014, p. 16).

Tabela 20 – Quantidades médias de materiais (kg/m^2 área piso bruta) utilizados em diferentes tipologias de edifícios.

Building type	Material total	Gravel, sand	Asphalt	Concrete	Masonry	Wood	Metal (Fe, Al, Cu)	Gypsum, glass, ceramics	Mixed materials
Detached house	2253	333	10	846	708	54	21	148	133
Apartment	1687	151	10	728	509	31	19	135	103
Office	1836	184	20	977	310	27	47	128	143
Retail	1896	190	21	1009	321	28	48	132	147
Hotel	1969	198	22	1047	333	29	50	137	153
Industrial/ warehouse	1604	305	29	871	179	22	57	76	65
Agricultural	1350	371	19	477	304	63	23	67	26
Infrastructure	2994	844	106	1361	369	24	38	122	131

Fonte: König *et al.*(2010, p. 51)

De notar que na UE27, cerca de 50% dos recursos são utilizados como materiais para construção de habitação, correspondendo uma quota respetiva de 65% aos inertes (areia, brita, cascalho, etc.) e de 20% aos metais (ferro, alumínio, cobre, etc.) (Herczeg *et al.*, 2014, p. 19).

Sem dúvida que a afetação de recursos naturais para os edifícios e infraestruturas é um problema nem sempre devidamente considerado, sendo que questões à escala global, como as alterações climáticas, a perda de biodiversidade ou a desflorestação, entre outras, estão diretamente relacionadas com a utilização extensiva de materiais (Herczeg *et al.*, 2014, p. 19).

Em linha com esta afirmação, de notar que, na União Europeia (UE25), ao contrário do que se poderia supor, as habitações familiares eram os principais responsáveis pelos impactes ambientais na construção, sendo que os edifícios existentes são predominantes em relação às construções novas, principalmente devido aos impactes gerados na fase de utilização (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, pp. 58, 59).

Para edifícios residenciais novos, a fase de utilização também é importante, no entanto, e em contraste com os edifícios existentes, a fase de construção também é relevante, podendo variar entre 34,3% e 8,3%, para os indicadores Potencial de Eutrofização e Potencial de Criação de Ozono Fotoquímico, respetivamente (Ilustração 97) (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 59).

A fase de fim-de-vida assume uma relevância menor, o que, na nossa opinião, evidencia a prevalência da economia linear na conceção e construção de edifícios. Segundo o estudo Environmental improvement potential of residential buildings – IMPRO building

(2008), esta fase implica uma variação entre (-1,7%) e (+3,2%) do total dos impactes ambientais.

De acordo com os vários indicadores considerados, assume valores negativos ou créditos para energia primária e potencial de depleção de ozono, e positivos ou cargas (*burdens*) para os restantes (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 60).

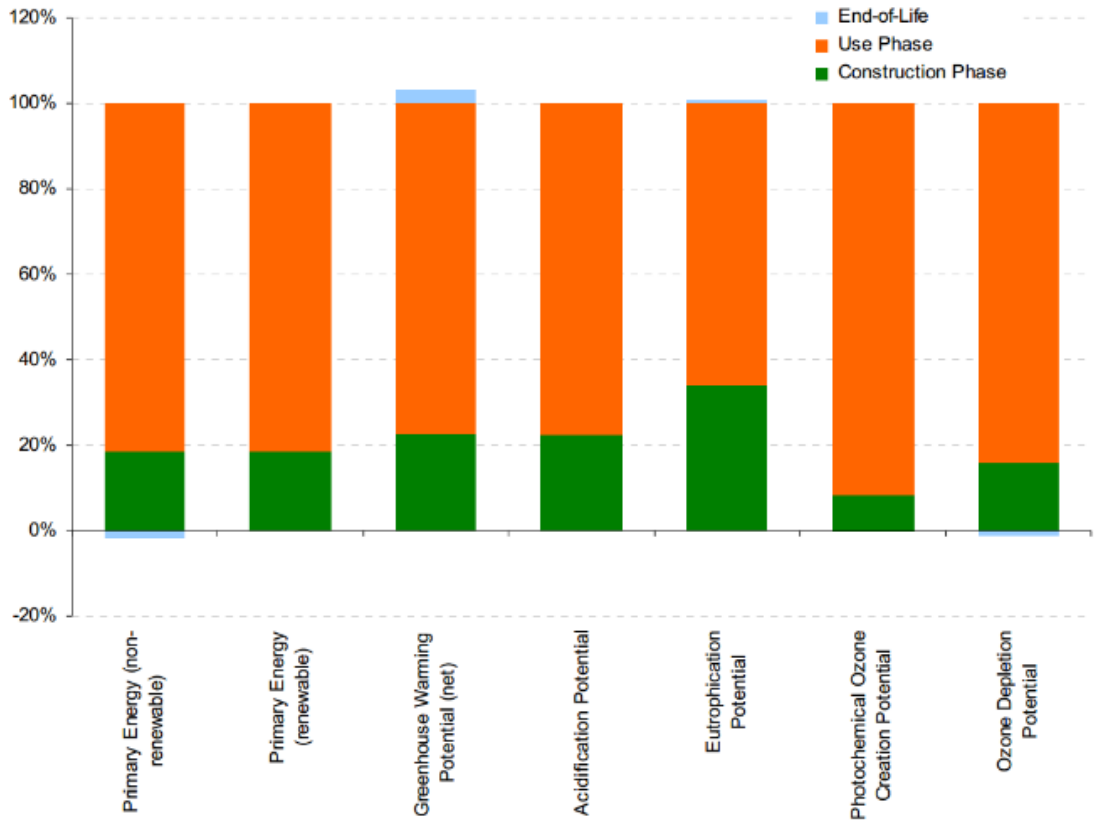


Ilustração 97 – Impacte ambiental padrão de edifícios residenciais novos na UE 25. (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 60)

Em média, o impacte total da fase de construção (que inclui as fases de extração de matérias-primas e de produção de materiais e produtos de construção) constitui cerca de 20% do impacte da totalidade do ciclo de vida, sendo a fase de utilização (que integra não só o consumo de energia, mas, também, os impactes derivados das operações de renovação e manutenção) a predominante (Ilustração 97) (Herczeg *et al.*, 2014, p. 33).

Os impactes ambientais da fase de utilização, principalmente devidos ao consumo de energia operacional, são estimados em cerca de quatro vezes superiores aos da fase de construção (incluindo o carbono incorporado dos materiais e produtos de

construção), sendo expectável que, devido às medidas de eficiência energética que têm vindo a ser regulamentadas e implementadas, esta relação venha a ser substancialmente alterada no curto e médio prazo (Herczeg *et al.*, 2014, p. 34).

Na UE25 (e nada leva a crer que se tenha alterado para a UE27), a maioria dos impactes do setor eram devidos a edifícios residenciais unifamiliares (± 64%), seguido dos multifamiliares (± 32%) e, a larga distância, dos edifícios em altura (*high-rise buildings*) (±4%), refletindo a influência dos edifícios existentes, onde a fase de utilização ou operacional tem grande relevo, para as funções de aquecimento e/ou arrefecimento, predominante conforme as zonas geográficas consideradas (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, pp. 61, 62)..

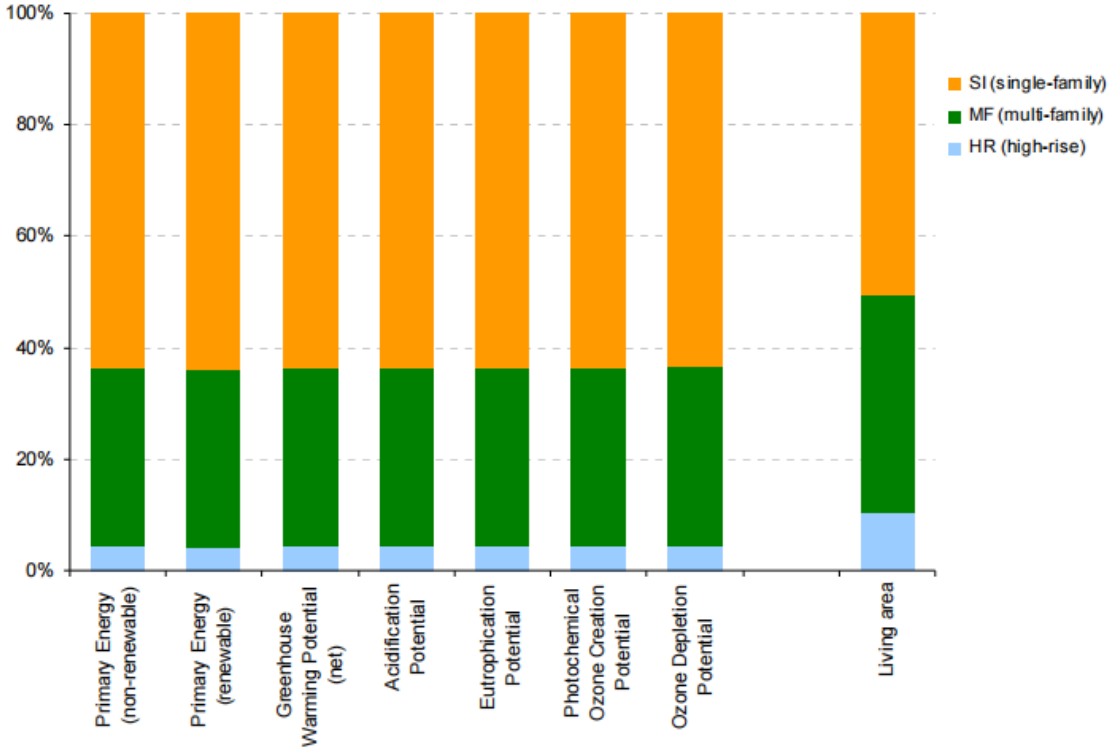


Ilustração 98 – Contribuição relativa para o impacte ambiental dos edifícios na UE25 de acordo com a tipologia. (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 62)

De salientar, que a proporção do impacte dos edifícios unifamiliares é superior à da respetiva área habitável, devido às fortes cargas ambientais por unidade de área existentes nesta tipologia, inversamente ao que acontece com os restantes (Ilustração 98) (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 62).

Entre as várias zonas geográficas europeias consideradas no estudo – zona 1 (Sul da Europa), zona 2 (Europa Central) e zona 3 (Norte da Europa) – existe uma grande variação na temperatura média mensal, assim como na radiação solar difusa e global, o que determina a extrema importância da qualidade do envelope do edifício, nomeadamente, a extensão da sua superfície (área) e as respetivas características, nomeadamente o isolamento e a inércia térmica, entre outras.

É de grande utilidade, tendo em vista a minimização do impacte ambiental, definir o rácio volumétrico do envelope, tido como o quociente entre a superfície de transferência de calor e o volume total do edifício. Verifica-se que os edifícios unifamiliares têm, em geral, um rácio superior ($0.8 \leq X<1,2$ m^2/m^3) ao dos multifamiliares ($0.4 \leq X < 0,8$ m^2/m^3) e, estes, por sua vez, superior ao dos edifícios em altura ($< 0,4$ m^2/m^3) (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 63).

Este rácio reflete a grande importância deste elemento construtivo, relativamente ao consumo de energia para efeitos de aquecimento e arrefecimento (e das eventuais perdas), por unidade de área habitável, impactando profundamente a fase operacional do edifício, e destacando a importância da conceção ambientalmente orientada dos edifícios residenciais unifamiliares para a sustentabilidade do ambiente construído (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 63).

Para a zona 1, onde Portugal está integrado, os pontos críticos (*hotspots*) para edifícios residenciais unifamiliares existentes são a cobertura, as paredes exteriores e a ventilação. Nos edifícios novos, o aspeto mais impactante é a ventilação, seguida da cobertura e das paredes exteriores.

No caso de edifícios multifamiliares, a ventilação e as paredes exteriores são os elementos construtivos mais impactantes, em qualquer dos casos (obra nova ou existente), assim como nos edifícios em altura já existentes. Neste caso, a ordem inverte-se para os novos edifícios, com predominância das paredes exteriores, seguida da ventilação.

Também as perdas de calor através das janelas são importantes no caso dos edifícios existentes multifamiliares e em altura. No caso de existentes unifamiliares, a cobertura é igualmente importante, sendo que restantes elementos construtivos (pavimentos, paredes interiores, tetos duplos, etc.), são relativamente menos importantes (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 65).

A fase de construção, embora represente apenas cerca de 20% do total dos impactes, reveste-se de especial interesse para este trabalho. A Ilustração 99 representa a importância relativa dos impactes ambientais para os diferentes elementos (fundações, pavimentos e tetos duplos, paredes interiores e exteriores, cobertura e janelas), tipologias (unifamiliares –SF, multifamiliares – MF e edifícios em altura – HR) e zonas (Z1, Z2 e Z3), tendo assumido o indicador Energia Primária como um *proxy* relativamente aos restantes impactes (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 66).

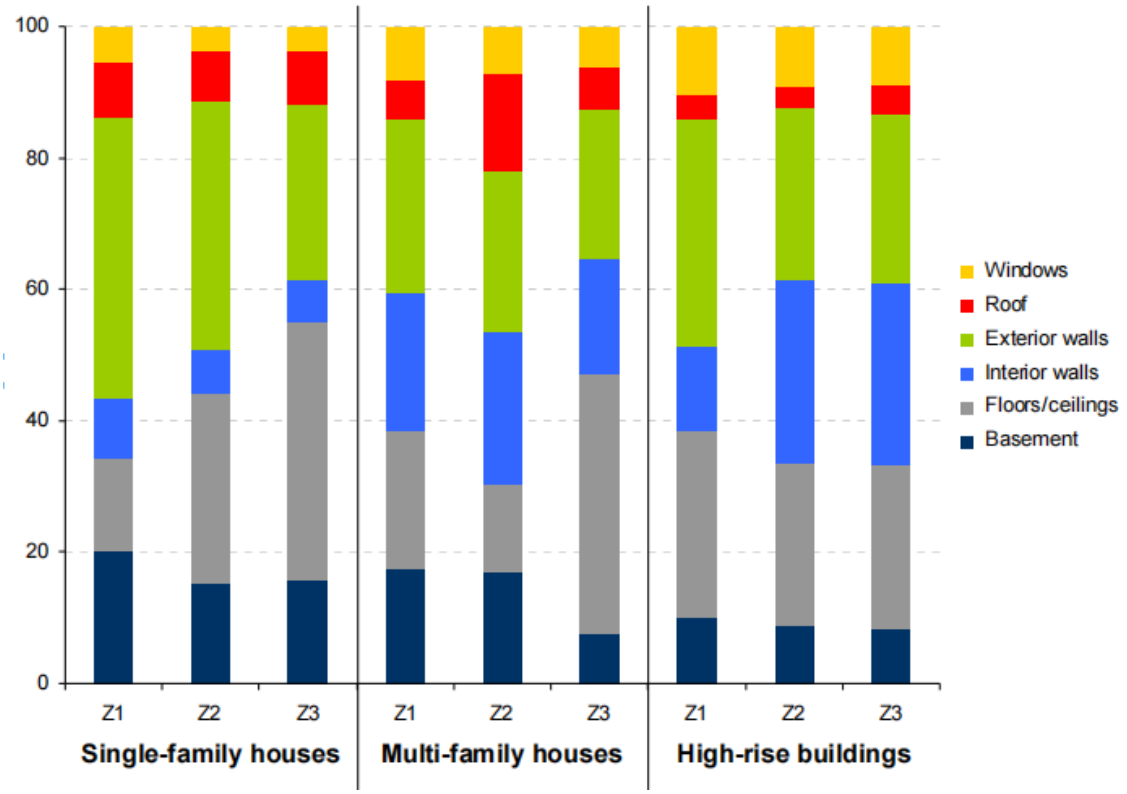


Ilustração 99 – Contribuição dos elementos construtivos para o impacte ambiental da fase de construção (*Energia Primária*) para construção nova, na UE 25, em conformidade com a zona geográfica e a tipologia. (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 66)

Na zona Z1, e para qualquer umas das três tipologias em análise (SF, MF e HR), as paredes exteriores, as fundações e os pavimentos e tetos duplos assumem relevância, com destaque para as paredes exteriores dos edifícios unifamiliares, sendo naturalmente influenciadas pelo volume e pela geometria do edifício.

As paredes exteriores são, por isso, um elemento crítico a considerar na fase de conceção, devendo-se tirar as devidas ilações em termos de projeto. Por sua vez, as paredes interiores, a cobertura e as janelas estão num segundo plano em termos de

impacte ambiental, comparativamente às anteriores (Institute for Prospective Tecnological Studies (Joint Research Centre), 2008, p. 66).

Como já anteriormente referido, o betão armado é o material mais utilizado para a construção das várias tipologias de edifícios na Europa (EU27+UK), com uma quota de 70% da massa total. No entanto, tal não é proporcional ao consequente impacte ambiental, quantificado pelo Global Warming Potential (GWP) e Environmental Cost Indicatorl[11] (ECI), representando 49% e 46%, respetivamente.

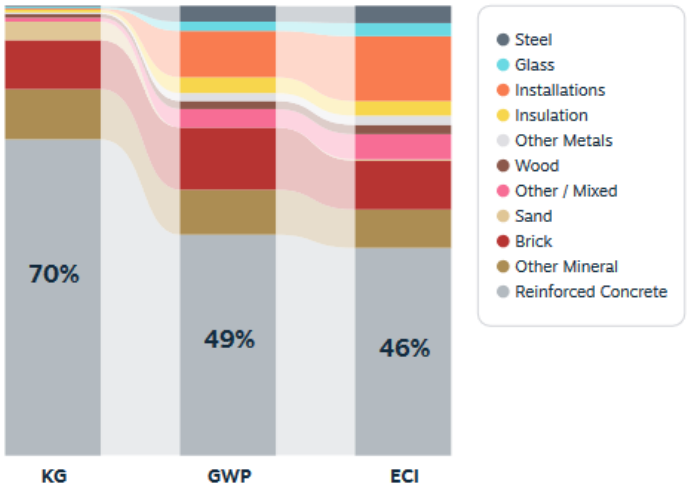


Ilustração 100 – Relação entre massa, GWP e ECI para diferentes materiais de construção na UE27+UK. (Haisma *et al.*, 2023, p. 10)

Em contrapartida, todos os restantes materiais, com destaque para os isolamentos, as instalações técnicas, o aço e o vidro, embora com pequenas ou mínimas contribuições em termos de massa (materiais leves), acabam por ser relevantes no que respeita ao impacte total (Ilustração 100) (Haisma *et al.*, 2023, p. 10).

Do mesmo modo, quando analisado do ponto de vista das seis camadas construtivas de Brand (*S-layers*) – um dos conceitos de referência da circularidade na construção – verifica-se que o impacte causado pela estrutura (*Structure*) é igualmente inferior à da percentagem do valor em massa (72%), assumindo uma parcela de 55% para o indicador (GWP) e de 51% para o ECI, seguida pelo envelope (*Skin*) como o segundo elemento mais relevante, juntos (estrutura + envelope) perfazendo cerca de 80% do

[11] O ECI leva em consideração onze indicadores ambientais, de modo a poder estimar o respetivo impacte ambiental global de materiais de construção e atividades relacionadas (Haisma *et al.*, 2023, p. 29).

impacte ambiental total dos edifícios (Ilustração 101), constituindo um fator crítico de intervenção (Haisma *et al.*, 2023, p. 10).

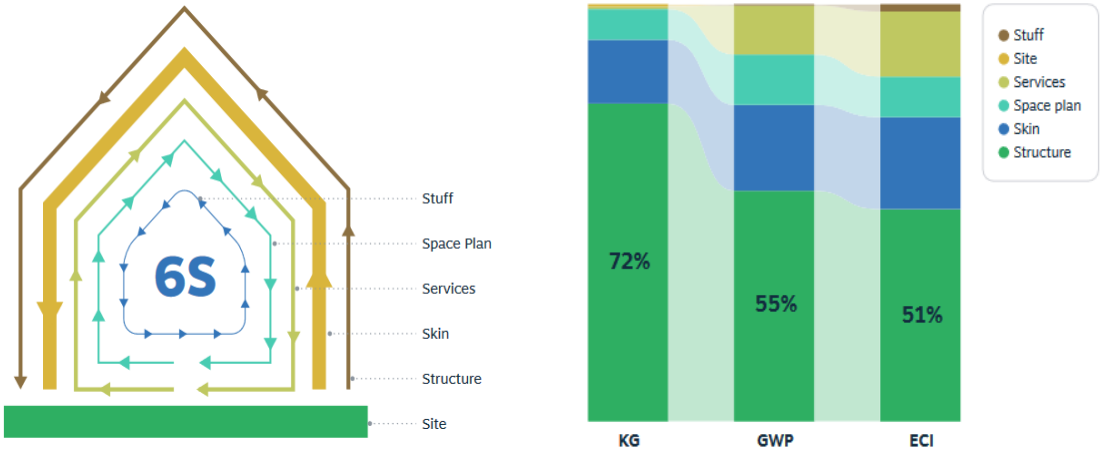


Ilustração 101 – *S-layers* e a sua relação com a massa, GWP e ECI na UE27+UK. ([Adaptado de:] Haisma *et al.*, 2023, pp. 10, 29)

3.1.2.3. EDIFÍCIOS E SAÚDE HUMANA

Diretamente relacionada com construção e com a arquitetura, a questão de um ambiente construído saudável tem sido amiúde negligenciada (Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 2; Kibert, 2008, p. 6), apesar de estar explicitamente enunciada na definição de objetivos da construção sustentável, "…creating and operating a healthy built environment, based on resource efficiency and ecological design." (Kibert, 2008, p. 6), já anteriormente referida.

Ao mesmo tempo, e salientando que, no atual contexto social, o ser humano passa a maior parte do tempo de vida no interior de edifícios, será de extrema importância reconhecer a influência do ambiente construído na obtenção do bem-estar físico e psicológico, sendo que nesta perspetiva, a arquitetura desempenha um papel relevante (Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 2):

> Over the last century, architecture has generated progressive wellbeing and an improvement in people's quality of life, promoting the construction of buildings with elements that provide better defences against pathogenic factors present in the environment. From this perspective, architecture has been shown to be one of the main agents of human health. In recent years, a new paradigm has been consolidated, aimed not only at combating pathogenic problems that arise in unhealthy environments and buildings but also at stimulating the presence of elements that favour and benefit human health in buildings and cities. It is a model whose attention is especially focused on the physiological, cognitive, and emotional influence that spaces have on people. […] The

> hypothesis of this paper is that architecture is no longer defined solely by visual or geometrical parameters but also by other dimensions involving environmental, cognitive, psychological, and physiological aspects, affecting comfort, wellbeing, and the physical and mental health of people (Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 2).

Já em 1984, um relatório da Organização Mundial de Saúde (OMS) alertava para o facto de, à escala global, cerca de um terço dos edifícios, novos ou remodelados, apresentarem problemas relativamente à qualidade do ar interior, sendo óbvio que o paradigma vigente da construção convencional não tem abordado devidamente os aspetos relacionados com a saúde humana, ao contrário do que se propõe fazer a construção sustentável (Kibert, 2008, p. 6; Filipe, 2001, p. 30).

O tema da saúde constitui, assim, um vetor emergente do projeto arquitetónico, incluindo na equação as dimensões fisiológicas e psicológicas, como complemento aos critérios técnicos e ambientais, promovendo espaços saudáveis, ao mesmo tempo confortáveis, livres de contaminação, estimulantes e sensíveis as necessidades humanas (Edwards, 2008, pp. 141, 142).

Uma habitação pode ser encarada (do ponto de vista funcional), como um edifício concebido para sustentar a vida, mimetizando e aumentando as quatro funções básicas do corpo humano: estrutura, temperatura, separação e conexão (Ilustração 102) (Snell e Callahan, 2009, pp. 15, 16).

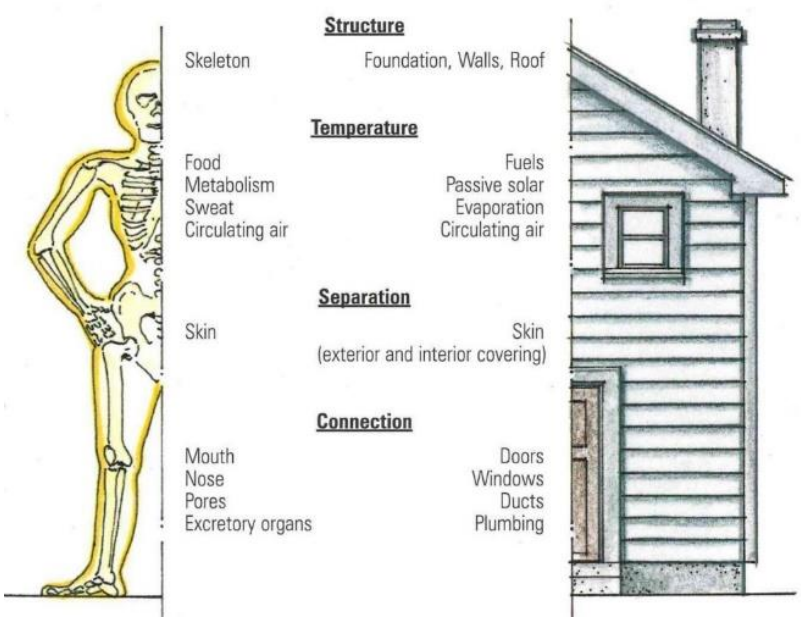


Ilustração 102 – As quatro funções de uma casa e a sua relação com o corpo humano.(Snell e Callahan, 2009, p. 16)

Nesta abordagem, uma casa é uma construção caracterizada por erguer uma estrutura que cria um espaço; por garantir uma temperatura que permite a vida; por inserir uma separação protetora e por assegurar uma conexão com o exterior:

> A house, then, is a building designed to sustain human life. This is an important concept, because it points out that houses do the same job as some other familiar structures designed to sustain human life: our bodies. The human body, the original house, sustains human life by providing four basic functions. First, it's a self-supporting structure that defines an inside (you) and an outside (the world). This structure is an interconnected network of bones—our skeleton— that creates a space for our heart to beat, lungs to breathe, and stomach to digest. Second, the body maintains a stable temperature inside in the face of fluctuating temperatures outside. […] Third, the human body creates a separation from outside elements that could damage us. For example, our skin keeps out unfiltered water and air, and our immune systems fight off invading pathogens. Finally, the body maintains a constant connection, or exchange, with the outside. (Snell e Callahan, 2009, pp. 15, 16).

Desta forma, tendo em conta a intrincada relação entre os edifícios e as pessoas, e de modo a assegurar as melhores condições de salubridade para a vida humana, devem ser potenciados e garantidos ambiente interiores e exteriores saudáveis e não-tóxicos, ao contrário do que sucede na maioria da construção moderna: “The result: modern housing is often simply dangerous […] Housing is supposed to be a sublime temple of union between two ancient partners, the human and nature.” (Snell e Callahan, 2009, pp. 18, 19).

Os materiais de construção podem emitir substâncias perigosas durante o seu ciclo de vida, nomeadamente, durante a fase de utilização. Dos muitos milhares de substâncias que são utilizadas na produção de materiais de construção, apenas uma pequena parcela foi ainda investigada, de modo a entender o alcance dos seus efeitos na saúde humana, existindo suspeita de consequências negativas em relação a muitos desses materiais correntes (Tabela 21) (Hegger *et al.*, 2008, p. 169; Sterling, Collett e Rumel, 1991, pp. 59, 60).

Para além da questão económica (remover materiais perigosos de um edifício é extremamente dispendioso), a temática da saúde humana na construção sustentável deverá ser devidamente realçada, principalmente no que concerne à seleção e prescrição de materiais e produtos (Augusto e Ferreira, 2025, p. 121).

No caso de já terem sido aplicados – e tendo em conta que as substâncias perigosas (tóxicas, alergénicas, cancerígenas, etc.) presentes num determinado espaço interagem de diferentes modos com o corpo humano (p.e., através da pele ou do trato respiratório)

– terão de ser tomadas medidas localizadas de proteção, ou mesmo da total remoção, dos materiais ou produtos potencialmente causadores de danos à saúde humana e/ou ao ambiente (Hegger *et al.*, 2008, p. 169).

Tabela 21 – Substâncias perigosas presentes em materiais e produtos de construção.

Substance	Typical absorption route for humans	Effects	Typical period of use	Typical sources of emissions
Asbestos	Inhalation	Fibrogenic (cicatrisation), carcinogenic materials, sealing compounds, floor coverings, textiles	up to 1980 (D)	Building boards, pipes, moulded parts, mortar, render, plaster, insulating
Synthetic mineral fibres	Inhalation	Fibrogenic (cicatrisation), carcinogenic, skin irritant	up to 1995 (D)	Mineral insulating materials (rock or glass wool without quality mark)
Dichlorodiphenyl-trichloroethane (DDT)	Foodstuffs, house dust	Damages organs and nervous system	up to 1972 (D)	Wood preservatives
Dioxins, Furans	Foodstuffs	Carcinogenic	–	Fire residues, slag
Flame retardants	no data	no data	still in use	
Formaldehyde	Inhalation	Irritates eyes and mucous membranes, causes headaches, carcinogenic	restricted since 1996 (D)	Wood-based board products, synthetic resins, coatings, chemical additives (e.g. in self-levelling screeds)
Total volatile organic compounds (TVOC)	Inhalation	Irritates eyes and mucous membranes, neurotoxic (sick building syndrome)	still in use	Paints, adhesives, paint removers, plastic products, wood-based products, carpeting, textiles

Fonte: [Adaptado a partir de:] Hegger *et al.*(2008, p. 170)

Torna-se essencial que os projetistas baseiem as suas escolhas em critérios sustentáveis, não exclusivamente focados nos aspetos técnicos e económicos, mas que, em pé de igualdade, também se considerem os parâmetros ambientais e sociais.

Neste particular, para além da rotulagem ecológica Tipo I e Tipo III (Hegger *et al.*, 2008, p. 169 ; Augusto, 2019, p. 520), também a PEF e, especialmente, as Health Product Declarations (HPDs) (Ilustração 103) são ferramentas essenciais para reportar e despistar materiais ou produtos nocivos à saúde humana (Augusto, 2019, p. 520 ; Archtoolbox, 2021).

Os materiais e produtos utilizados na construção, nomeadamente na habitação, devem cumprir critérios específicos relacionados com a saúde e a segurança dos utilizadores. Quando os produtos e os processos de fabrico desses produtos, de uma forma voluntária, são validados e reportados por uma metodologia padronizada, como uma HPD, esta torna-se uma ferramenta de promoção da transparência e de confiança na marca, complementando a informação das EPDs (Augusto e Ferreira, 2025, p. 121).

Vários sistemas de avaliação de sustentabilidade de edifícios já consideram as HPDs para efeitos de obtenção de créditos, nomeadamente o LEED v4 e o Living Building

Challenge, entre outros, assim como os programas específicos do Cradle-to-Cradle Product Innovation Institute (economia circular) e do The International WEEL Being Institute (edifícios saudáveis) (Archtoolbox, 2021).



Modernfold Glass Wall Systems (GWS) – Compactline/PureView Plus/PureView/DRS/GP/FSW by dormakaba

Health Product Declaration v2.3
created via: HPDC Online Builder

HPD UNIQUE IDENTIFIER: 31895
CLASSIFICATION: 10 22 23.23 Movable Panel Systems
PRODUCT DESCRIPTION: Modernfold Glass Wall Systems (GWS) provide flexible space division along with the highly desired features of modern glass and daylight. Modernfold's GWS encompasses a variety of glass wall products which feature an assortment of glass and rail finish options and functionality.

Section 1: Summary — Basic Method / Product Threshold

CONTENT INVENTORY

Inventory Reporting Format: ○ Nested Materials Method ◉ Basic Method
Threshold Disclosed Per: ○ Material ◉ Product
Threshold Level: ◉ 100 ppm ○ 1,000 ppm ○ Per GHS SDS ○ Other
Residuals/Impurities Evaluation: ◉ Completed ○ Partially Completed ○ Not Completed
Explanation(s) provided : ◉ Yes ○ No

For all contents above the threshold, the manufacturer has:
Characterized ◉ Yes ○ No
Provided weight and role.
Screened ◉ Yes ○ No
Provided screening results using HPDC-approved methods.
Identified ◉ Yes ○ No
Provided name and CAS RN or other identifier.

CONTENT IN DESCENDING ORDER OF QUANTITY

Summary of product contents and results from screening individual chemical substances against HPD Priority Hazard Lists and the GreenScreen for Safer Chemicals®. The HPD does not assess whether using or handling this product will expose individuals to its chemical substances or any health risk. Refer to Section 2 for further details.

PRODUCT | MATERIAL OR SUBSTANCE | *RESIDUAL OR IMPURITY* GREENSCREEN SCORE | HAZARD TYPE

MODERNFOLD GLASS WALL SYSTEMS (GWS) – COMPACTLINE/PUREVIEW PLUS/PUREVIEW/DRS/GP/FSW [SOLID / PLATE GLASS LT-UNK AA 6560 ALUMINUM ALLOY (ALUMINUM) BM-1 | END | MAM | PHY STEEL NoGS POLYURETHANE FOAMS (POLYURETHANE) LT-UNK POLYVINYL CHLORIDE (PVC) (PRIMARY CASRN IS 9002-86-2) LT-P1 | MAM]

Number of Greenscreen BM-4/BM3 contents ... 0
Contents highest-concern GreenScreen score(s) (BM-1, LT-1, LT-P1) ... BM-1, LT-P1
Nanomaterial ... No

INVENTORY AND SCREENING NOTES:

This HPD was created with Basic Inventory. Substances are listed by weight in the entire product instead of by material. All substances over 1000 ppm or 100 ppm of the product are reported.

VOLATILE ORGANIC COMPOUND (VOC) CONTENT
VOC Content data is not applicable for this product category.

CERTIFICATIONS AND COMPLIANCE *See Section 3 for additional listings.*
VOC emissions: CDPH Standard Method V1.1 (Section 01350/CHPS) - Zero VOC emissions
LCA: Environmental Product Declaration (EPD) by SCS

CONSISTENCY WITH OTHER PROGRAMS
Pre-checked for LEED v4 Option 1.
Pre-checked for LEED v4.1 Option 1.

Third Party Verified? ○ Yes ◉ No
PREPARER: Self-Prepared
VERIFIER:
VERIFICATION #:
SCREENING DATE: 2023-03-26
PUBLISHED DATE: 2023-03-26
EXPIRY DATE: 2026-03-26

Ilustração 103 – Exemplo parcial de uma HPD v2.3 de um produto de construção. ([Adaptado a partir de:] dormakaba, 2024)

A certificação WELL permite potenciar a saúde humana e o bem-estar nos edifícios e organizações, através da inclusão de um conjunto de estratégias baseadas em investigação e evidência científica, abrangendo 10 parâmetros, recolhidas e validadas junto de utilizadores, consultores, profissionais de saúde pública e cientistas da construção (Ilustração 104) (International WELL Building Institute, 2024).

O ambiente construído é apontado como um dos mais importantes fatores que afetam a saúde humana, tendo sido classificado como um determinante pela OMS, e está relacionado com diferentes tipos de doenças (p.e., asma, obesidade, infeções respiratórias, cancro, cardiovasculares, depressão, etc.) e acidentes (Augusto, 2019, pp. 521, 522 ; Goldman e Rider, 2020, p. 461 ; Bonnefoy, 2007, pp. 421, 422 ; Younger *et al.*, 2008, p. 520).



Ilustração 104 – Os 10 parâmetros do sistema WELL v2™. (International WELL Building Institute, 2024)

De igual modo, foram identificados e devidamente caracterizados, quadros clínicos conhecidos como Síndroma do Edifício Doente (SED) ou Sick Building Syndrome (SBS) e Doenças Relacionadas com Edifícios(DRE) ou Building Related Illness (BRI) (Augusto, 2019, p. 519; Allen *et al.*, 2017, pp. 8, 18; Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 15; Filipe, 2001, pp. 29, 30; Horvath, 1997, pp. 303, 304; Bonnefoy, 2007, p. 416).

BRI refere-se a efeitos sobre a saúde com uma clara etiologia, bem definidos, em que uma causa específica pode ser identificada, tal como a legionelose (doença do legionário), asma, mesotelioma e asbestose (devidas à exposição ao amianto), pneumonite por hipersensibilidade, entre outras (Tabela 22).

SBS respeita a uma série de sintomas inespecíficos reportados pelos utilizadores, tais como: irritação da pele, olhos, nariz e garganta, queixas relacionadas com o sistema nervoso central (fadiga, cefaleia e diminuição da capacidade de concentração), corrimento nasal e lacrimejamento, alterações do olfato e do gosto, etc. (Tabela 22) (Bonnefoy, 2007, p. 416; Horvath, 1997, p. 304; Filipe, 2001, pp. 30, 32, 33; Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 15).

Tabela 22 – Diferenças dos sintomas e da etiologia entre BRI (específico) e SBS (vago).

BUILDING-RELATED ILLNESSES WITH KNOWN CAUSES	SYMPTOMS OF SICK BUILDING SYNDROME
Allergic and immunologic disease	**Irritation of the eyes, nose, and throat**
Hypersensitivity pneumonitis	Dryness
Humidifier fever	Stinging
Rhinitis	Hoarseness
Sinusitis	
Asthma	**Skin irritation**
	Reddening
Infections	Stinging
Legionnaire's disease	Dryness
Pontiac fever	
Viral infections	**Neurotoxic**
Influenza	Fatigue
Common cold	Lethargy
Rubella	Reduced memory or concentration
Varicella	Headache
Bacterial pneumonia	Dizziness
Mycobacterial (tuberculosis)	Nausea
Chemicals and other substances	**Odor or taste complaints**
Man-made mineral fibers (fibrous glass)	Unpleasant odor or taste
Detergent residues (carpet shampoos)	Changed sensitivity
Carbon monoxide	
Carbonless copy paper	**Nonspecific reactions**
Formaldehyde	Chest sounds
Pesticides	Asthma-like symptoms
Volatile organic compounds	
Carcinogens (radon, asbestos)	

Fonte: ([Adaptado a partir de:] Horvath (1997, pp. 304, 307)

As investigações no sentido de identificar as causas do SBS apontam no sentido de estas serem multifatoriais, no entanto, existe um *proxy* relacionado com edifícios novos ou reabilitados, assim como com a dominância de ventilação mecânica e de instalações AVAC e da respetiva Qualidade do Ar Interior (QAI) (Bonnefoy, 2007, p. 416) (Horvath, 1997, p. 307;) Filipe, 2001, p. 31; Allen *et al.*, 2017, pp. 8, 11; Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 15).

As etiologias são diversas e estão relacionadas com a fase de conceção (edifícios com grandes envidraçados, hermeticamente fechados e dependentes de ventilação mecânica), até à utilização de materiais de construção suscetíveis de emitirem Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) ou de libertarem fibras, entre outros fatores (Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 15; Filipe, 2001, p. 31; Sterling, Collett e Rumel, 1991, p. 59).

A arquitetura tem um papel determinante na conceção saudável e sustentável de edifícios, que deverá ter uma abordagem multidisciplinar, envolvendo profissionais das áreas da construção (projetistas, promotores, construtores, etc.) e da saúde

(epidemiologistas, médicos de saúde pública, etc.) (Sterling, Collett e Rumel, 1991, p. 61; Horvath, 1997, p. 308).

A sua importância está patente nesta afirmação, relativa à importância da conceção e da construção, de modo a evitar problemas de insalubridade nos edifícios, nomeadamente a BRI e o SBS: “In general, it is the result of a method of building that generates and continues to emit environmental, electrical, magnetic, and chemical pollution.” (Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 15).

Como forma de obviar a esta evidência, a T.C.Chan School of Public Health, da Universidade de Harvard – uma das mais prestigiadas escolas de saúde pública a nível mundial – propôs, em 2017, uma série de nove critérios (Ilustração 105), com vista à obtenção de um nível elevado de salubridade nos edifícios: 1. Ventilação; 2. Qualidade do Ar; 3. Qualidade da Água; 4. Térmica; 5. Poeiras e Contaminantes; 6. Iluminação e Vistas ; 7. Ruído, 8. Humidade; 9. Proteção e Segurança (Allen *et al.*, 2017, pp. 6, 7; Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 15).

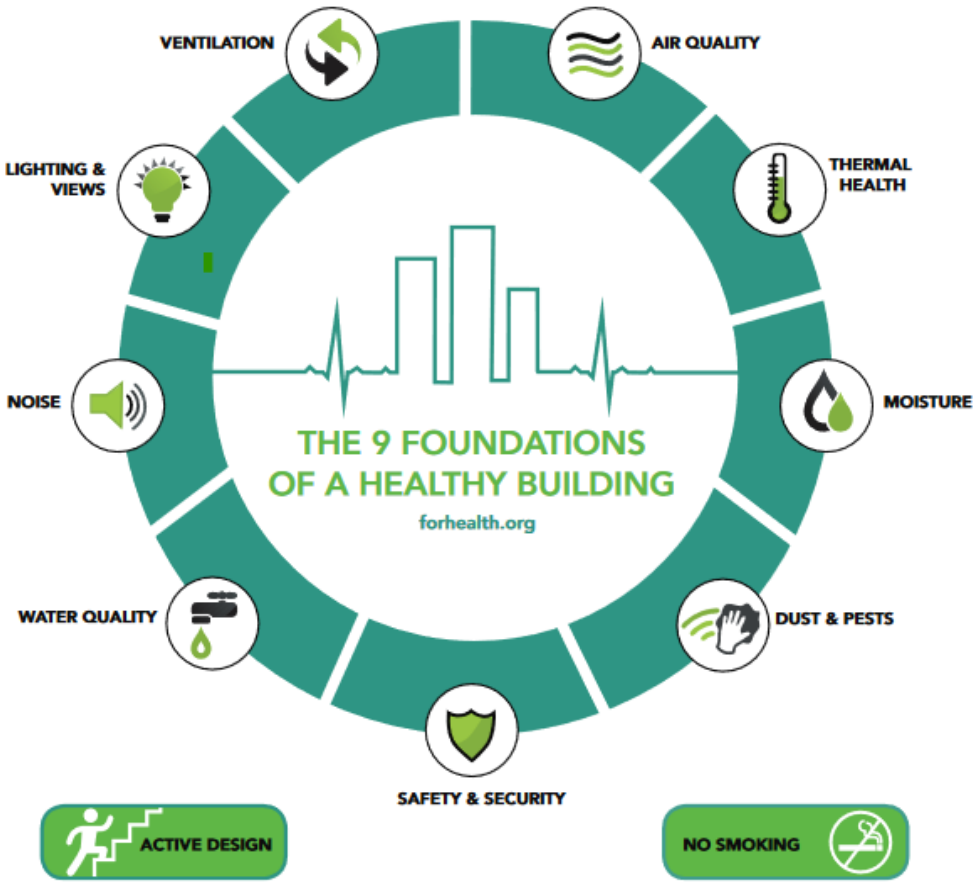


Ilustração 105 – Os nove fundamentos dos edifícios saudáveis. ([Adaptado de:] (Allen *et al.*, 2017, p. 4)

Devido à sua proximidade com Portugal, salienta-se o facto de, baseado neste e noutros contributos, o Grupo de Investigação (GI) Healthy Architecture & City, da Universidade de Sevilha, propôs recentemente (2023) uma lista de dez indicadores de controlo para utilização em edifícios saudáveis (Ilustração 106), sendo nove deles relacionados com aspetos sensoriais, físicos e cognitivos, e um outro – mais abstrato e holístico – com o sentido, orientação, organização e distribuição do espaço, com vista à implementação de uma arquitetura saudável (Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 15).

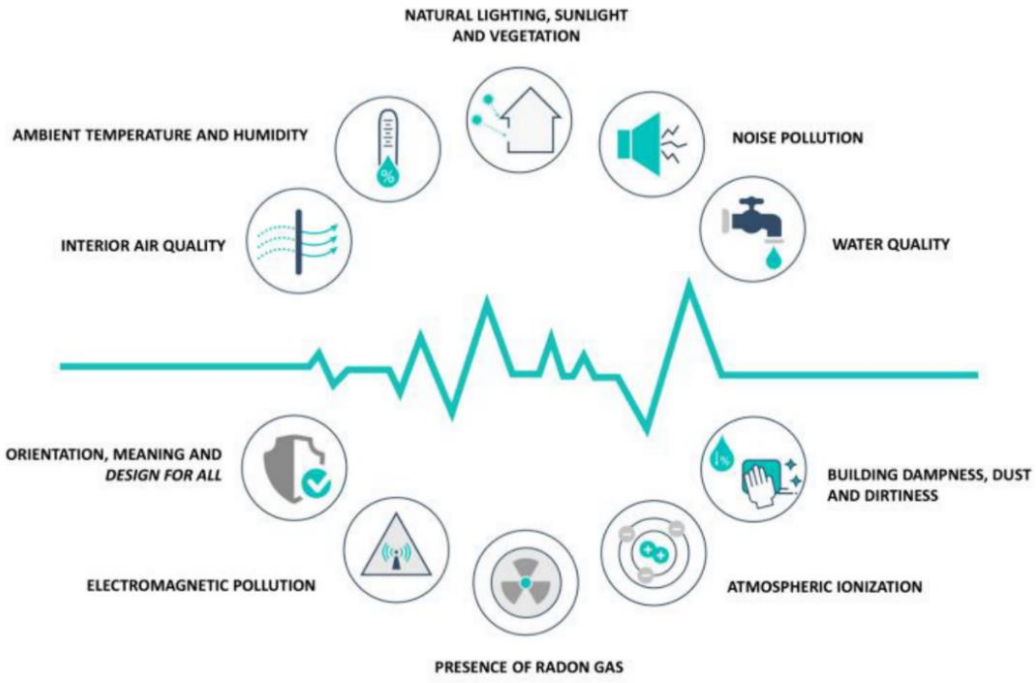


Ilustração 106 – O decálogo da arquitetura saudável. ([Adaptado a partir de:] Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 16)

Os dez indicadores incluídos no decálogo para a arquitetura saudável são os seguintes: 1. Qualidade do ar interior 2. Temperatura ambiente e humidade; 3. Iluminação natural, luz solar e vegetação; 4. Poluição sonora ; 5. Qualidade da água; 6. Humidade, poeira e sujidade*;* 7. Ionização atmosférica; 8. Presença de gás radão; 9. Poluição eletromagnética; 10. Orientação, significado e *design* para todos (Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, pp. 16, 17).

Neste contexto, arquitetura saudável é aquela que edifica ambientes que diminuem fatores de risco e que promovem a saúde humana, baseada em cinco princípios: 1. Utilizar materiais inócuos, com emissões zero e de reduzida pegada ambiental; 2. Integrar de modo seguro e ético, as emergentes tecnologias de informação e de

comunicação; 3. Criar e gerir ambientes limpos, eficientes e inteligentes; 4. Conceber ambientes que são adaptáveis e compatíveis com o desenvolvimento de uma diversidade de estilos de vida; 5. Provocar emoção através de uma arquitetura profundamente significativa (Ilustração 107) (Quesada-García, Valero-Flores e Lozano-Gómez, 2023, p. 18).

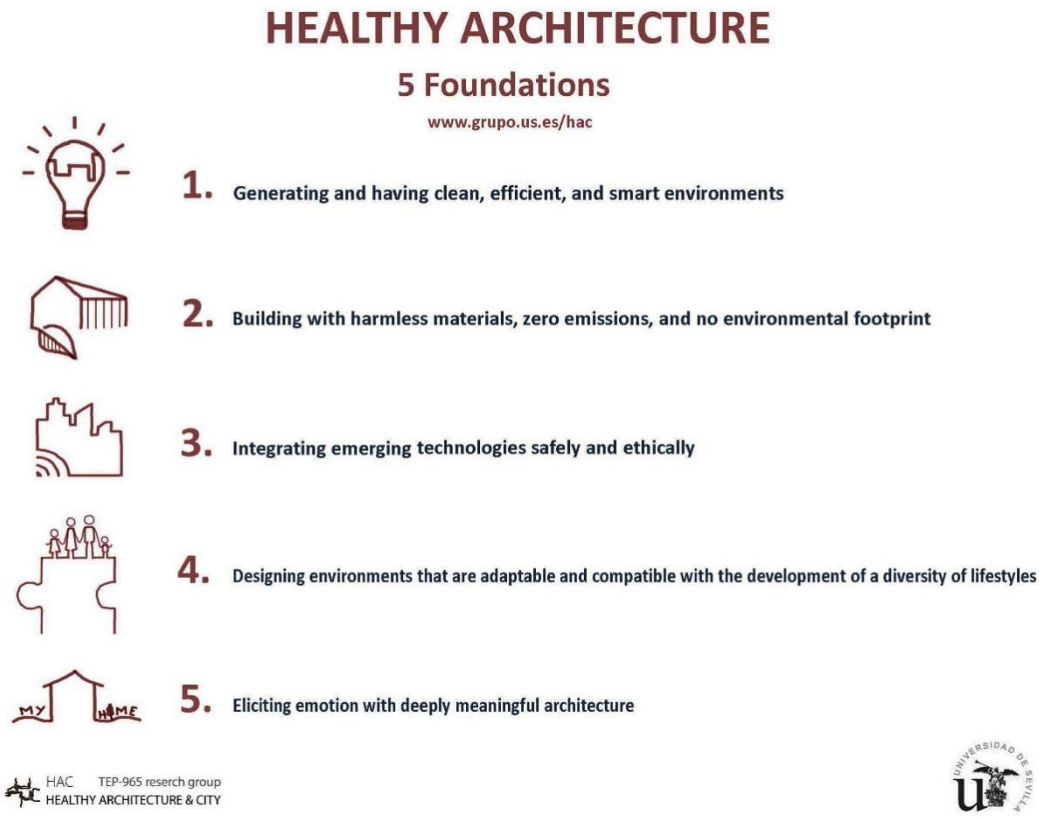


Ilustração 107 – Os cinco princípios da arquitetura saudável. (Healthy Architecture & City, 2024)

Tendo em conta o acima exposto, gostaria de sublinhar dois aspetos relacionados com a QAI e com a térmica dos edifícios, que tanto afetam a qualidade do edificado nacional e a saúde dos portugueses: o gás radão e as ondas de frio e de calor.

No primeiro caso (radão), trata-se de um assunto em que, apesar da sua relevância, tem merecido reduzida importância dos vários agentes envolvidos no processo de construção (Augusto e Ferreira, 2025, p. 122). Quanto ao segundo, prende-se não só diretamente com a temática da pobreza energética, mas também com o desempenho dos materiais e sistemas de isolamento térmico utilizados (Augusto e Ferreira, 2025, p. 121).

O radão (Rn) é um gás radioativo de origem natural, incolor e inodoro, que provém do decaimento do urânio presente nas rochas e nos solos, e a sua concentração no interior dos edifícios depende de fatores geogénicos e do tipo de construção, dos materiais de construção e do uso do edifício, sendo que a sua exposição prolongada tem efeitos sobre a saúde humana (Portugal. Presidência do Conselho de Ministros, 2022, pp. 171-(14); Agência Portuguesa do Ambiente, 2021; Ferreira e Coelho, 2006, p. 71; Garcia *et al.*, 2025, p. 117)

O radão entra nos edifícios vindo do solo, podendo acumular-se e as concentrações serem elevadas, com variações diurnas, sazonais e anuais, e é uma das principais causas de cancro de pulmão (Ferreira e Coelho, 2006, p. 71; Garcia *et al.*, 2025, p. 117).

A OMS estima que a exposição ao Rn seja responsável por 3 a 14% dos cancros de pulmão a nível mundial (Portugal. Presidência do Conselho de Ministros, 2022, pp. 171-(16); Augusto e Ferreira, 2025, p. 122), representando cerca de 2% de todas as mortes por cancro, na Europa (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021). A exposição ao radão é a primeira causa de cancro de pulmão em "não-fumadores", sendo o tipo de cancro mais comum em Portugal (Garcia *et al.*, 2025, p. 117).

> O radão entra para o interior dos edifícios, vindo do solo, através de fissuras e fendas no pavimento, nas paredes enterradas, nas juntas entre o chão e a parede e pela canalização mal/não isolada. Pode acumular-se no interior e atingir valores elevados. As concentrações elevadas dependem primariamente do solo, do tipo de construção e dos hábitos de vida/uso do edifício. Pode haver também contribuição dos materiais de construção e da água proveniente de furos. De forma a garantir que os níveis de concentração se mantêm relativamente reduzidos e inferiores ao nível de referência nacional, devem ser consideradas medidas de proteção tanto na construção de novos edifícios (medidas preventivas) como nos edifícios existentes (medidas corretivas ou de remediação) (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021).

Em Portugal, e principalmente por causa das diferentes características geológicas, existem certas áreas que são propensas a ter níveis mais elevados de radão no interior dos edifícios, e que podem ser consultadas no mapa de suscetibilidade ao radão (Ilustração 108), com um nível de referência para habitação e local de trabalho de 300 Bq/m^3 (trezentos *becquerels* por metro cúbico) (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021; Ferreira e Coelho, 2006, p. 77).

De notar que a OMS recomenda um nível de referência de 100 Bq/m^3 em habitações (Yarmoshenko *et al.*, 2022, p. 1), substancialmente abaixo do nível de referência nacional. A redução da exposição no interior dos edifícios será feita através de medidas

preventivas durante a fase de construção, ou de medidas corretivas e de mitigação, para os edifícios existentes (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021), sendo que a fonte de exposição e as medidas a tomar são distintas, conforme se trate de edifícios de pequeno porte ou em extensão, em lugar de construção em altura (Yarmoshenko *et al.*, 2022, p. 7).

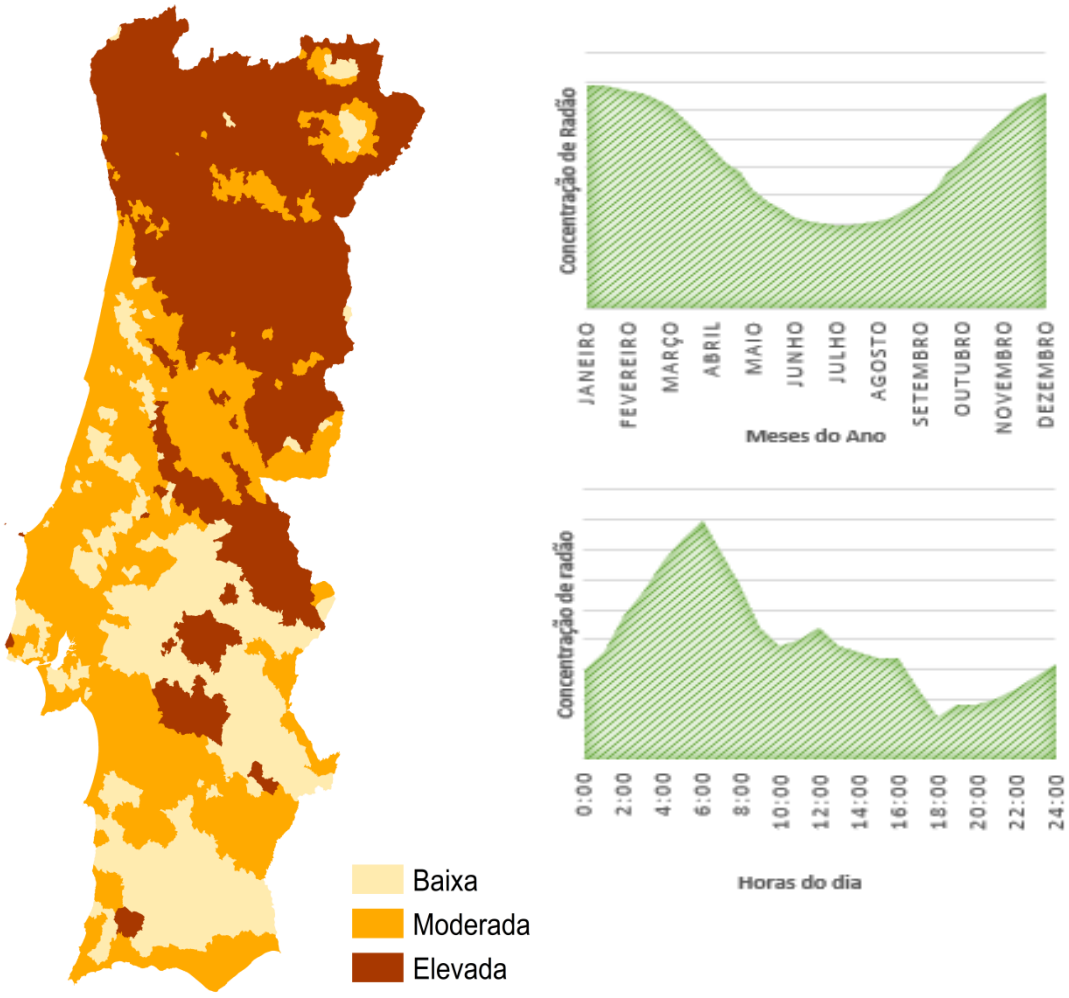


Ilustração 108 – Mapa de suscetibilidade ao radão e variação da concentração sazonal e diurna nos edifícios. ([Adaptado a partir de:] Agência Portuguesa do Ambiente, 2021)

Em termos gerais, as medidas de prevenção e remediação dividem-se entre medidas ativas (ventilação e/ou despressurização por meios mecânicos) e passivas (baseada em ventilação natural), para além de selagem e aplicação de membranas e filmes em elementos construtivos (juntas, orifícios, paredes, pavimentos, etc.) (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021; Yarmoshenko *et al.*, 2022, p. 2; Baltrocchi *et al.*, 2023, pp. 5–9; Ferreira e Coelho, 2006, pp. 82–89).

Com efeito, enquanto no primeiro caso (edifícios de pequeno porte), a causa direta de exposição ao radão deve-se ao solo e às partes construtivas em contacto (pisos subterrâneos, caves, muros de suporte, etc.), nos pisos superiores dos edifícios em altura, o radão é introduzido pelos materiais de construção (estrutura, alvenarias ou revestimentos) e pelas canalizações e condutas, nomeadamente de água potável (Yarmoshenko *et al.*, 2022, p. 7; Baltrocchi *et al.*, 2023, p. 4; Ferreira e Coelho, 2006, pp. 79, 80).

Nos edifícios de alto desempenho energético, a concentração de Rn nos fogos tende a ser muito elevada, principalmente devido às medidas de eficiência energética adotadas, e que contrariam, ou impõem restrições à ventilação, principalmente natural.

No caso simultâneo de edifícios em altura, a presença de rádio (Ra-226), nos constituintes dos materiais e produtos, é o responsável por este efeito, pelo que o controlo deste elemento radioativo é fundamental para a prevenção da contaminação por radão (Yarmoshenko *et al.*, 2022, pp. 7, 8; Baltrocchi *et al.*, 2023, pp. 3, 4).

A conciliação da QAI com a eficiência energética no contexto da construção sustentável, é um tema cada vez mais relevante, sendo que o caso da contaminação por radão, e do respetivo risco associado, é explicitamente enunciado nos principais sistemas de certificação de sustentabilidade de edifícios (p.e., LEED) (Baltrocchi *et al.*, 2023, p. 2).

As ações de prevenção e mitigação, associadas a práticas de ventilação energeticamente eficientes, no sentido de garantirem um ar interior de qualidade, livre de contaminantes, em que, para além do radão (Garcia *et al.*, 2025, pp. 117, 118), também o formaldeído e o CO_2 assumem especial importância, são atualmente tidas como fundamentais na conceção de edifícios sustentáveis e de baixo carbono (Baltrocchi *et al.*, 2023, p. 2; Yarmoshenko *et al.*, 2022, p. 8).

Outro fator arquitetónico e construtivo com grande impacto na saúde dos portugueses tem a ver com a reconhecida baixa qualidade termohigrométrica da maioria do edificado nacional, que se reflete em altas necessidades de aquecimento e arrefecimento, a serem supridas por gastos energéticos excessivos, tendo como causa próxima um deficiente isolamento térmico do envelope.

Uma vez que os edifícios são concebidos e orientados para as pessoas, a obtenção de conforto térmico é de extrema importância para a saúde e bem-estar e pode ser definido

como um estado de espírito que expresse satisfação com a temperatura ambiente. É baseado no equilíbrio entre ganhos de calor no corpo humano, devido ao metabolismo interno, e as perdas para o ambiente exterior, existindo uma sensação de conforto para a maioria dos utilizadores quando estão em equilíbrio (Jankovic, 2012, p. 203; Augusto, 2019, p. 523).

Deste modo, e num contexto de pobreza energética que afeta uma percentagem significativa de portugueses – entre 1,2 e 2,3 milhões de pessoas em situação de pobreza energética moderada e 660 mil a 740 mil em situação severa (Lopes, 2023) – a questão da adoção de sistemas construtivos sustentáveis e adequados às ondas de frio e de calor e às variações higrométricas, assume uma importância crucial do ponto de vista económico, ambiental e social (Almendra, 2019, p. 22).

Em linha com o acima descrito, e como determinante ambiental de saúde, o **Inquérito às Condições de Vida e Rendimento** (2020) destacava que 17,4 % da população portuguesa (18,9% em 2019) "[…] não apresentava capacidade para manter a habitação adequadamente aquecida" (Ilustração 109) (Freitas, 2022, p. 85).

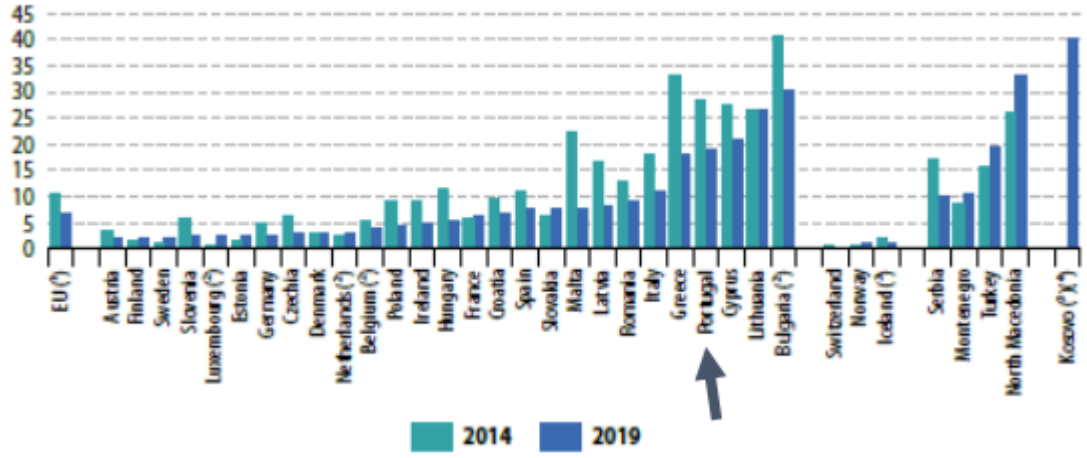


Ilustração 109 – "Proporção (%) da população incapaz de manter a habitação devidamente aquecida em Portugal, União Europeia e outros países europeus, 2014 e 2019". ([Adaptado a partir de:] Freitas, 2022, p. 169)

O **Plano Nacional de Saúde** (PNS) 2021-2030, plano estratégico de saúde à data em vigor em Portugal, classifica tanto a qualidade da habitação como as alterações climáticas/aquecimento global como determinantes ambientais de saúde, e identifica a mortalidade associada ao calor e frio extremos, como um problema de saúde com risco acelerado de emergir ou evoluir para valores de elevada magnitude devido ao aumento da intensidade ou da prevalência de determinantes relevantes (Ilustração 110), salientando, entre outros, a sua particular importância (Freitas, 2022, pp. 12, 37, 46).

A larga maioria da população europeia e portuguesa vive em cidades que são particularmente afetadas por fatores de risco ambientais e pelos potenciais efeitos das alterações climáticas, levando a que a população urbana seja sujeita a altos níveis de *stress* térmico, conforme a latitude e a geografia em que se situem, mas, principalmente, a fenómenos de calor e frio extremos (Masselot *et al.*, 2023, p. e271)

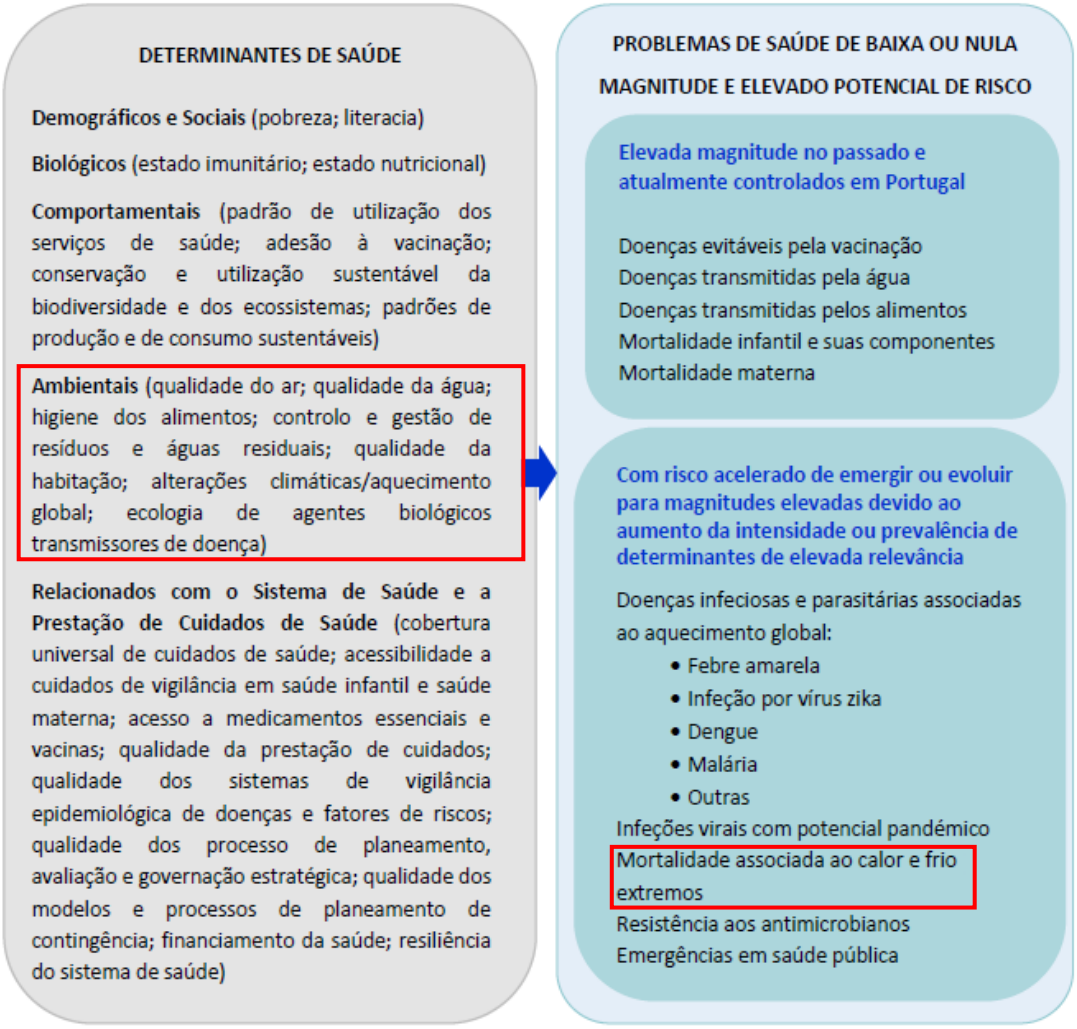


Ilustração 110 – Mortalidade associada ao calor e frio extremos como um problema de saúde de baixa ou nula magnitude e elevado potencial de risco. ([Adaptado a partir de:] Freitas, 2022, p. 37)

Um estudo levado a cabo em cidades europeias **Excess mortality attributed to heat and cold: a health impact assessment study in 854 cities in Europe (2023)** – avaliou os impactos anuais de mortalidade na Europa (por 100.000 pessoas/ano), atribuível ao calor e ao frio, em ambiente urbano (Ilustração 111) (Masselot *et al.*, 2023, p. e271).

Verifica-se que, em Portugal, o frio é mais impactante do que o calor, com uma taxa bruta de excesso de mortalidade superior, e "[…] tem vindo a ser descrito como o país

da Europa com valores maiores de excesso de mortalidade no inverno […]" (Almendra, 2019, p. 25), o que, em princípio, não seria expectável, tendo em conta as características temperadas do clima português e as consequências no território nacional derivadas do aquecimento global (Ilustração 111).

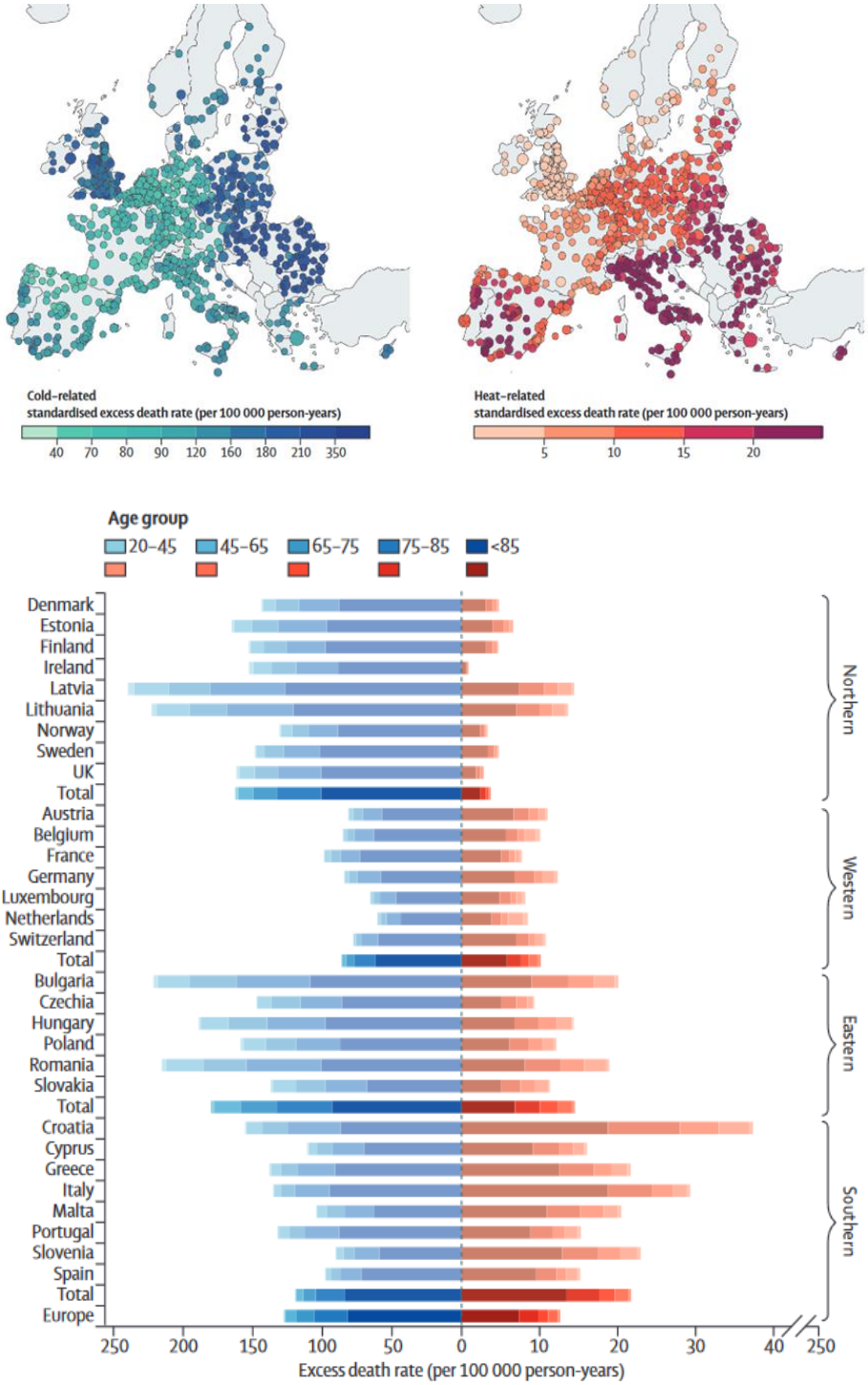


Ilustração 111 – Impactos anuais de mortalidade na Europa (por 100.000 pessoas/ano), atribuível ao frio (azul) e calor (vermelho), em ambiente urbano, com base na taxa de excesso de mortalidade padronizada (em cima) e na taxa bruta de excesso de mortalidade (em baixo). ([Adaptado a partir de:] Masselot *et al.*, 2023, pp. e277, e278)

Tal pode indiciar fortemente um *proxy* relacionado com a qualidade da construção, um determinante ambiental de saúde mencionado no PNS 2021-2030, como já acima referido. Recordamos que a humidade presente no ar ou nos materiais de construção influencia a sensação de conforto térmico e, necessariamente, a qualidade percecionada da construção, assim como a temperatura do ar interior e a temperatura média das superfícies em contacto. Por essa razão, um isolamento térmico adequado do envelope é a condição básica para criar condições de conforto interior e ao mesmo tempo reduzir o consumo energético (Hegger *et al.*, 2008, p. 57).

De modo a garantir as melhores condições de salubridade, e para uma temperatura ambiente entre 20-22ºC, a humidade relativa no interior de uma habitação ou posto de trabalho deve situar-se, idealmente, entre 40 e 60% durante todo o ano (Ilustração 112). Acima desse valor existe a possibilidade de desenvolvimento de condensações e de bolores, e abaixo de 40%, o risco de acumulação de poeiras e cargas electroestáticas, entre outros fatores relacionados com o desenvolvimento de microrganismos (Sterling, Collett e Rumel, 1991, p. 61; Hegger *et al.*, 2008, p. 171).

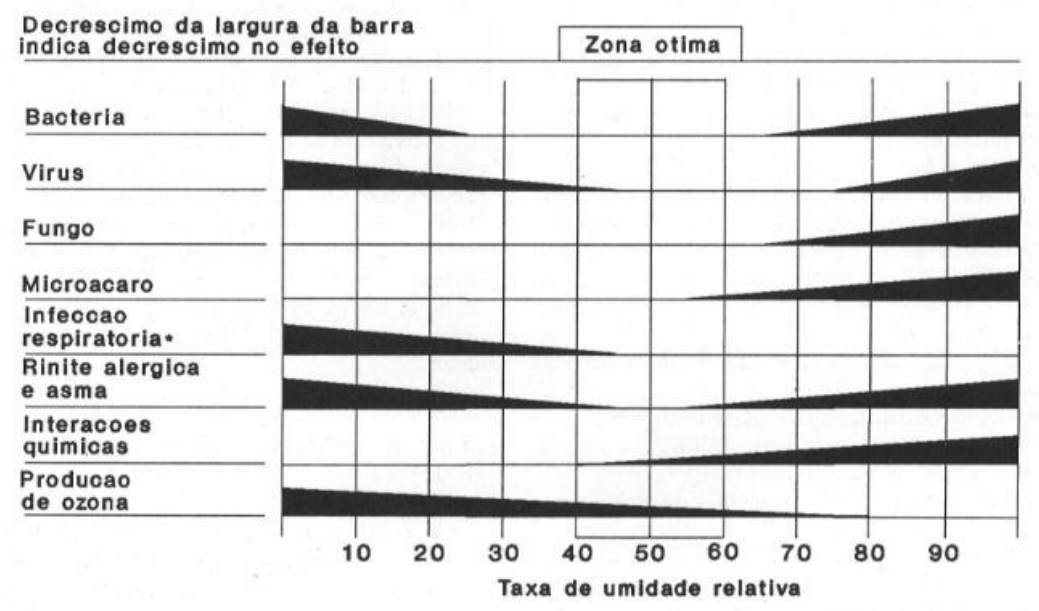


Ilustração 112 – "Intensidade de efeitos adversos à saúde de acordo com a umidade relativa do ar e agentes causais". (Sterling, Collett e Rumel, 1991, p. 60)

O ideal de alcançar edifícios e urbanizações mais saudáveis é um dos principais objetivos da construção circular (e sustentável) e que entronca, num âmbito mais vasto e holístico, nos princípios da saúde planetária e nos ODS. À escala global, cerca de 75% dos edifícios e infraestruturas necessários até 2050 ainda não foram construídos,

o que constitui uma enorme oportunidade para utilizar a construção sustentável como um instrumento de saúde pública (Allen *et al.*, 2024, pp. 9, 21).

> The potential for green buildings to be a truly transformational public health tool has not been fully realized. To date green buildings have been defined and valued by their focus on energy conservation. The future, however, is an enhanced definition of the green building movement that places health at the foundation of all buildings and ensures that green building principles reach everyone, not just those in developed countries. This new era of green buildings, with goals of providing enhanced indoor environmental quality (INDOOR HEALTH), decreasing consumption of materials and water, and reducing waste (RESOURCE HEALTH) acting as platforms for technological innovation and employment (ECONOMIC HEALTH) and reducing energy consumption and concomitant pollution emissions (ENVIRONMENTAL HEALTH), is a key starting point for advancing sustainable solutions and PUBLIC HEALTH globally (Allen *et al.*, 2024, p. 9).

A construção circular assume, assim, um papel central, porém ainda pouco valorizado no nosso meio técnico, de promoção da saúde global (*Indoor, Resource, Economic and Environmental Health*), articulado com os respetivos ODS com vista ao desenvolvimento sustentável (Ilustração 113) (Allen *et al.*, 2024, p. 21).

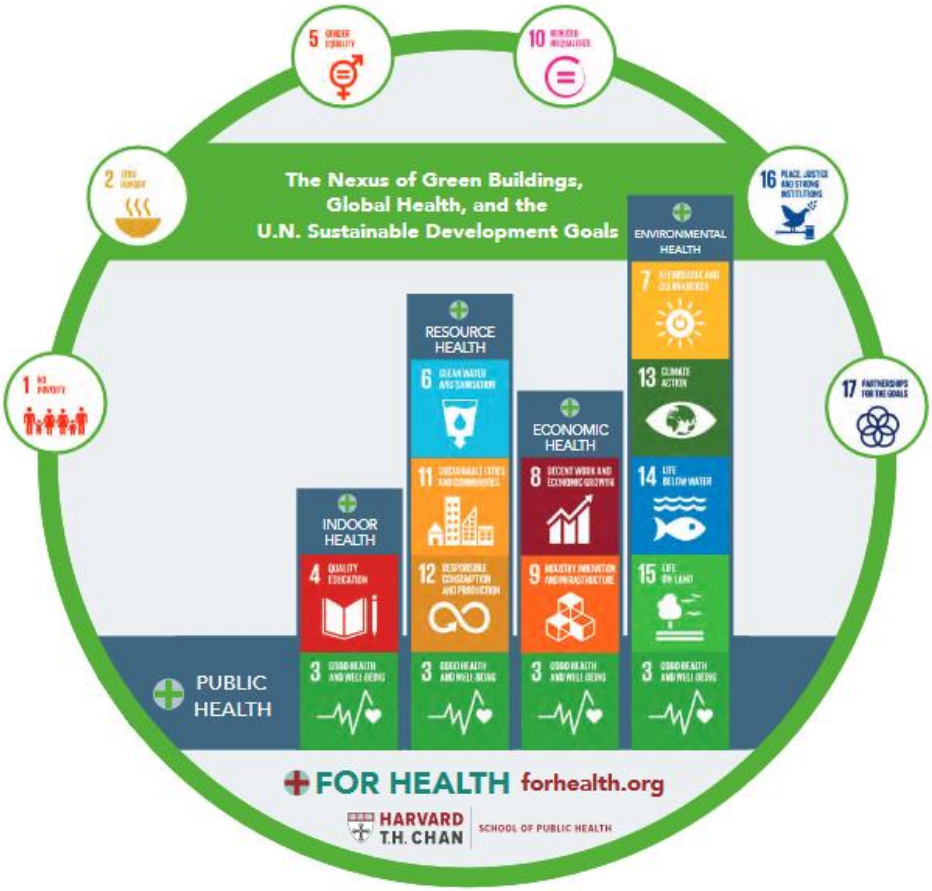


Ilustração 113 – O nexo entre construção sustentável, saúde global e ODS. (Allen *et al.*, 2024, p. 21)

3.1.3. A MATERIALIZAÇÃO COMO CONSTRUÇÃO

Intrinsecamente ligado à materialização da arquitetura, existe a noção de tectónica, cuja definição – ambígua e com vários significados – tem variado ao longo do tempo. Usualmente definida como arte da construção, mas também, como expressão construtiva ou, complementarmente, como poética da construção, "[…] capaz de reunir os aspetos materiais da arquitetura aos aspetos culturais e estéticos." (Amaral, 2009, p. 151; Frampton, 1998, pp. 19, 20; Frampton, 1999, p. 13).

Oriundo da antiguidade clássica, o termo deriva do grego *tekton* (carpinteiro/construtor) e este, por sua vez, do sânscrito *taksan* (carpintaria/uso do machado). A conotação poética surge pela primeira vez na poesia grega e védica, onde o *tekton* (carpinteiro) é descrito como um poeta envolvido com a obra de arquitetura (*archié* –origem, começo) + (*tektonikós* – ação de construir, construção) e ao construtor (*architekton*) (Frampton, 1998, p. 23; Ferreira, 2012, pp. 21, 22; Amaral, 2009, p. 151; Frampton, 1999, pp. 14, 15).

Transpondo para a modernidade, existe um momento disruptivo na teoria da arquitetura, quando, no século XVIII, a técnica começa a ganhar dimensão e autonomia face à arquitetura, devida ao desenvolvimento exponencial do cálculo diferencial e da física aplicada, originando projetos com uma nova estética, profundamente condicionada pela estrutura e alterando substancialmente a relação entre a materialidade e a arquitetura (Amaral, 2009, p. 152).

Gostaríamos de salientar, entre outros, o contributo de dois teóricos da arquitetura fortemente relacionados com a evolução do conceito de tectónica, até aos dias de hoje: Gottfried Semper (1803 -1879) e Keneth Frampton (1930).

Na sua obra Der Stil (1860), onde advoga que a arte monumental da arquitetura deriva das artes industriais (Frampton, 1999, p. 93), Semper "[…] prescreve sutilmente uma arquitetura coerente com a utilização dos seus materiais, anunciando uma relação ideal entre material e forma, que seria uma relação direta de causa e efeito." (Amaral, 2009, p. 153), enquanto, que para Frampton (1995) "[…] a tectônica se refere, não unicamente à estrutura, mas à pele da construção (o envelope), […], demonstrando que a construção é uma complexa montagem de elementos diversos" (Amaral, 2009, p. 162).

De realçar que a discussão acerca da materialidade (e consequentemente da tectónica) foi um tema relegado para segundo plano ao longo do século XX, tendo sido dada predominância ao espaço e à função*,* tal como pode ser observado na obra de vários arquitetos, como Bruno Zevi ou Le Corbusier (Amaral, 2009, p. 159), que adverte para o facto de "[…] lo construído es, en primer lugar y ante todo, una construcción y sólo después un discurso abstracto basado en la superfície, volumen y plano […]." (Frampton, 1999, p. 13).

Contudo, quer Le Corbusier,(1887-1965), como posteriormente Peter Collins (1920-1981) realçaram a importância das tecnologias de construção e da engenharia , tendo este último proposto a tectónica como uma nova disciplina a integrar o *curricula* das faculdades de arquitetura, caracterizada por uma abordagem multidisciplinar, com a participação de arquitetos, engenheiros e empreendedores (Amaral, 2009, pp. 160, 164; Ferreira, 2012, p. 47).

Deve-se também destacar o desenvolvimento da teoria da arquitetura e da poética tectónica no sentido de acompanharem os desenvolvimentos ocorridos nas áreas da digitalização, da desmaterialização e da sustentabilidade, promovendo soluções construtivas e arquitetónicas de qualidade, sustentáveis e circulares (Ferreira, 2012, pp. 48, 49 , 55), as quais, por força da sua especificidade poderão dar origem uma tectónica e fenomenologia características.

3.1.3.1. IDEIA, CONCEITO, FENÓMENO

A arquitetura pode ser encarada, do ponto de vista conceptual, como um reflexo que materializa ideias e imagens, no espaço, cultura e tempo. Em oposição à superficialidade e notória diminuição da materialidade da arquitetura moderna, os materiais expressam a individualidade e veracidade do edifício através da sua *patine*, impressa pelo tempo e pela utilização do edifício (Pallasmaa, 2011, pp. 30, 67; Hale, 2017, p. 76) contrapondo a tendência para "[…] o desaparecimento da sua essência física, sensorial e corporal." (Pallasmaa, 2011, p. 32).

A par do conceito de tectónica, também o conceito de regionalismo crítico (*Critical Regionalism*), enunciado por Kenneth Frampton e baseado na topografia, clima, luz e tectónica de uma obra e local – em oposição à globalização da arquitetura – vai ao encontro de uma materialidade específica, realçando a relação existente entre um

edifício, a sua construção e o seu significado (Ilustração 114) (Szacka e Patteeuw, 2019; Frampton, 1996, pp. 468, 469).

> El Regionalismo Crítico enfatiza tanto lo táctil como lo visual. Está consciente de que el medio ambiente puede ser experimentado en términos distintos a la vista. Es sensible ante percepciones complementarias tales como los distintos niveles de iluminación, sensaciones ambientales de frío, calor, humedad y movimiento del aire, aromas y sonidos diferentes producidos por materiales diferentes de volumen diferente, e incluso las sensaciones cambiantes inducidas por los acabados del pavimento, que provocan en el cuerpo involuntarios cambio de postura, ritmo del paso, etc. Se opone a la tendencia a reemplazar la experiencia por la información, en una era dominada por los medios de comunicación (Frampton, 1993, p. 332).



Ilustração 114 – Álvaro Siza: a Quinta da Malagueira como exemplo de racionalismo crítico. (Frampton, 2016)

Originalmente relacionado com materialização, o termo *tectónica* pode assumir um duplo significado: construção (o processo de execução) e ocupação (vestígios acumulados do uso) (Hale, 2017, pp. 76, 79).

No primeiro caso, interpretado como conhecimento de construção, e no segundo como utilização do espaço e à respetiva interação com o corpo, a mente e os vários sentidos – tato, paladar, audição, olfato e visão – facetas eventualmente negligenciadas por alguns, contudo incontornáveis no contexto da fenomenologia (Hale, 2017, p. 76; Pallasmaa, 2011, p. 39).

No que concerne ao primeiro significado e à relação entre técnica e arte, Manuel Tainha refere-se do seguinte modo:

> O acto criativo comum a todas as artes, diz-se, consta de um procedimento intelectual de natureza cognitiva (fantasia-imaginação) que se finaliza num procedimento técnico, isto é, a escolha de uma matéria e da maneira de a tratar. […] A técnica não pode ser separada da criação (Taínha, 1994, p. 73).

3.1.3.2. OS MATERIAIS

Como já abordado anteriormente, num contexto de desenvolvimento sustentável, outros materiais e tecnologias devem ser considerados, de modo a projetar e construir com o mínimo de impacte ambiental e de riscos para a saúde humana, em que tanto a energia como os materiais provenham de fontes renováveis (Joseph e Tretsiakova-McNally, 2010, p. 402).

Deste modo, porém, numa aceção mais vasta, Álvaro Siza (2019) refere-se assim, acerca da relação entre natureza, construção e arquitetura:

> A relação entre natureza e construção é decisiva na arquitectura. Esta relação, fonte permanente de qualquer projeto, representa para mim como que uma obsessão; sempre foi determinante no curso da história e apesar disso tende hoje a uma extinção progressiva (Siza, 2019, p. 17).

Tal como patente na Ilustração 115, foi só a partir do pós-guerra (1945) que, pela primeira vez, a maioria dos materiais se tornou proveniente de processos extrativos, não renováveis e intensivos em carbono, sendo que três deles – betão, aço e alumínio – são responsáveis por cerca de 23% das emissões globais de GEE (Dyson *et al.*, 2023, p. 3).

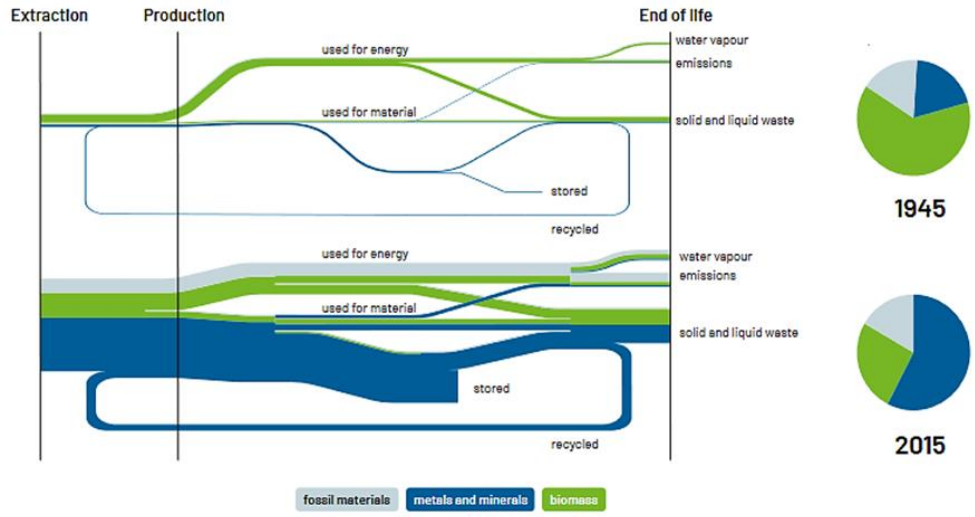


Ilustração 115 – Fluxo global de materiais usados na construção, em 1945 e em 2015. ([Adaptado a partir de:] Dyson *et al.*, 2023, p. 3)

De notar que tanto o cimento, o betão e o aço têm sido objeto de melhorias, com vista à diminuição da sua pegada ambiental e carbónica. É o caso do aço verde (*Green Steel)*, caracterizado pela utilização de aço reciclado ou de processos de produção mais ecoeficientes (Silva, Prola e Silva, 2025, p. 29).

Desde a antiguidade, a arquitetura esteve baseada em materiais locais, naturais e renováveis, tendo progressivamente ocorrido uma inversão da situação, que se acentua com o início da revolução industrial e atinge o pico no final do século XX, com uma dependência quase total dos materiais não-renováveis (Ilustração 116) (Ashby013, p. 6).

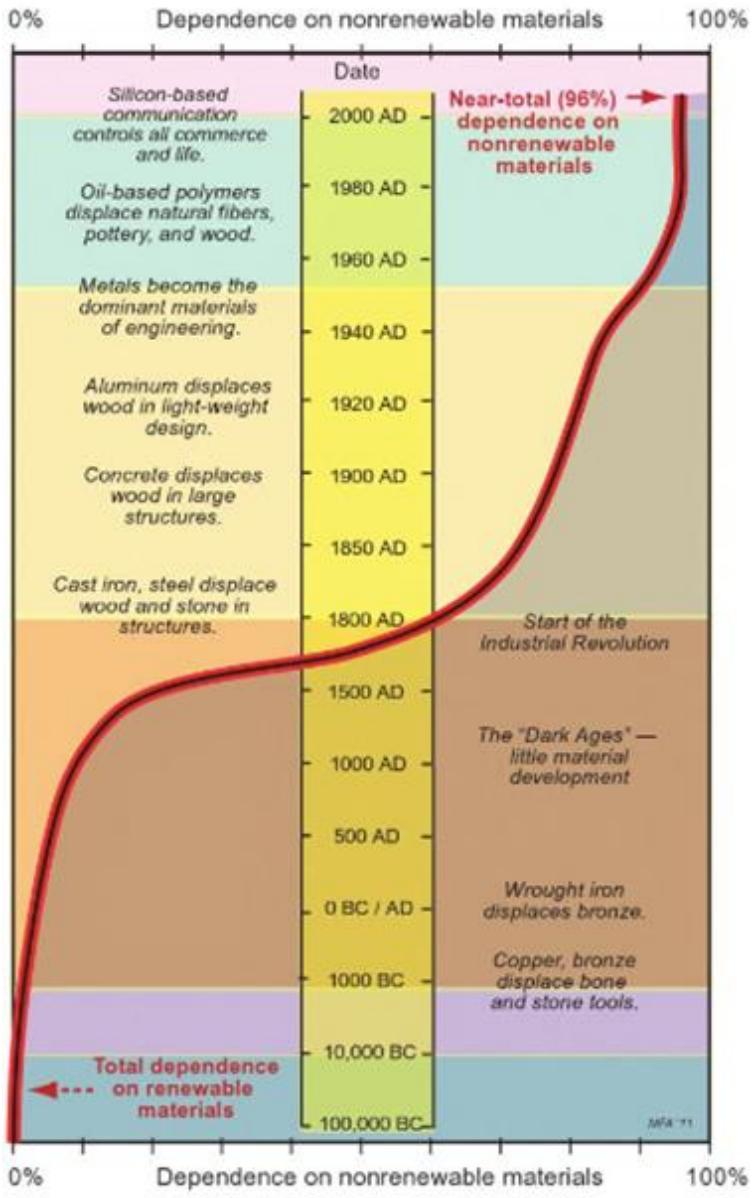


Ilustração 116 – A dependência de materiais não-renováveis ao longo do tempo. (Ashby, 2013, p. 7)

A utilização de materiais renováveis é uma das três estratégias possíveis de aplicação imediata (evitar – mudar – melhorar), no sentido de descarbonizar o setor da construção e de contribuir para a mitigação e combate às alterações climáticas antropogénicas. A tripla abordagem "Avoid-Shift-Improve" (Ilustração 117) é um roteiro que consiste, resumidamente, no seguinte:

1. Evitar (*Avoid*) a extração e a produção de matérias-primas promovendo a circularidade da construção, significando a afetação de menos materiais e produtos, assim como da utilização da reciclagem e reutilização, sempre que possível;

2. Mudar (*Shift*) para materiais e práticas regenerativas através da prescrição e aplicação de materiais de baixo carbono e renováveis, ética e ambientalmente responsáveis;

3. Melhorar (*Improve*) os métodos de produção dos materiais e produtos convencionais, não renováveis e intensivos em carbono, e apenas os utilizar em último caso (Dyson *et al.*, 2023, pp. ix, 14, 77).

> The transition to sustainable, low-carbon materials will revolutionise the way we construct cities, infrastructure and buildings. To achieve a 40 per cent reduction in embodied carbon by 2030 – and completely decarbonise building materials by 2060 – we must immediately support viable solutions across all the major material types simultaneously. Transitioning to a low-carbon future requires avoiding new raw material extraction of materials. If buildings are designed for circular disassembly and reassembly, they technically become material banks at the end-of-life. To reduce embodied emissions, non-renewable resources such as concrete and steel need to be obtained from recycled or reused sources wherever possible. This should be complemented by a shift towards renewable, bio-based products if practical. In sum, a revolution in building materials requires: 1) dramatically reducing emissions from conventional (non-renewable) building materials, and 2) accelerating growth in alternative (renewable) materials. (Dyson *et al.*, 2023, p. 14).

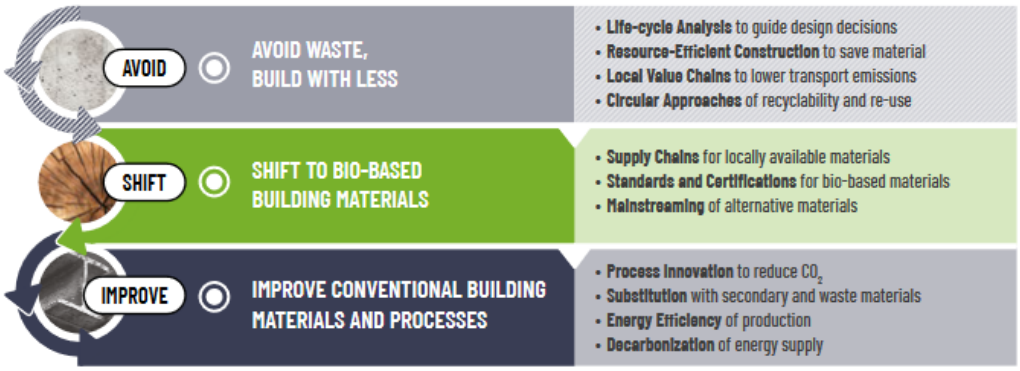


Ilustração 117 – A abordagem *Avoid-Shift-Improve* para a descarbonização de edifícios e do setor. (Dyson *et al.*, 2023, p. 14)



Ilustração 118 – As dez categorias de materiais. ([Adaptado a partir de:] Dyson *et al.*, 2023, pp. xvi, xvii)

No seu recente trabalho acerca da importância dos materiais para a descarbonização do setor da construção, Dyson *et al.* (2023) propuseram recentemente uma classificação, dividida em três grandes grupos e dez classes, em que os materiais renováveis têm destaque: 1. Materiais não-renováveis (betão, aço, alumínio, plástico e vidro); 2. Transicional (alvenaria); 3. Materiais renováveis (madeira, bambu, biomassa e materiais vivos) (Ilustração 118) (Dyson *et al.*, 2023, pp. xvi, xvii).

De notar que a sua implementação será diferente conforme os cenários: orientada para a reabilitação, renovação ou para a construção nova, diretamente relacionada com o nível de desenvolvimento da região ou do país e das suas de necessidades especificas, como as resultantes de fluxos migratórios internos e/ou externos.

Em todo o caso, e principalmente na segunda situação, existe uma franca oportunidade de reinventar o modo como construímos os nossos edifícios e cidades, melhorando substancialmente o modo como fabricamos os materiais convencionais, ao mesmo tempo que implementamos a transição para materiais renováveis, e nos reconciliamos com o conhecimento e as técnicas da arquitetura vernacular, específica de cada local (Dyson *et al.*, 2023, p. 77).

Devemos ter presente que um edifício sustentável não pode ser projetado e construído sem materiais sustentáveis, o que pressupõe que, além dos princípios de circularidade a que os sistemas construtivos devem obedecer (como a desconstrução seletiva e a minimização de RCD), também os materiais e produtos devem ser concebidos de modo a minimizar os impactes nas suas várias vertentes e a promover a saúde humana e a harmonização com o ambiente: “An ideal building would be inexpensive to build, last forever with modest maintenance, but return completely to the earth when abandoned” (Joseph e Tretsiakova-McNally, 2010, p. 401).

3.1.3.3. CONSTRUIR E REABILITAR: O TODO E AS PARTES

A construção e a reabilitação ou renovação profunda do edificado têm assumido diferente relevância ao longo do tempo, sendo que, atualmente, esta última tenha ganho destaque devido aos benefícios ambientais e sociais diretamente associados.

Do ponto de vista ambiental, em geral, a reabilitação de um edifício causa menor impacte que uma construção de raiz, mesmo sem contar com a parcela respeitante à utilização do solo, seja na forma de emissões de GEE (como carbono (CO_2) e nitrogénio (NO_X)) ou como RCDs, entre outros (Ilustração 119) (Pinto, 2023, p. 38).



Ilustração 119 – Emissão de GEE e geração de RCDs aquando da demolição de um edifício. (Brownell, 2023)

A reabilitação é, sem dúvida, a abordagem mais sustentável e eficiente de maneira a reduzir as emissões ao longo das diversas fases do ciclo de vida, essencialmente através de dois modos: melhorando o desempenho energético (operacional) e minimizando o carbono incorporado nos materiais (fabrico, transporte e construção) (Elefante, 2024; Dyson *et al.*, 2023, p. 19).

A questão da energia incorporada é de extrema importância, e será tratada mais adiante, podendo em muitos casos – devido às características, da tipologia do edifício em causa e da escolha dos respetivos materiais – representar várias décadas de energia operacional e de amortização dos impactes dos novos edifícios relativamente à reabilitação (Brownell, 2023; Dyson *et al.*, 2023, pp. 19, 20).

De acordo com um **relatório do Preservation Green Lab** (2011), pode concluir-se que, num contexto norte-americano, pode demorar de 10 a 80 anos (*payback period*) para que um edifício novo, 30% mais eficiente do que a média dos edifícios existentes, possa compensar os impactes adversos da nova construção (Tabela 23):

> It is often assumed that the Co2-reduction benefits gained by a new, energy efficient building outweigh any negative climate change impacts associated with the construction of that building. This study finds that it takes 10 to 80 years for a new building that is 30 percent more efficient than an average-performing existing building to overcome, through efficient operations, the negative climate change impacts related to the construction process (Preservation Green Lab, 2011, p. VIII).

Tabela 23 – Período para a compensação dos impactes adversos resultantes de construção nova

Building Type	Chicago	Portland
Urban Village Mixed Use	42 years	80 years
Single Family Residential	38 years	50 years
Commercial Office	25 years	42 years
Warehouse to Office Conversion*	12 years	19 years
Multifamily Residential	16 years	20 years
Elementary School	10 years	16 years
Warehouse to Residential Conversion	Never	Never

Fonte: ([Adaptado a partir de:] Preservation Green Lab, 2011, p. IX)

Por isso, tendo em conta a importância do tema, e citando a icónica frase do arquiteto Carl Elefante, antigo presidente do AIA (American Institute of Architects), reconhecido pela sua atividade relacionada com a advocacia da construção sustentável: “The greenest building… is the one that is already built.” (Elefante, 2024).

Em todo o caso, e admitindo a necessidade imperiosa de demolição por motivos que vão além da simples obsolescência técnica, os temas da reciclagem e, principalmente da reutilização – fortemente ligados à construção circular – ganham destaque como modo de aumentar o tempo de vida útil dos produtos e de diminuir as emissões e os resíduos, pelo que é essencial prever a possibilidade de desconstrução seletiva desde o inicio do projeto de arquitetura (Brownell, 2023; Dyson *et al.*, 2023, p. 23; Pinto, 2023, pp. 35, 36)

Efetivamente, o projeto arquitetónico é essencial para implementar o DfD e a desconstrução ou construção reversa – definida como o processo de desmantelamento ou desmontagem um edifício, de modo a poder recuperar os materiais para reciclagem e reutilização – visto estar profundamente associado com alterações aos métodos e aos processos de construção correntes (Ilustração 120) (Rios, Chong e Grau, 2015, pp. 1296, 1297; Pinto, 2023, pp. 35, 36).



Ilustração 120 – Demolição *versus* desconstrução. (Dyson *et al.*, 2023, p. 20)

Regra geral, os edifícios são concebidos como sendo permanentes, sem terem em consideração o ciclo de vida e o inerente processo de recuperação de materiais, transformando o projeto num potencial obstáculo, pelo que os projetistas, nomeadamente os arquitetos, são fundamentais para alcançar este objetivo (Rios, Chong e Grau, 2015, p. 1301).

De referir que em termos gerais, as renovações geram menos 50 a 75% de emissões que as construções novas e as estratégias de DfD e de construção modular podem resultar numa redução entre 10 a 50% dos impactes ao longo de todo o ciclo de vida, pelo que a melhor opção será a extensão da vida útil do edifício (Dyson *et al.*, 2023, pp. 19, 23).

Com vista a obviar a esta questão, deverá ser fomentada a literacia sobre construção sustentável e circular junto dos arquitetos, engenheiros, construtores e demais *stakeholders*, e implementados os seus princípios, no curto-prazo (Pinto, 2023, p. 40).

Nesse sentido, abordagens holísticas como a "Architectural Deconstruction Design" (ADD), foram desenvolvidas para serem usadas como um roteiro durante a fase de projeto de execução, de modo a promover a recuperação de materiais e a diminuir os impactes da construção, manutenção e desconstrução (Metin e İpekç, 2015, pp. 523, 524).

Os princípios básicos da ADD aplicados à conceção de elementos de edifícios são os seguintes:

1. Separar os elementos de construção em camadas;
2. Diminuir o número de componentes;
3. Diminuir o número de fixações (p.e., parafusos);
4. Utilizar materiais com dimensões estandardizadas;
5. Utilizar materiais prefabricados;
6. Prever conexões acessíveis;
7. Escolher fixações mecânicas em vez de químicas (Metin e İpekç, 2015, p. 523).

De notar que a aplicação destes princípios, com a finalidade de viabilizar o potencial de reutilização e reciclagem dos materiais, não é despiciendo e tem consequências – positivas ou negativas – em termos ambientais, como no consumo de energia e de água, na emissão de poeiras, ruído ou COVs, e ainda na geração de águas residuais e RCDs, afetando os recursos naturais, o ecossistema e a saúde humana (Ilustração 121) (Metin e İpekç, 2015, p. 524; Pinto, 2023, p. 40).

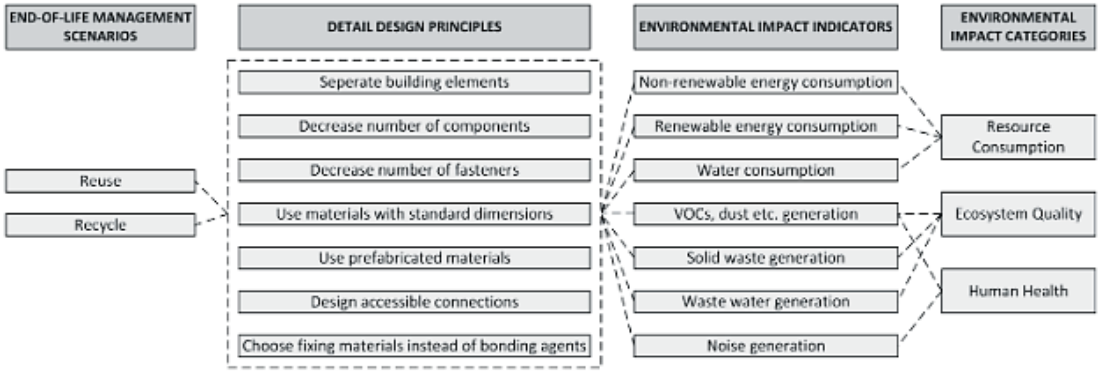


Ilustração 121 – A abordagem ADD e respetivas consequências ambientais. (Metin e İpekç, 2015, p. 524)

3.2. ENERGIA, MATERIAIS E SISTEMAS

Existe uma forte relação entre a energia (incorporada e operacional) de um edifício e os Materiais, Produtos e Sistemas Construtivos (MPSC) utilizados na sua construção. Como já referido em capítulos anteriores, a energia incorporada (*embodied energy*), contabilizada até à entrada em serviço do edifício, respeita principalmente à energia necessária para a extração, fabrico, transporte e montagem (*up-front carbon*) dos MPSC correspondentes às fases A1 – A5 da ACV (Ilustração 122) (Magwood, Huynh e Olgyay, 2023, p. 16; Pelsmakers, 2015, p. 197; Hegger *et al.*, 2008, p. 159; Jungclaus *et al.*, 2021, p. 7).

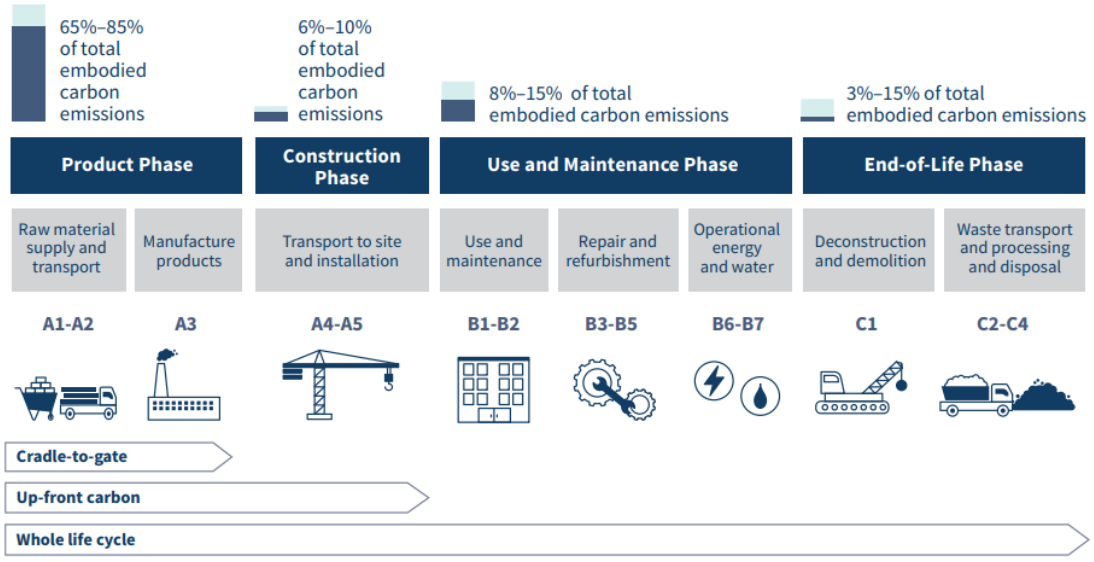


Ilustração 122 – A energia incorporada e as respetivas emissões ao longo do ciclo de vida de um edifício. (Magwood, Huynh e Olgyay, 2023, p. 16)

A energia operacional, muitas vezes tida como exclusiva ou dominante na temática da eficiência energética, deve, nesta perspetiva holística, ser devidamente enquadrada e relativizada.

Assim, num sentido lato, um edifício energeticamente eficiente é aquele que não só se caracteriza por um baixo consumo energético operacional, devido à sua conceção, materiais e instalações (sem esquecer o adequado comportamento dos utilizadores, que pode comprometer toda a estratégia), mas, também, com a baixa energia incorporada nos materiais e sistemas (Rosenbloom *et al.*, 2023, p. 8; Pelsmakers, 2015, p. 199).

Este assunto irá ser desenvolvido mais adiante, porém, deve-se desde já referir que, para além da utilização de materiais de baixo carbono, os esforços para diminuir a energia incorporada também incluem a redução das distâncias e dos resíduos, o recurso à prefabricação e, de especial interesse para a economia circular, a reutilização de materiais e a adaptação de espaços (Magwood, Huynh e Olgyay, 2023, p. 6).

3.2.1. EDIFÍCIOS DE BAIXO-CARBONO

Das emissões de GEE relacionadas com os edifícios e a construção, uma parte considerável (cerca de 25%) respeitam ao carbono incorporado, associadas aos materiais e aos processos de construção, o que significa uma larga margem de melhoria para arquitetos, engenheiros, construtores (Jungclaus *et al.*, 2021, p. 6).

Em todo o caso, já é possível, com as ferramentas e a tecnologia atualmente disponíveis, reduzir significativamente esta parcela das emissões pela via da especificação e substituição de materiais alternativos de baixo carbono, sem custos adicionais (Jungclaus *et al.*, 2021, p. 6; Magwood, Huynh e Olgyay, 2023, pp. 5, 21).

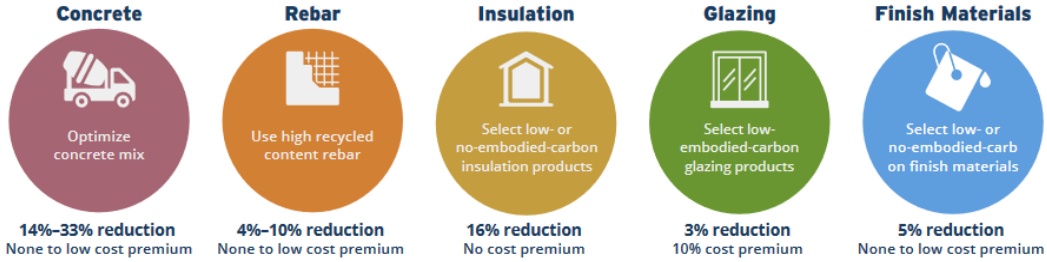
Num estudo mencionado por Jungclaus *et al.* (2023), o carbono incorporado *up-front* para uma determinada tipologia de edifícios, foi reduzido em 46%, com menos de 1% de acréscimo de custo, introduzindo as seguintes alterações:

1. A otimização da mistura do betão pronto;
2. A escolha de materiais de acabamento e de isolamento sequestradores ou de baixo-carbono;

3. Utilização de varões e de aço estrutural com alta percentagem de material reciclado;

4. Aplicação de caixilharias e envidraçados com reduzida pegada de carbono;

5. Otimização da quantidade e da qualidade dos materiais, nomeadamente, o sistema estrutural, garantindo segurança e estética (Ilustração 123) .



up to **140% reduction**

up to **50% reduction**

	As-Built Materials	Best Available	Best Possible
Concrete Mix	0%–14% SCM	15%–29% SCM	30%–50% SCM
Cavity Insulation	Fiberglass	Cellulose	Agricultural residue fibers
Exterior Cladding	Brick	Engineered wood	Bamboo or bio-composite
Flooring	Carpet and tiling	Linoleum and cork	Mycelium composite and clay
Interior Cladding	Drywall	Drywall lowest-emitting product	Lime cork plaster

Note: SCM = supplementary cementitious materials.

Ilustração 123 – Ações a implementar e substituição de materiais com vista à redução de carbono incorporado nos edifícios. ([Adaptado a partir de:] Jungclaus *et al.*, 2021, p. 6; Magwood, Huynh e Olgyay, 2023, p. 22)

Ao mesmo tempo, deve-se considerar a escolha de toda uma série de materiais emergentes, sequestradores ou de baixo-carbono, cada vez mais disponíveis no mercado, de extrema importância para a descarbonização do edificado (Jungclaus *et al.*, 2021, p. 6; Magwood, Huynh e Olgyay, 2023, p. 22):

> Materials with high emissions (e.g., concrete, steel, aluminum, plastic, glass) can be replaced with less carbon-intensive materials that are increasingly available in the market. Results from the NRCan study comparing material costs of different insulation and cladding products (two of the most impactful categories) showed no direct correlation

> between the cost and the embodied carbon of materials. This indicates that significant embodied carbon reductions are possible at competitive cost. An increased use of materials with negative emissions (carbon-storing bio-based materials) enables the possibility of achieving zero emissions and even net negative emissions for new homes. An uptake of biobased materials such as agricultural residues, waste and recycling stream fibers, purpose-grown crops, and climate-smart timber is vital in addressing housing shortages while temporarily locking away carbon at this critical moment when global carbon emissions are at their peak. (Magwood, Huynh e Olgyay, 2023, p. 22)

Em termos gerais, e na linha do acima mencionado, é possível obter uma redução entre 30% e 50% com materiais comercialmente disponíveis, economicamente acessíveis e satisfazendo requisitos técnicos e regulamentares, no curto-prazo e sem disrupções significativas, focando essencialmente em algumas categorias de materiais: betão, isolamento, revestimentos e interiores (*hotspots*), os quais representam mais de 70% das emissões totais de uma construção nova.

A redução pode atingir até 140%, utilizando, entre outros, materiais *bio-based* emergentes (p.e. micélio) ou clássicos (p.e., bambu ou cortiça), sequestradores de carbono (Ilustração 136) (Magwood, Huynh e Olgyay, 2023, p. 5).

A Pegada Total de Carbono (PTC) ou Whole Life Carbon Footprint (WLCF) de um edifício é definida como o somatório das emissões de carbono operacional (p.e., iluminação, aquecimento e arrefecimento) e das emissões associadas aos materiais e à construção (Pelsmakers, 2015, p. 199).

Embora tenha um alcance mais abrangente do que aquele que é correntemente utilizado no meio técnico nacional (cuja discussão se reduz quase exclusivamente à energia operacional) é, contudo, manifestamente insuficiente numa abordagem de ciclo de vida, por duas ordens de razões: a) a eficiência energética, com vista à redução da energia operacional, implica a utilização de mais materiais e equipamentos, o que aumenta a energia incorporada; b) a importância relativa e proporcional da energia incorporada aumenta à medida que a energia operacional diminui (Pelsmakers, 2015, p. 199).

De modo a refletir a fases do ciclo de vida e os tipos de impactes ambientais associados, Huynh *et al.* (2023), propõem a seguinte classificação:

1. Material Carbon Accounting (*Up Front*): respeita às emissões de carbono incorporado, devidas exclusivamente aos materiais e à construção (fases A1-A5) e quantificadas pelo indicador potencial de aquecimento global;

2. Whole Life Carbon Assessment (WLCA): respeita às emissões do carbono operacional e incorporado ao longo de todo o ciclo de vida (fases A1-A5 + B1-C4) e quantificadas pelo indicador GWP

3. Whole Building Life Cycle Assessment (WBLCA): respeita a todos os indicadores e categorias de impacte aplicáveis (p.e., potencial de aquecimento global, potencial de depleção de ozono, acidificação, etc.), em todas as fases de ciclo de vida (A1 – C4) (Ilustração 124) (Huynh *et al.*, 2023, p. 31).

Deste modo, um edifício rotulado como sendo de baixo carbono deverá considerar sempre a componente do carbono incorporado, pelo que o seu cálculo, pelo menos nas fases A1 – A5 (*Up Front*), é incontornável na fase de projeto, de modo a poder tomar decisões justificadas.

Ao considerar a energia operacional e o carbono incorporado em todas as fases do ciclo de vida, nomeadamente C1 – C4 (demolição, desconstrução, resíduos, reciclagem e reutilização) a WLCA assume uma importância especial no contexto da construção circular, da mesma forma que a WBLCA, porém, numa aceção mais vasta e holística.

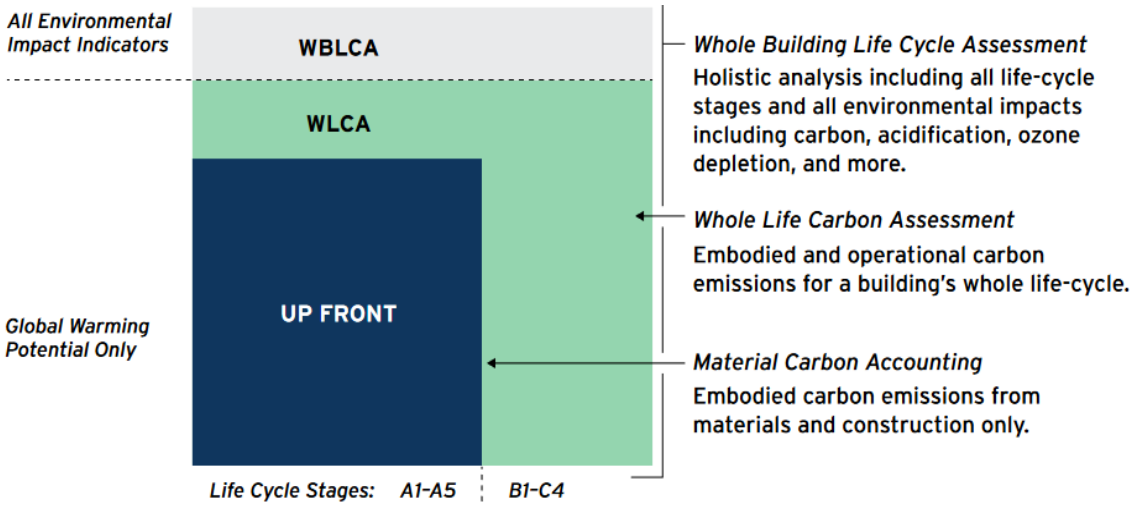


Ilustração 124 – Classificação da pegada de carbono e ambiental de um edifício em função dos impactes e das fases do ciclo de vida considerados. (Huynh *et al.*, 2023, p. 31)

3.2.1.1. A DIRETIVA DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS

Desde 2002 que a Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa ao desempenho energético dos edifícios, foi objeto de alterações substanciais e de reformulações, nomeadamente em 2010 (2010/31/UE) e 2018 ((EU) 2018/844) (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2024).

Mais recentemente[12], em novembro de 2023, o Parlamento Europeu aprovou alterações à proposta de diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho (C/2023/418), da qual se aguarda a respetiva publicação (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 1).

Tendo em conta o âmbito deste trabalho, o foco serão as alterações introduzidas no novo documento e que vão ao encontro dos princípios da economia circular, nomeadamente o programa Objetivo 55 e o Novo Bauhaus Europeu (União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2024, pp. 1, 2), num contexto de eficiência energética alargado, motivo principal da reformulação.

Assim, e nesse sentido, desde logo a obrigatoriedade de calcular o PAG de todo o ciclo de vida para novos edifícios e a desejável utilização do edificado como sumidouro de carbono (União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2024, pp. 2, 3), num quadro harmonizado da União Europeia (União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2024, p. 13).

Como tal, recomenda-se a aplicação de materiais com menor intensidade carbónica "[…] baseados na natureza, sustentáveis e locais […]" e com capacidade de armazenar carbono "[…] através da utilização de materiais à base de madeira." (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, pp. 4, 5).

A questão da qualidade do ar interior e da saúde humana é também abordada, chamando a atenção para a necessidade da proteção térmica dos edifícios devido à alta probabilidade de existência de ondas de calor, concretamente por meio de uma inércia térmica adequada, e de técnicas de arrefecimento passivo e proteção solar, a partir de […] materiais de origem biológica e geológica […] (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 4) e de infraestruturas verdes (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, pp. 4, 5, 17).

[12] Posteriormente, em 24 de abril de 2024, foi publicada a Diretiva (EU) 2024/1275 do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação).

Os edifícios são encarados como "[…] reservatório de materiais significativo [,,,] (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 4) estabelecendo uma ligação com a economia circular e o NBE "[…] promovendo a renovação e a reutilização adaptativa em detrimento da demolição e das novas construções […]" (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 4), indo ao encontro dos objetivos da Vaga de Renovação Europeia e da missão Cidades com Impacte Neutro no Clima (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 2).

> A melhoria da eficiência energética e do desempenho energético dos edifícios através de renovações profundas traz enormes benefícios sociais, económicos e ambientais. Além disso, a eficiência energética é o método mais seguro e mais rentável para se diminuir a dependência da União em importações de energia e mitigar os impactos negativos dos preços elevados da energia. Os investimentos na eficiência energética devem ser considerados como sendo de alta prioridade, tanto a nível privado como público. (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 3).

Embora o conceito de renovação profunda ainda não esteja definido, pode-se entender como uma intervenção que, numa primeira fase, […] transforma um edifício existente num edifício com necessidades quase nulas de energia." (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 11), com vista à melhoria do seu desempenho energético, sendo uma oportunidade para posteriormente abordar outros temas, tais como a qualidade do ar interior, a circularidade ou os sumidouros de carbono, entre outros (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 11).

De salientar a importância conferida à prefabricação em larga escala, como forma de viabilizar os projetos de renovação de edifícios, em linha com o NBE e "[…] que proporcionem diferentes funcionalidades, incluindo no que se refere à estética, ao isolamento e à geração de energia, bem como às infraestruturas verdes." (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 12).

A produção de energia solar nas coberturas dos edifícios é uma das estratégias preconizadas na diretiva, como forma de reduzir a dependência energética e defender os consumidores da volatilidade dos preços, em linha com a **Estratégia da UE para a Energia Solar** (2022), pelo que todos os novos edifícios deverão estar preparados para a instalação de "[…] tecnologias solares sem intervenções estruturais dispendiosas." União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2024, p. 6)

Na relação entre a tecnologia solar e a arquitetura, três estratégias podem ser consideradas: adição, integração e adaptação (Ilustração 125). Na adição, o edifício é

concebido sem considerar a utilização da tecnologia solar, sendo que, para esse efeito, as características arquitetónicas e geométricas do edifício são ignoradas. No caso contrário, quando é consciente e deliberadamente incorporada no projeto, falamos de integração. Quando este é alterado de modo a potenciar a radiação solar e o respetivo rendimento (p.e., orientação ou geometria), estamos perante adaptação: "[…] The use of solar energy then becomes a primary criterion of the architectural language for the entire building." (Hegger *et al.*, 2008, p. 109).

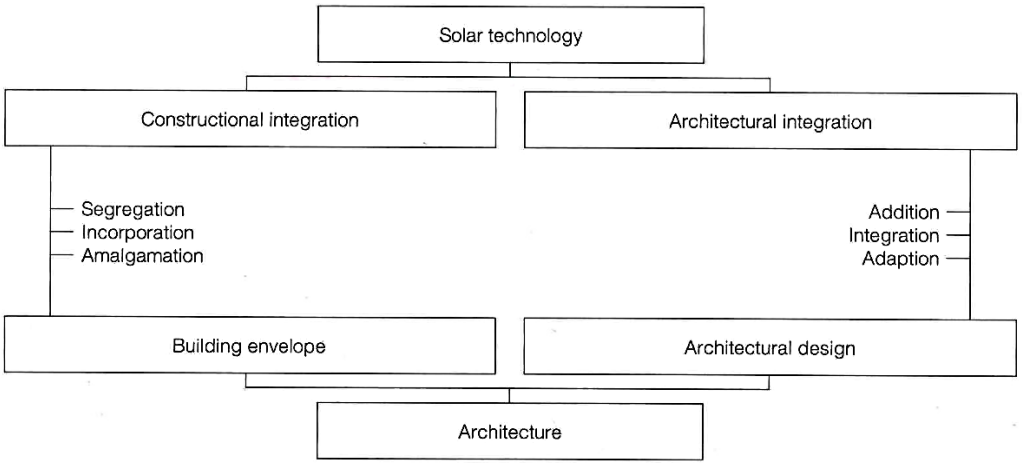


Ilustração 125 – Integração da tecnologia solar com a arquitetura. (Hegger *et al.*, 2008, p. 109)

Em todo o caso, nesta perspetiva alargada, a descarbonização e o desempenho energético respeitam a todos os componentes do edifício, desde a estrutura e os isolamentos (soluções baseadas na natureza e sustentáveis), até aos sistemas de aquecimento e arrefecimento, principais responsáveis pela energia operacional, mas que, todavia, contribuem para o carbono incorporado e respetivo PAG.

Existe atualmente uma nova geração de tecnologias de baixo carbono para efeito de aquecimento ou arrefecimento, como é o caso das bombas de calor ou das placas de aquecimento de infravermelhos (I.V.), saudável, de baixa voltagem, baixo consumo e largo ciclo de vida, podendo ser diretamente conectados à instalação fotovoltaica doméstica e disponíveis em várias versões, como é o caso das placas de aquecimento I.V. impressas com motivos personalizados (Ilustração 126), unindo a estética à função (Ekosen, 2021).

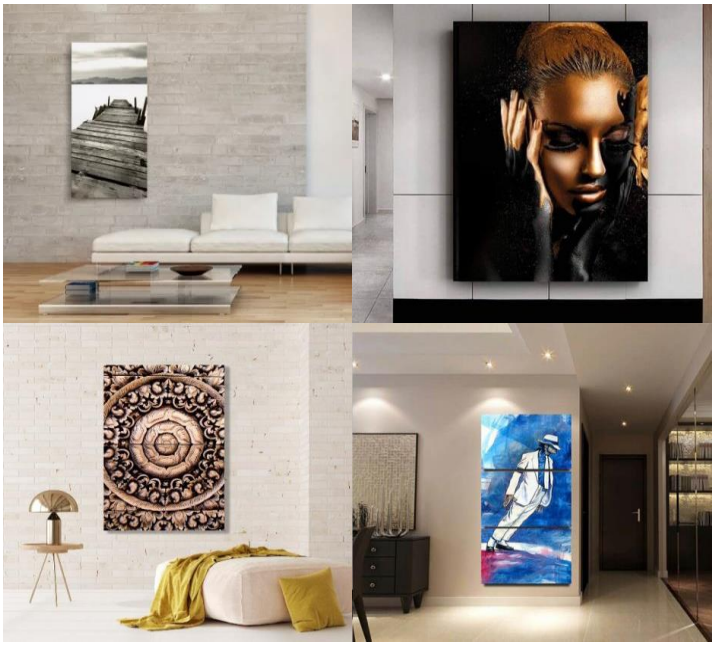


Ilustração 126 – Exemplos de placas de aquecimento I.V. de baixo carbono Sunlife ART. ([Adaptado a partir de:] Ekosen, 2021)

3.2.1.2. EDIFÍCIOS DE ENERGIA QUASE-NULA

Edifícios com necessidades de energia quase nulas ou Nearly Zero Energy Building (NZEB) é um termo que se aplica a edifícios com alto desempenho energético, sendo as suas reduzidas necessidades energéticas satisfeitas, principalmente, a partir de energias renováveis, geradas no local ou na proximidade (European Comission. Directorate-General for Energy, 2024; União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2010, p. 18; União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2021, p. 3; Portugal. Ambiente e Transição Energética, 2019, p. 1817).

A Diretiva do Desempenho Energético de Edifícios (DEE) aponta no sentido que todos os novos edifícios, públicos e privados, no espaço da União Europeia deveriam ser NZEB até ao final de 2018 e 2020, respetivamente (Ilustração 127) (European Comission. Directorate-General for Energy, 2024; União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2010, p. 21; União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2021, pp. 12, 13).

No entanto, em novembro de 2023, as alterações aprovadas no seguimento da proposta da Comissão para a revisão da diretiva atualizaram o conceito de NZEB para ZEB (Zero Emissions Building), ou edifício com emissões nulas, com as necessidades energéticas satisfeitas exclusivamente por energias renováveis, aplicável a partir de 1 de janeiro de 2026 para todos os edifícios novos ocupados, operados ou detidos pela administração

pública, e de 1 de janeiro de 2028 para todos os edifícios novos (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, p. 32).

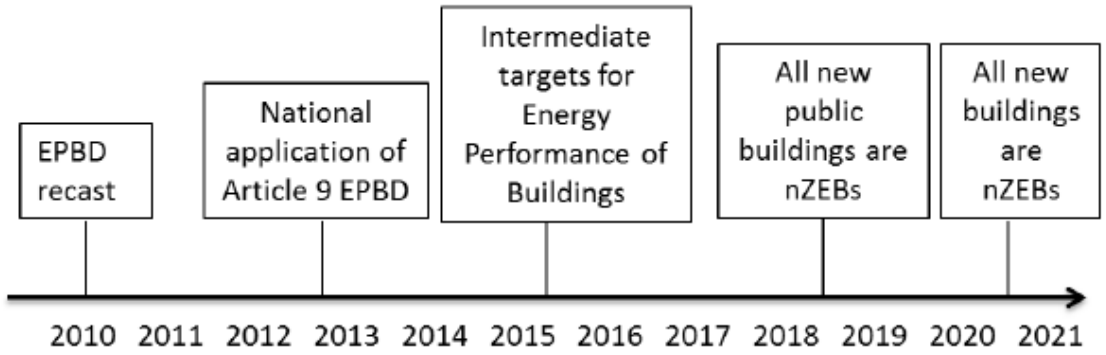


Ilustração 127 – Cronograma de implementação dos edifícios NZEB segundo a DEE (reformulada). (D'Agostino e Zangheri, 2016, p. 2)

Embora o objetivo principal ainda seja a redução da energia operacional e dos consequentes GEE, esta alteração implica, como já referido, a obrigatoriedade do cálculo do PAG ao longo do ciclo de vida do edifício – indicador do carbono incorporado, expresso em kg CO_2(e)/(m^2.ano) – e que deverá constar do certificado de desempenho energético a partir de 1 de janeiro 2027, para todos os edifícios novos (União Europeia. Parlamento Europeu, 2023, pp. 32, 34, 61; European Comission. Directorate-General for Energy, 2024).

A diretiva DEE, para além da caracterização geral de um edifício NZEB (artigos 2º e 9º), elenca os requisitos com vista à sua definição por cada um dos estados-membros, que resumidamente gravitam em torno de quatro critérios:

1. Um alto desempenho energético;
2. Necessidades reduzidas de energia;
3. Um indicador de energia primária (kWh/m^2.ano);
4. Uma elevada contribuição de energia renovável para cobrir as necessidades energéticas (Ilustração 128) (Erhorn-Kluttig e Erhorn, 2018, p. 1).

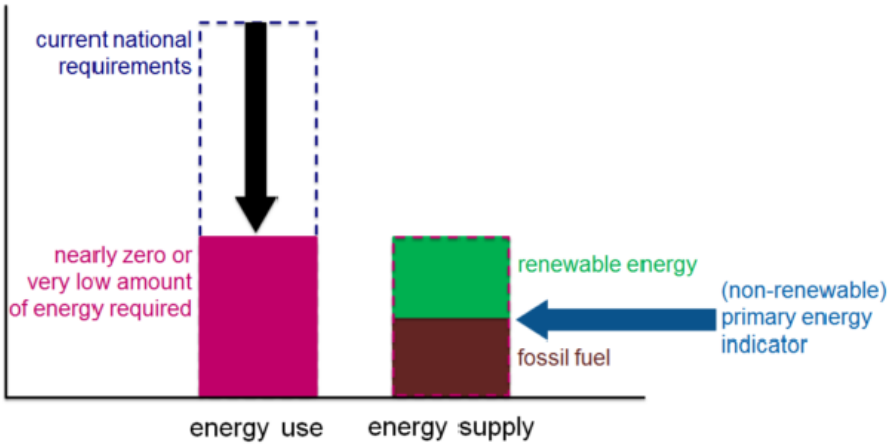


Ilustração 128 – Os artigos 2º e 9º na definição de NZEB segundo a diretiva DEE. (Erhorn e Erhorn-Kluttig, 2018, p. 2)

No caso português[13], o Decreto-lei n.º 118/2013, transpõe a Diretiva 2010/31/EU e define no seu artigo 16.º, em gerais e qualitativos, o conceito de NZEB – edifícios com necessidades quase nulas de energia (Portugal . Ministério da Economia e do Emprego, 2013, p. 4995).

> 1 - O parque edificado deve progressivamente ser composto por edifícios com necessidades quase nulas de energia. 2 - São edifícios com necessidades quase nulas de energia os que tenham um elevado desempenho energético e em que a satisfação das necessidades de energia resulte em grande medida de energia proveniente de fontes renováveis, designadamente a produzida no local ou nas proximidades. 3 - Devem ter necessidades quase nulas de energia os edifícios novos licenciados após 31 de dezembro de 2020, ou após 31 de dezembro de 2018 no caso de edifícios novos na propriedade de uma entidade pública e ocupados por uma entidade pública. (Portugal . Ministério da Economia e do Emprego, 2013, p. 4995).

No entanto, e tendo em conta que a definição nacional de NZEB depende de várias variáveis, nomeadamente a viabilidade técnica e económica, o clima, as soluções construtivas, a arquitetura e o tipo de utilização (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2014, p. 6), bem como a revisão imposta pela Diretiva 2018/844/EU, transposta internamente pelo Decreto-lei n.º 101-D/2020 (alterado pelo Decreto-lei n.º102/2021) levam a que, na sequência da Portaria n.98/2019, a definição e os requisitos tenham sido atualizados (Ilustração 129) (Portugal. Presidência do Conselho de Ministros, 2021, pp. 5–10).

[13] Tendo em conta o objetivo do trabalho, e em linha com o anteriormente feito, iremos apenas fazer referência aos edifícios residenciais, que significam a quota-parte dominante do parque edificado na Europa e em Portugal (± 80%).

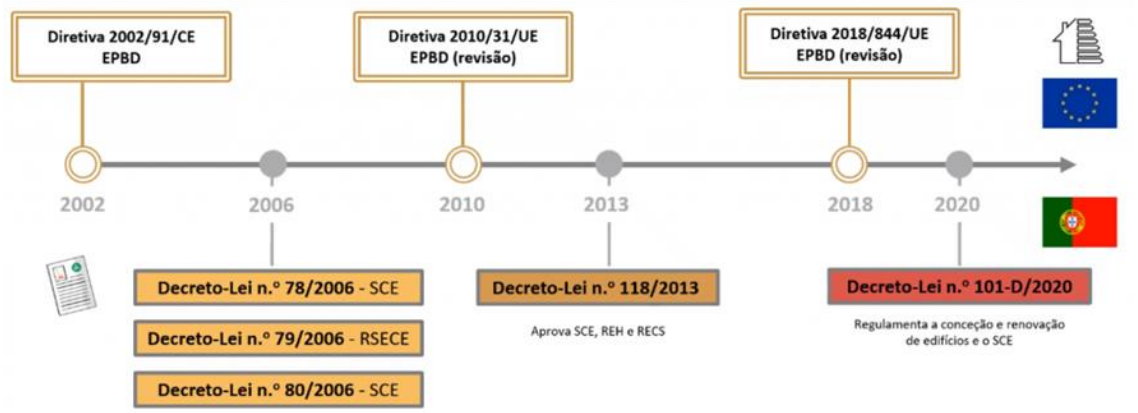


Ilustração 129 – Cronograma legislativo europeu e nacional, relacionado com a EPBD (DEE). (ADENE – Agência para a Energia, 2024)

Por sua vez, o Despacho n.º 6476-E/2021 aprova e regulamenta os requisitos mínimos de conforto térmico (necessidades de aquecimento e de arrefecimento) e de desempenho energético (classe energética, energia primária total e energia primária renovável), para que, edifícios novos ou sujeitos a grande renovação, possam ser considerados edifícios NZEB (Portugal. Ambiente e Ação Climática. Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021, pp. 330-(30), 330-(31); ADENE – Agência para a Energia, 2022, p. 3).

Contudo, a recente publicação e implementação do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), implicou a existência de requisitos adicionais previstos em alguns incentivos, nomeadamente, a que as necessidades de energia primária total (R_{NT}) sejam 20% inferiores ao padrão NZEB nacional, passando a designar-se de NZEB20 (Tabela 24) (ADENE – Agência para a Energia, 2022, p. 3).

Tabela 24 – "Requisitos NZEB20 em edifícios de habitação".

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

Fonte: ADENE – Agência para a Energia (2022, p. 4)

Devido a várias razões, entre os quais o surgimento tardio da legislação e o foco nos edifícios novos, a quota de edifícios NZEB, em Portugal, é estimada como ainda sendo abaixo dos 10% do total do parque edificado (ADENE – Agência para a Energia, 2022).

Em linha com a VRE e com a futura diretiva, a reabilitação profunda – isolamento do envelope (paredes, cobertura e caixilharias), o recurso a energias renováveis (principalmente solar térmico e fotovoltaico no próprio edifício) (União Europeia. Comissão, 2016, p. L208/48) e a aplicação de equipamentos eficientes – é essencial para a efetiva descarbonização do setor e providenciar conforto e economia aos utentes (ADENE – Agência para a Energia, 2022).

Num estudo da Comissão Europeia – **Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU** (2019) – com o objetivo de identificar e desenvolver indicadores quantitativos e qualitativos relativos às atividades de renovação e aos edifícios com necessidades quase nulas de energia (NZEB), verificou-se, no caso de Portugal, uma tendência decrescente a partir de 2014, provavelmente originada pela retoma do setor imobiliário, entre outras (Ilustração 130) (Esser *et al.*, 2019, pp. 6, 7 95).

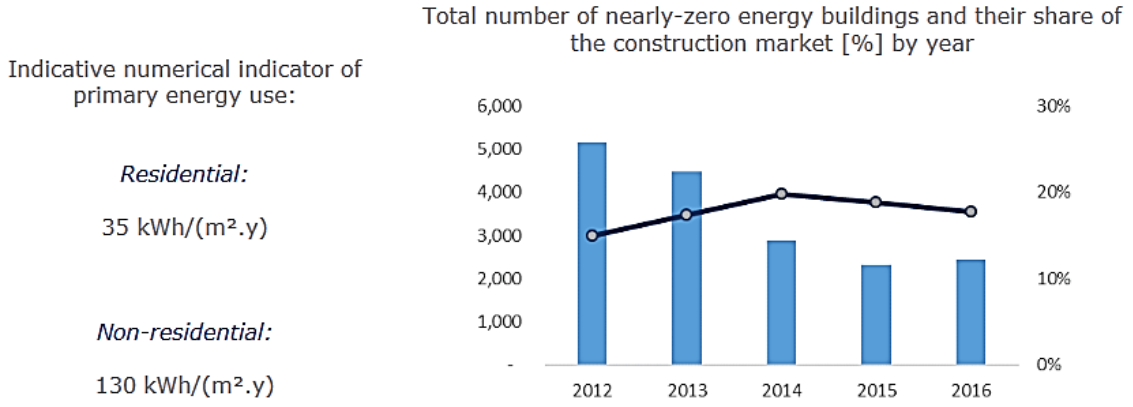


Ilustração 130 – Número total de edifícios NZEB e respetiva quota no mercado da construção português (2012-2016). (Esser *et al.*, 2019, p. 95)

Nesse sentido, e para alcançar os níveis de desempenho preconizados para os edifícios NZEB ou ZEB é crucial, e gostaríamos de destacar, a integração das tecnologias solares nos edifícios ou Building Integrated Photovoltaics (BIPV) (Kong *et al.*, 2023, p. 3), sendo esta uma área em franco desenvolvimento (Boyd e Coonick, 2018, p. 3).

> O conceito de NZEB reflete o facto de as energias renováveis e as medidas de eficiência energética funcionarem em conjunto. Quando integradas nos edifícios, as energias renováveis permitirão reduzir o nível líquido de energia fornecida. Em muitos casos, a integração no local das energias renováveis não será suficiente para reduzir as

> necessidades de energia para níveis quase nulos sem outras medidas de eficiência energética ou sem uma diminuição significativa dos fatores relativos à energia primária para as fontes de energia renováveis fora do local. Por conseguinte, requisitos mais elevados e mais rigorosos para NZEB com elevado nível de eficiência induzirão também uma maior utilização de energias renováveis no próprio edifício e deveriam resultar na adaptação de fatores de energia primária para vetores de energia fora do local, tendo em conta o seu teor de energias renováveis (União Europeia. Comissão, 2016, p. L208/48).

A Integração Arquitetónica Fotovoltaica (IAF) ou BIPV refere-se ao conceito de integrar elementos fotovoltaicos no envelope do edifício (Ilustração 131), promovendo uma relação entre a arquitetura, a estrutura, as funções dos materiais e a produção de energia renovável (Polysolar, 2015, p. 4; Boyd e Coonick, 2018, p. 3), transformando os edifícios em pequenas centrais, possibilitando que os utilizadores finais passem a produtores, em de consumidores (Callegari, Merolla e Simeone, 2023, pp. 326, 332).

Em contraste com o comumente utilizado fotovoltaico aplicado em edifícios ou Building Applied Photovoltaics (BAPV), a tecnologia solar BIPV é integrada na estrutura e no envelope do edifício, substituindo materiais convencionais nas coberturas, fachadas e vãos (Kong *et al.*, 2023, p. 3; Corti *et al.*, 2020, p. 22) sendo especialmente adequadas para aplicação em zonas históricas ou arquitetonicamente sensíveis (Boyd e Coonick, 2018, p. 3; Corti *et al.*, 2020, pp. 26, 27).

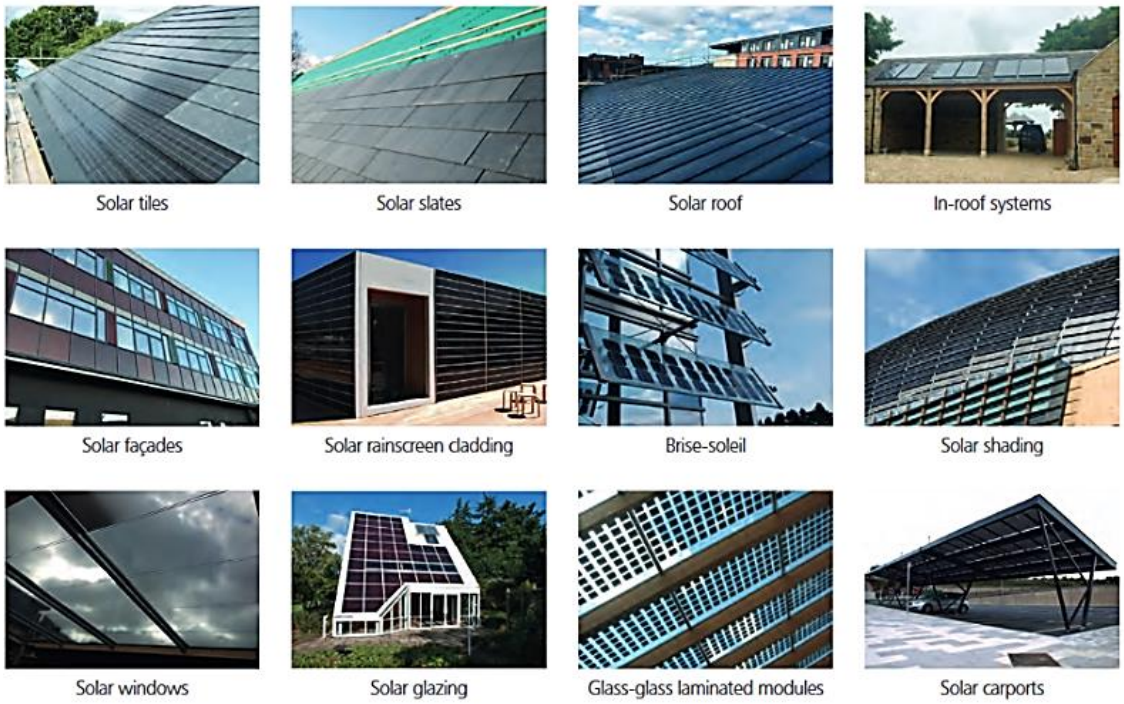


Ilustração 131 – Vários exemplos de integração de tecnologia solar fotovoltaica em edifícios (BIPV). (Boyd e Coonick, 2018, p. 5)

Neste conceito, os módulos fotovoltaicos, para além da produção de energia, substituem – de forma estética e arquitetonicamente integrada – os materiais de construção nas suas múltiplas funções, tornando difícil a distinção entre eles (Kong *et al.*, 2023, p. 4; Haghighi *et al.*, 2021, p. 1), tirando partido de todo o potencial solar do edifício e não apenas da cobertura (Polysolar, 2015, p. 4).

A hipótese de o módulo fotovoltaico ser, no contexto BIPV, também um material de construção, é explicitada na norma EN 50583:2016, em conformidade com o Regulamento (UE) Nº 305/2011 (Callegari, Merolla e Simeone, 2023, p. 322), nos seguintes modos:

> Photovoltaic modules are considered to be building-integrated if the PV modules form a construction product. Thus, the BIPV module is a prerequisite for the integrity of the building's functionality. If the integrated PV module is dismounted (in the case of structurally bonded modules, dismounting includes the adjacent construction product), the PV module would have to be replaced by an appropriate construction product.(Haghighi *et al.*, 2021, p. 1).

As características multifuncionais do produtos BIPV estão bem documentadas e devem garantir, pelo menos, três das seguintes funções: estética, estrutura, geração de energia, eficiência elétrica, isolamento e conforto termoacústico, proteção à intempérie, sombreamento e modulação da luz e custos de ciclo de ciclo vida favoráveis, entre outros (Boyd e Coonick, 2018, p. 17).

É possível identificar e fazer corresponder uma classificação técnico-funcional entre as unidades principais ou macro categorias do edifício (cobertura, fachada e elementos externos integrados), as partes constitutivas do sistema e os componentes envolvidas na integração e produção fotovoltaica (Tabela 25) (D'Ambrosio, Losasso e Tersigni, 2021, p. 13).

Tabela 25 – Classes de elementos técnicos de edifícios e respetivas aplicações de BIPV.

Technological Units	Classes of Technical Elements	Categorization of BIPV Applications
Roof	C1 discontinuous roof C2 continuous roof C3 atrium/skylight	cold roof, shingled roof, pitched roof, sloped roof flat roof, planar roof, low-sloped roof glazed roof, (semi)transparent roof
Façade	F1 curtain wall F2 rainscreen façade F3 double skin façade F4 window	warm façade cold façade, ventilated façade second skin fenestration
External Integrated devices	D1 parapet D2 solar shading D3 canopy	balustrade, railing louvres, breise-soleil, shading devices, shutters, blinds shelter, pergola

Fonte: D'Ambrosio, Losasso e Tersigni (2021, p. 13)

Presentemente, e cada vez mais, um painel fotovoltaico pode, e deve, ser encarado como um elemento de construção convencional: "[…] A solar cladding looks like a traditional non photovoltaic cladding and a solar tile looks like a traditional tile. […]" (Corti *et al.*, 2020, p. 22). Para além das questões funcionais e construtivas, o BIPV já é, no panorama internacional, um dos aspetos incontornáveis da arquitetura contemporânea (Ilustração 132) (Corti *et al.*, 2020, p. 22).

Para se atingir a meta dos edifícios NZEB, é necessária uma mudança de paradigma do setor AEC (como já anteriormente mencionado), o qual representa um grande desafio tendo em conta a velocidade, geralmente lenta, a que as inovações ocorrem neste setor, alinhadas com a Indústria 4.0 e a prefabricação 3D para a produção de componentes BIPV, a instalar diretamente no envelope do edifício (Callegari, Merolla e Simeone, 2023, p. 332).

Poder-se-á, talvez, de uma forma geral fazer referência a uma hipotética arquitetura de transição energética na Europa e de uma taxonomia do conceito BIPV, devido à transição energética e ambiental provocada pelo Pacto Ecológico Europeu (Callegari, Merolla e Simeone, 2023, p. 322).



Ilustração 132 – Fachada BIPV no edifício da Câmara Municipal de Friburgo, Alemanha. (Corti *et al.*, 2020, p. 24)

3.2.1.3. ENERGIA INCORPORADA, CARBONO INCORPORADO E BIOGÉNICO

Energia incorporada de um material foi inicialmente definida como a energia envolvida na extração e processamento das matérias-primas, incluindo o processo de fabricação, transporte e instalação (Kibert, 2008, p. 37; Pelsmakers, 2015, pp. 10, 197).

No entanto, Torgal e Jalali (2010) chamam a atenção para o facto de haver três possíveis abordagens: "[…] do início da extracção das matérias-primas até á porta da fábrica (*cradle to gate*); do início até à obra (*cradle to site*), ou do início até à fase de demolição e de deposição (*cradle to grave*)." (Torgal e Jalali, 2010, p. 72).

Na mesma linha, Mateus e Bragança (2006) também consideram que o conceito abrange as fases de manutenção e demolição (Augusto, 2011, p. 68), sendo aproximadamente 80% da energia respeitante às etapas envolvidas com a fase de produção e designada por Energia Primária Incorporada (EPI), e os restantes 20% distribuídas pelas outras fases do ciclo de vida (transporte, construção, manutenção/reabilitação e demolição) (Mateus e Bragança, 2006, p. 81).

Existem vários estudos e pesquisas relativamente à importância da energia incorporada nos materiais, e todos eles apontam para uma predominância do alumínio, do cobre, do aço e do betão, sendo que, neste caso, os GEE associados devem-se não só à energia utlizada na sua produção (energia incorporada) mas também às reações químicas do processo (Herczeg *et al.*, 2014, pp. 34, 35).

Contudo, numa abordagem de ciclo de vida, um produto com alto valor de energia incorporada por unidade de massa, mas durável ou facilmente reciclável, amortizará o seu impacte ao longo do tempo, diminuindo significativamente a energia incorporada e o PAG desse material (Kibert, 2008, p. 37).

> Embodied energy is a hidden energy use. It is the energy used to construct a building and the materials with which it is made. It can also be expressed as embodied carbon by multiplying the energy used to produce the materials by the carbon intensity of the fuel used. Embodied energy is usually expressed as MJ/kg of material, and its embodied carbon is expressed as kgCO2 per kg or per m3 of material. (Pelsmakers, 2015, p. 197).

De notar que os conceitos de energia incorporada e de carbono incorporado não são sinónimos, mas sim diretamente relacionados, dependendo do tipo e da intensidade em carbono da energia primária utilizada na fase de produção (a mais penalizante). Desse modo pode-se reduzir de modo significativo o carbono incorporado (Ilustração 133)

mantendo constante o valor da energia incorporada se esta for de origem renovável (Pelsmakers, 2015, p. 197).

Se numa primeira etapa foi considerada apenas a energia associada às fases de produção, transporte e montagem dos materiais (*Up Front Carbon*), contudo, posteriormente, o conceito tem sido sistematicamente alargado à manutenção e renovação, assim à fase final do ciclo de vida (Whole Life Carbon Assessment), principalmente devido à cada vez mais disseminada capacitação na metodologia ACV (Röck *et al.*, 2020, pp. 2, 3).

A importância desta questão tem-se acentuado à medida que as medidas de eficiência energética têm vindo a ser aplicadas, sendo que a desproporção entre energia operacional e energia incorporada tem vindo a ser alterada, sendo esta progressivamente dominante (Herczeg *et al.*, 2014, p. 36; Torgal e Jalali, 2010, p. 78; Oliveira e Pinto, 2018, pp. 76, 77; Hegger *et al.*, 2008, p. 159; Pelsmakers, 2015, p. 199).

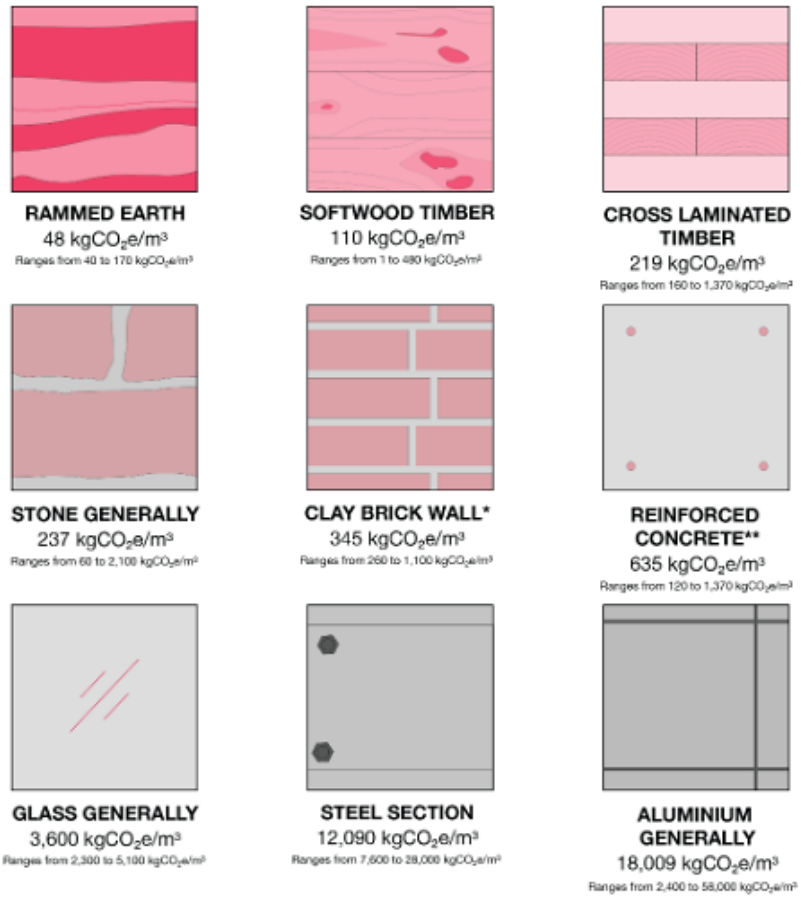


Ilustração 133 – Carbono incorporado de alguns materiais de construção. (Giddings *et al.*, 2021, p. 19)

Röck *et al.* (2020) chamam a atenção para o facto de (com os atuais padrões de eficiência energética) a energia incorporada, sob a forma de emissões GEE, representar cerca de 20-25% do total da energia envolvida no ciclo de vida dos edifícios. No entanto, este valor ascende para 45-50% no caso de edifícios altamente eficientes, podendo atingir 90% em casos excecionais, pelo que se torna urgente tomar medidas tendo em vista a redução da energia incorporada, em simultâneo com a operacional (Röck *et al.*, 2020, p. 1,2).

Tendo em vista as metas de descarbonização constantes da futura diretiva DEE relacionadas com a redução não só com o carbono operacional, mas também do carbono incorporado, e em linha com o já exposto, pode resumir-se o processo de descarbonização do edificado em quatro fases: 1. Redução do carbono incorporado; 2. Redução do carbono operacional; 3. Aumento da utilização de energias renováveis; 4. Sequestração e compensação (*offsetting*) do carbono incorporado residual (Ilustração 134) (Besana e Tirelli, 2022, p. 14).

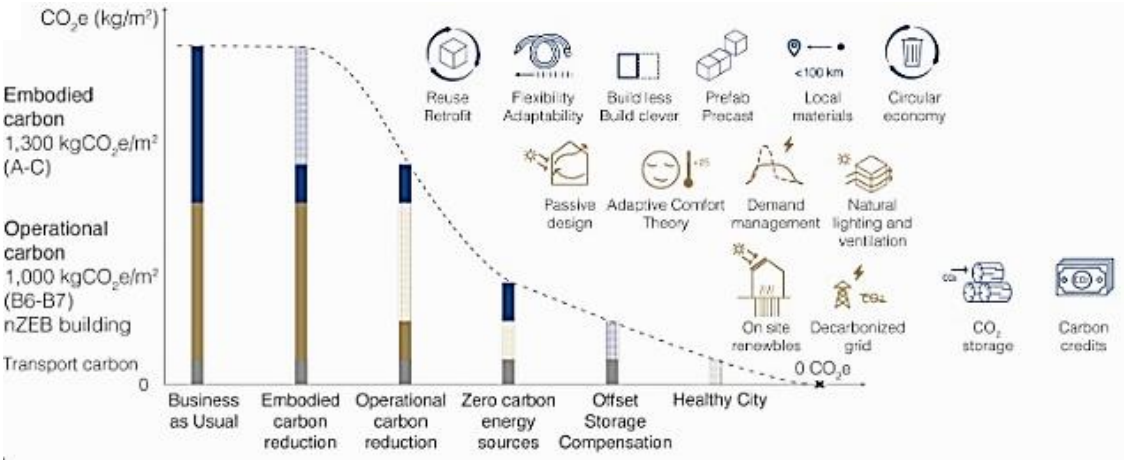


Ilustração 134 – As quatro fases de descarbonização do edificado. ([Adaptado a partir de:] Besana e Tirelli, 2022, p. 10)

Existem várias propostas com o objetivo de mitigar o carbono incorporado com o intuito de melhorar o desempenho energético dos edifícios. (União Europeia. Parlamento Europeu e Conselho, 2024, p. 13), A este respeito, e com o intuito de calcular e de possibilitar a sua automatização, haverá que considerar a integração da tecnologia BIM com a ACV, permitindo a avaliação do carbono incorporado nos materiais, em todas as fases do ciclo de vida do edifício (Ferreira e Santiago, 2025, pp. 85, 86).

De acordo com o relatório **Supporting the development of roadmap for the reduction of whole life carbon of buildings** (2023) elaborado para a Comissão Europeia – Direção Geral do Ambiente, a abordagem integrada *avoid-improve-shift* aponta para evitar construção nova, melhorar a conceção e mudar para materiais de baixo carbono (Tabela 26) (Le Den *et al.*, 2023, pp. 5, 18).

Tabela 26 – Medidas com vista à redução a curto e médio prazo do carbono incorporado no edificado.

Avoid new construction	Improve building design	Shift to low-carbon materials
• Optimise the use of space in offices and residential buildings • Use existing assets that are currently unused instead of new buildings. • Renovate instead of building new	• Design based on light construction method instead of massive construction • Design for adaptability, resilience and extended lifespan which could also lead to reduced demand for new construction • Design for disassembly • Reduce concrete demand by use of void formers in concrete slabs • Use carbon cured concrete • Carbon capture in cement production • Carbon capture in steel production	• Re-use existing building components and materials • Full timber construction • Hybrid structures in new construction • Use other bio-based materials • Use industry by-products instead of clinker in cement • Use alternative cementitious materials instead of cement in concrete • Use recycled concrete and other by-products for new concrete • Use recycled steel in steel production • Use recycled glass in glass production • Use renewable energy in cement production • Use renewable energy in steel production and other metals • Use renewable energy in glass production

Fonte: Le Den *et al.* (2023, p. 18)

Por razões que têm a ver com o tema e o âmbito do trabalho, iremos focar-nos exclusivamente nas medidas tecnológicas, nomeadamente de ecoeficiência, e de projeto, práticas e exequíveis, capazes de causar impacto positivo na mitigação das emissões GEE associadas ao edificado

De ressaltar na revisão da literatura, a unanimidade da utilização de materiais renováveis e o surgimento do conceito de carbono biogénico, ou seja, o carbono sequestrado pela planta durante o processo de crescimento, até ao momento do seu abate ou colheita.

Quando, nas fases consideradas, este é superior ao carbono incorporado de origem fóssil, estamos perante um material ou produto negativo em carbono (Hart e Firth, 2021, p. 28; Besana e Tirelli, 2022, pp. 11, 12; Andersen *et al.*, 2021, p. 3).

No entanto, é necessária e muito importante uma gestão correta da fase de fim do ciclo de vida, de modo a evitar, ou a dilatar no tempo, o retorno do carbono sequestrado à

atmosfera por via da queima ou deposição em aterro (Ilustração 135) (Andersen *et al.*, 2021, p. 3; Besana e Tirelli, 2022, p. 12), em lugar de práticas de economia circular como a reutilização (preferencialmente) ou a reciclagem (Hart e Firth, 2021, p. 28).

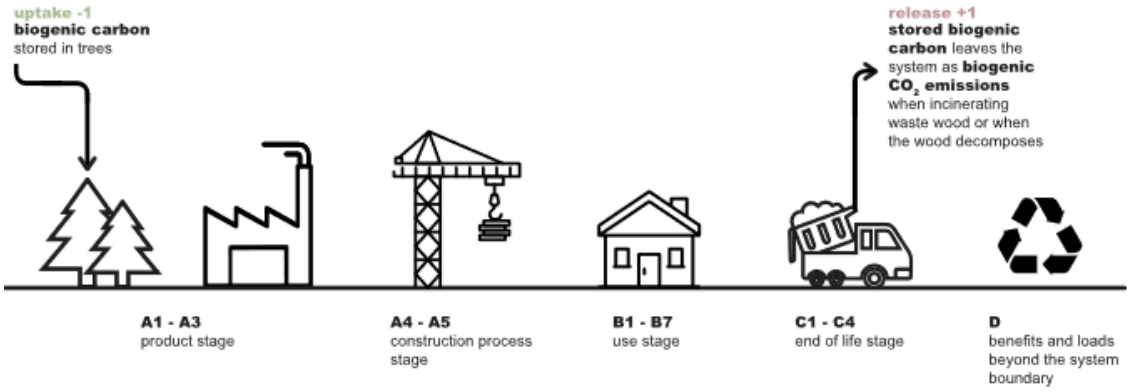


Ilustração 135 – O carbono biogénico e as fases de ciclo de vida de um edifício na abordagem -1 / +1. (Andersen *et al.*, 2021, p. 3)

Esta questão é de extrema importância do ponto de vista conceptual e a sua complexidade tem suscitado discussões na comunidade científica no que respeita à real eficácia da utilização da madeira e de outros materiais *bio-based* para a efetiva redução da quantidade de GEE na atmosfera, tendo em contas a incerteza e a volatilidade existentes nos cálculos da ACV (Andersen *et al.*, 2021, p. 3; Besana e Tirelli, 2022, p. 12).

Hart e Firth (2021) levaram a cabo uma simulação, tendo em vista a determinação e a comparação do carbono incorporado e do carbono biogénico para a supraestrutura de um edifício de pequeno porte, executado com materiais convencionais (*business-as-usual*) e, alternativamente, com materiais *bio-based* para a estrutura, paredes, isolamentos e revestimentos, excluindo as fundações de betão (Hart e Firth, 2021, p. 46).

Mantendo constantes todas as restantes variáveis, nomeadamente o valor do isolamento térmico da envolvente para ambas as soluções, avaliou-se o PAG da solução convencional e o carbono biogénico em 176,2 $kgCO_{2eq}/m^2$ e 66 $kgCO_{2eq}/m^2$, respetivamente, para o módulo A1 – A3.

No caso da alternativa com materiais renováveis, esses valores passam para 134 $kgCO_{2eq}/m^2$ e 234 $kgCO_{2eq}/m^2$, respetivamente e nas mesmas condições de base (Hart e Firth, 2021, pp. 46–49).

No pressuposto que o carbono biogénico é mantido sequestrado no fim do ciclo de vida, as emissões líquidas serão de (+110 $kgCO_{2eq}/m^2$) para a solução convencional e de (-109 $kgCO_{2eq}/m^2$) para a solução alternativa *bio-based*, ou seja, captura a mesma quantidade de carbono do que aquele que seria emitido durante a fase de produção por uma solução convencional (Ilustração 136) (Hart e Firth, 2021, p. 51).

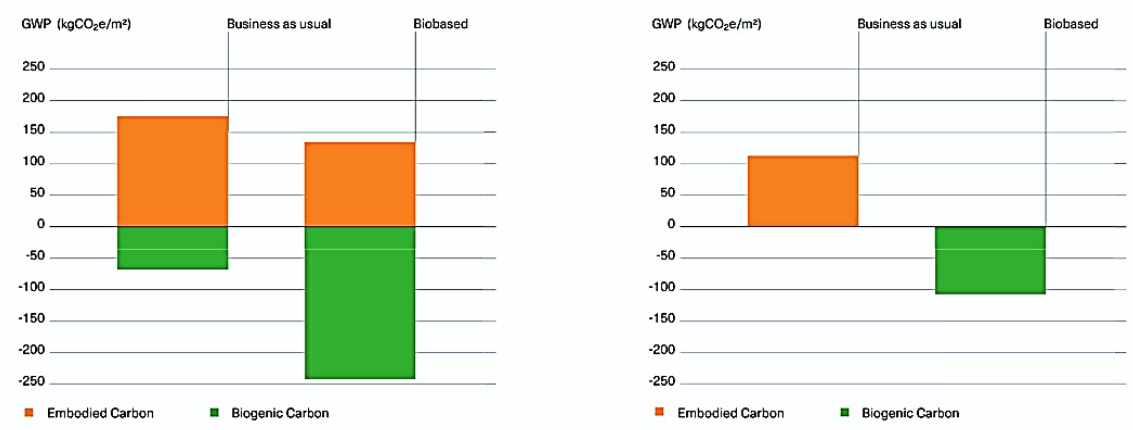


Ilustração 136 – Carbono incorporado e carbono biogénico numa construção convencional *versus* construção com materiais *bio-based*. (Hart e Firth, 2021, pp. 50, 51)

3.2.2. MATERIAIS RENOVÁVEIS E BIOGÉNICOS

Tendo em conta a circularidade a que deve presidir a conceção de um produto, assiste-se a uma cada vez maior utilização de materiais provenientes de matérias-primas vegetais, ou animais, abundantes e renováveis (p.e., cânhamo, madeira, bambu, cortiça, lã), como alternativa aos materiais sintéticos e minerais convencionais, de modo a reduzir a poluição ao longo do ciclo de vida e descarbonizar o edificado (Pinto, 2023, p. 35; Oliveira e Pinto, 2018, pp. 80, 81; (Amado, 2025, p. 21).

Tais materiais, abundantes e acessíveis a nível global, oriundos maioritariamente de florestas e de colheitas agrícolas anuais, são designados como *materiais renováveis* (Oliveira e Pinto, 2018, pp. 80, 81), tendo aparecido mais recentemente o termo *materiais biogénicos* (Rosenbloom *et al.*, 2023, p. 26; Huynh *et al.*, 2023, p. 60).

Este materiais têm como característica comum a sequestração de carbono nos materiais e nos edifícios (Oliveira e Pinto, 2018, p. 88), tornando as cidades num instrumento importante no combate às alterações climáticas antropogénicas, ao contrário do atual paradigma (Ilustração 137) (Churkina *et al.*, 2020, p. 272; Carcassi *et al.*, 2022, p. 5215; Huynh *et al.*, 2023, p. 58).

No entanto, existem algumas limitações, nomeadamente, a necessidade imperiosa de as florestas serem geridas de forma sustentável, de forma a permitirem o crescimento das árvores e a respetiva gestão do carbono sequestrado, ao contrário do cânhamo ou da palha, em que o problema não se coloca nesses termos (Besana e Tirelli, 2022, p. 12; Oliveira e Pinto, 2018, p. 81).

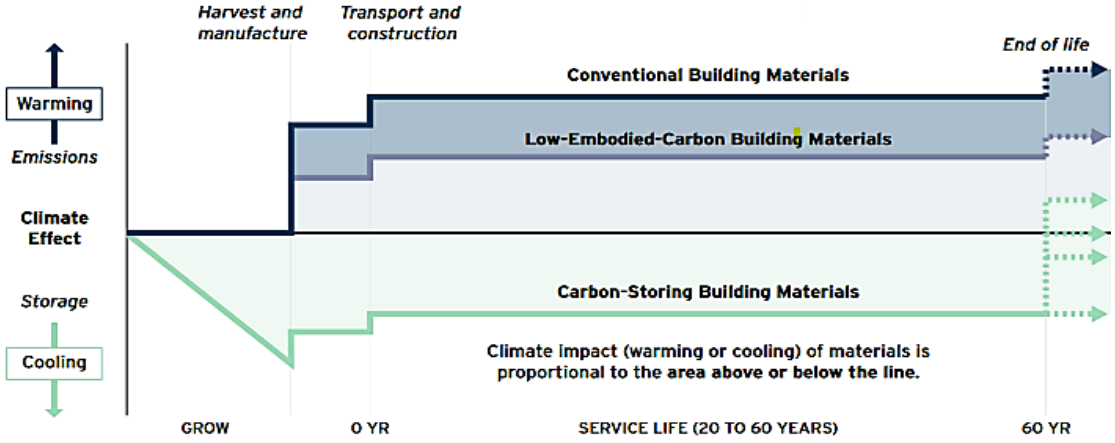


Ilustração 137 – A sequestração de carbono nos materiais de construção como um novo paradigma. ([Adaptado a partir de:] Huynh *et al.*, 2023, p. 58)

Com a finalidade de obviar a essa questão, várias soluções têm vindo a ser desenvolvidas, com a finalidade de substituir os produtos da silvicultura por outros a partir da agricultura e de crescimento rápido, como é o caso da madeira de cânhamo (*hemp wood*) utilizada para aplicação em revestimentos de pavimentos e paredes (Ilustração 138), mobiliário, divisórias interiores, entre outras aplicações (Gibson, 2023; Brownell, 2021; Hammon, 2021; Crye, 2024).



Ilustração 138 – Revestimento de pavimento flutuante a partir de madeira de cânhamo. ([Adaptado a partir de:] Gibson, 2023)

Contudo, para além das aplicações usuais do cânhamo como material de construção, nomeadamente como isolante térmico e acústico, e dos novos produtos para interiores acima referidos, vislumbra-se também a capacidade de poder ser utilizado como mais

um material estrutural, a considerar conjuntamente com o betão, aço e madeira, entre outros (Brownell, 2021; Lotus, 2021).

De momento já se encontram disponíveis no mercado painéis estruturais tipo OSB (*Oriented Strand Board)* executados com fibras de cânhamo em substituição da madeira (Ilustração 139) (Lotus, 2021; Brownell, 2021), além da possibilidade de se utilizarem outras gramíneas (Plantd, 2024) e, num futuro próximo, também é considerada a introdução de elementos estruturais à base de madeira de cânhamo, em sistemas construtivos aligeirados (Brownell, 2021):

> Hemp-based building products exhibit significant potential structural, economic, and carbon advantages and could represent a disruptive technology in building. Many challenges remain, and such transformation will take time. In theory, if enough new structures are built with hemp instead of concrete, steel, or timber, the construction industry could shift dramatically toward net-zero carbon (Brownell, 2021).



Ilustração 139 – Painéis OSB obtidos a partir de fibras de cânhamo. ([Adaptado a partir de:] Lotus, 2021)

De igual modo, também o bambu surge como um material reconhecido para várias aplicações (pavimentos, revestimentos, *decks*, painéis, mobiliário, estruturas provisórias, etc.) mas, desde logo como material estrutural (p.e., andaimes, pontes, paredes-cortina ou edifícios), sendo atualmente apontado como potencial substituto do aço em estruturas (Souza, 2023) ou em armaduras para betão (Ilustração 140) (Brownell, 2015).

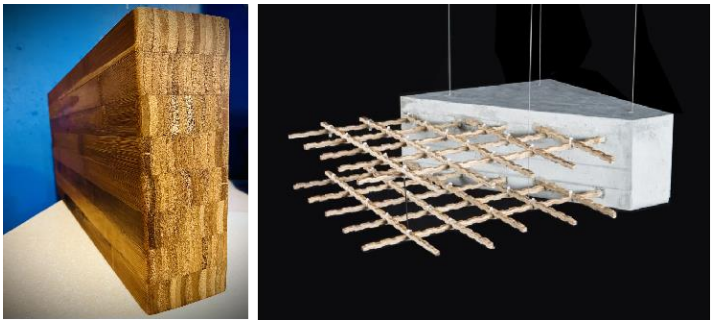


Ilustração 140 – Bambu estrutural e bambu compósito como armadura de betão. ([Adaptado a partir de:] Souza, 2023; Brownell, 2015)

O bambu é um material com características mecânicas notáveis, nomeadamente a sua resistência à tração, superior à da madeira e do aço macio, assim como o valor da resistência à compressão (Tabela 27) (Borowski, Patuk e Bandala, 2022, p. 4).

Tabela 27 – Comparação das características mecânicas da madeira, aço e bambu.

Properties [kN/cm^2]	Spruce Wood	Steel	Bamboo
Modulus of elasticity	1100	21,000	2000
Modulus of rupture	7.2	20.0	12.1–20.9
Compressive strength	4.3	14.0	6.2–9.5
Tension strength	8.9	16.0	14.8–38.4
Bending strength	6.8	14.0	7.6–27.6
Shear strength	0.7	9.2	2.0

Fonte: Borowski, Patuk e Bandala (2022, p. 6)

Devido a estas características, o bambu (nas suas várias formas) é um material com enorme potencial na construção, nomeadamente na vertente estrutural e na melhoria das características mecânicas do betão (através da inserção de fibras na sua composição):

> Bamboo is characterized by high strength and flexibility, which makes it an ideal building and construction material in Africa, Asia, and Latin America. Bamboo, because of its microfiber structures containing lignin and hemicellulose (lignin–carbohydrate complex (LCC)), has a greater strength than concrete and steel by weight, and this strength is due to the thickness of the fibre in the sclerenchyma tissue. The tensile strength of bamboo is greater than that of mild steel, and it can withstand compression twice as well as concrete, easily replacing materials stuck in road construction, drainage pipes, housing, and wind turbine construction. The tensile strength of bamboo is 160 N/mm2, three times stronger than most types of constructional timber used in industry. The compressive strength is 40–80 N/mm2, two to four times the value of most timber species. Bending strength is 50–150 N/mm2, twice strong as convectional structural timbers. Bamboo material can be used for almost all elements of construction and home furnishing, including poles supporting ceilings or roofs, or as elements of walls and floors. Bamboo may be substituted for wood in many industrial adhibitions and thereupon contribute to the restoration and saving of the world's forests. For example, in architecture, panels and boards made of bamboo are characterized by high hardness and are abrasion resistant; they are also classified as durable materials and able to replace more expensive hardwood products. Bamboo can also be used as beams and trusses. Adding bamboo to cement has been reported as strengthening concrete structures, with great potential for the mass construction of inexpensive dwellings or as an excellent material for building structures with great resiliency to earthquakes and landslides. (Borowski, Patuk e Bandala, 2022, pp. 4, 5).

Segundo Habel (2014), o bambu pode substituir com vantagem o betão armado: "This has the potential to revolutionise our building industry and finally provide an alternative to the monopoly of reinforced concrete." (Fairs, 2015). Ao mesmo tempo, realça o facto

de a fibra de bambu ser uma alternativa com menor impacte ambiental, mais barata, leve e com melhor desempenho que o aço (Fairs, 2015; Shine, 2024; Vyas, 2020).



Ilustração 141 – Vo Trong Nghia: "Bamboo Dome". (Fairs, 2014)

Na mesma linha, arquitetos internacionais de renome como Kengo Kuma, Shigeru Ban e Vo Trong Nghia, entre outros, trouxeram este material à ribalta, muito além das aplicações correntes em revestimentos ou andaimes (Ilustração 141) (Fairs, 2014). Vo Trong Nghia afirma categoricamente "[…] I think bamboo and laminated bamboo will replace other materials and become the 'green steel' of the 21st century" (Fairs, 2014).

Em termos comparativos, os produtos de bambu para aplicações estruturais como o caso do Cross Laminated Bamboo (CLB) são, no mínimo, equivalentes em termos de prestações mecânicas aos seus congéneres de madeira, como o CLT (Sharma, Gatóo e Ramage, 2015, pp. 66, 72), mas sem os respetivos inconvenientes, nomeadamente o abate de árvores e a eventual gestão insustentável da floresta, motivada pelo incontornável aumento da procura (House of Bamboo, 2023).

Como reconhecimento destas prestações, o bambu engenheirado é já, ao dia de hoje, um material reconhecido e cada vez mais disponível nos mercados, sendo que nos

últimos dois anos (2022 e 2023), foram publicadas duas normas internacionais respeitantes a esta temática:

- ISO 23478:2022: Bamboo structures – Engineered bamboo products – Test methods for determination of physical and mechanical properties.
- ISO 5257:2023 Bamboo structures – Engineered bamboo products – Test methods for determination of mechanical properties using small size specimens (International Bamboo and Rattan Organization, 2024).

3.2.2.1. DEFINIÇÃO E TIPOLOGIAS

Na linha do acima exposto, um material de construção renovável pode ser definido como:

> […] materials wholly or partly derived from renewable biological origins, or by-products and biowaste of plant and/or animal biomass that can be used as raw building materials and decorating items in construction, in their original forms or after being reprocessed. (Linh Le, Salomone e Nguyen, 2023, p. 1).

Atualmente, a maior parte dos materiais renováveis e biogénicos, são, como já referido, de origem vegetal, existindo alguns mais recentes (e outros em franco desenvolvimento) a partir de algas, de micélio (Florian, 2022; Rosenbloom *et al.*, 2023, p. 26; Huynh *et al.*, 2023, p. 59), ou ainda de cianobactérias, entre outros, com a designação genérica de Lab-Grow Materials (LGMs), Living Building Materials (LBMs) ou Engineered Living Materials (ELMs) (Heveran *et al.*, 2020, p. 481; Nguyen *et al.*, 2018, pp. 1–3).



Ilustração 142 – Blocos de micélio como envolvente exterior. (Fairs, 2021)

O micélio é um material que, sob a forma de painéis ou blocos (Ilustração 142), tem merecido interesse crescente no setor da construção, pelas suas características de resistência ao fogo, isolamento térmico e acústico, sequestração de carbono, baixo custo e rapidez de fabrico, sendo um exemplo de economia circular aplicada e de uma biotecnologia (KET) com enorme potencial (Fairs, 2021; Florian, 2022; Biohm Limited, 2016; Ecovative LLC, 2023; Nguyen *et al.*, 2018, pp. 22, 58).

De acordo com Huynh *et al.* (2023), existem duas categorias de materiais com o potencial de sequestrar carbono (Tabela 28):

1. Os renováveis (*bio-based*), maioritariamente de origem vegetal e com carbono biogénico armazenado ao longo do crescimento da planta, resultante da fotossíntese:

    - Resíduos e subprodutos da silvicultura e da agricultura (p.e., palha de cereais, cascas, caules);
    - Desperdícios industriais (p.e., papel, cartão, têxteis);
    - Culturas agrícolas (p.e., cortiça, bambu, cânhamo);
    - Cultura em laboratório (p.e., micélio);
    - Silvicultura (p.e., madeira).

2. Os materiais de base mineral e convencional, pela captura e armazenamento de CO_2 por via tecnológica: :

- Biomineralização (p.e., cimento obtido com a participação agentes biológicos como algas e micróbios);
- Captura de carbono atmosférico ou industrial (p.e., cal hidráulica sintética de carbonatação acelerada);
- *Biochar* (carvão biogénico estabilizado, utilizado como matéria-prima para produção de materiais de construção) (Huynh *et al.*, 2023, pp. 59, 63; Rosenbloom *et al.*, 2023, p. 27).

Tabela 28 – Categorias de materiais biogénicos e minerais sequestradores de carbono

SOURCES			PRODUCTS
Biogenic Carbon Storage			
Agricultural and forestry residues and by-products	Straw (rice, wheat), hulls (rice), shells (nuts), stalks		Board products, insulation, cladding, aggregate
Waste stream fibers	Paper, cardboard, textiles		Board products, insulation
Purpose-grown crops	Cork, bamboo, hemp		Boards, flooring, insulation, structure, cladding
Lab-grown materials	Mycelium composites		Insulation, structure
Timber	Lumber, mass timber, sheet goods		Structure, board products, flooring, cladding
Mineralized Carbon Storage			
Biomineralization	Algae and microbe-grown cement		Concrete, concrete masonry unit (CMU), brick
Captured carbon	Synthetic limestone aggregate and accelerated carbonation		Concrete, CMU, brick
Biochar	Biogenic carbon transformed into stable, pyrogenic carbon through combustion in the absence of oxygen		Aggregate, tiles, bricks

Fonte: Huynh *et al.* (2023, p. 59)

Na linha dos compromissos do Acordo de Paris, a utilização dos materiais de construção biogénicos e não-biogénicos mineralizados, constitui uma oportunidade em larga escala para, simultaneamente, capturar carbono da atmosfera e resolver problemas técnicos recorrentes do edificado, nomeadamente a questão da eficiência energética e do ar interior em edifícios, por via da aplicação de isolamentos *bio-based* de alto desempenho, entre outros (Huynh *et al.*, 2023, pp. 60, 61):

> Today, mineralized products are less common than their biogenic counterparts, but there is a great deal of research and innovation taking place in this field, especially in the cement and aggregate industries. Some early products – such as bio-based cement and geo-mimetic mineralization – are beginning to find their way to the market in limited quantities and are generating excitement about the potential for high volumes of carbon storage in concrete, dramatically changing the emissions paradigm of this ubiquitous material (Huynh *et al.*, 2023, p. 63).

No entanto, nem todas as soluções estão ainda disponibilizadas no mercado, para além da (ainda) pequena quota de mercado destes produtos, quando comparados com os

convencionais, sendo praticamente inexistente na gama dos distribuidores de materiais de construção do mercado nacional.

Segundo Jungclaus *et al.* (2021) existem três categorias de materiais de baixo carbono, alternativos aos convencionais, em função da disponibilidade e quota de mercado: 1. *Market-ready materials*; 2. *Near-market-ready materials*; 3. *Materials in development*:

- *Market-ready materials*: materiais que já se encontram disponíveis, mas que ainda não atingiram grande penetração de mercado (p.e., produtos de isolamento renováveis de base de plantas);

- *Near-market-ready materials*: materiais que estão disponíveis em pequena escala ou em projetos-piloto, mas ainda não regularmente distribuídos no mercado (p.e., betão injetado com dióxido de carbono);

- *Materials in development:* materiais que estão em fase de desenvolvimento e que que poderão vir a assegurar reduções de carbono significativas em materiais de construção correntes (p.e., aço carbono-zero (*zero-carbon steel*)) (Jungclaus *et al.*, 2021, pp. 35–37).

Levando em consideração, como já afirmado, que as necessidades globais de novos edifícios e infraestruturas vão continuar a ser muito significativas nas próximas décadas (nomeadamente em Portugal), a mudança de paradigma para a utilização de materiais renováveis e de rápido crescimento, é essencial para conciliar o efeito conjugado de uma massiva urbanização com a urgência da descarbonização (Habert, 2021): "Carbon-storing building products, whether biogenic or mineral, offer the building industry an unprecedented opportunity to not only reduce emissions but also eventually reverse the carbon flow from the sector." (Huynh *et al.*, 2023, p. 63).

3.2.2.2. VANTAGENS TÉCNICAS E AMBIENTAIS

Os materiais renováveis, além de capturarem e armazenarem carbono, têm outras vantagens ambientais validadas pelas respetivas ACV, comparativamente aos produtos sintéticos e minerais convencionais, sendo indispensáveis na construção sustentável (Oliveira e Pinto, 2018, p. 81; Bevan e Wooley, 2008, p. 1).

Relembrando que os materiais de construção *bio-based* são aqueles obtidos a partir matéria-prima vegetal, animal, de fungos ou bactérias, que crescem, são colhidos,

usados e reutilizados de forma ambientalmente responsável (College van Rijksadviseurs, 2024), identificam-se, sucintamente, algumas características comuns, que representam evidentes vantagens técnicas e ambientais potenciadas por estes materiais:

a) Captura e armazenamento de carbono

   Contrariamente, e apesar dos esforços no sentido de otimizar os impactes ambientais dos materiais de construção convencionais, os materiais *bio-based* capturam quantidades significativas de CO_2 durante o seu crescimento, que se pode manter armazenado nos edifícios durante um período considerável;

b) Renovação e regeneração

   Ao contrário dos materiais minerais ou sintéticos, que são finitos, os *bio-based* podem ser renovados até ao período de uma geração, sendo por isso chamados de *materiais renováveis*;

c) Reutilização, reciclagem e compostagem

   No contexto da construção circular, os materiais *bio-based* podem ser facilmente reutilizados, reciclados ou levados a compostagem;

d) Peso-próprio

   A maioria destes materiais, nomeadamente estruturais e de revestimento, são mais leves, o que os torna especialmente adequados para construção e renovação em zonas urbanas densas e de difícil acesso, permitindo, em algumas situações, evitar demolições e resíduos de construção;

e) Pré-fabricação e modularização

   A pré-fabricação é um dos pressupostos da construção circular e pode ser potenciada pela utilização de materiais renováveis, o que permite reduzir as emissões poluentes, a água, o ruído e os resíduos, além das subempreitadas e do tempo de construção. Estima-se que, em geral, a pré-fabricação pode significar uma redução de até 60% nos transportes, 80% na energia e 90% dos resíduos gerados em obra (College van Rijksadviseurs, 2024).

Contudo, essas vantagens são também extensíveis ao desempenho técnico, nas suas várias vertentes: estrutural, térmica, acústica, higrométrica, entre outras. Devido à variedade de materiais e de aspetos técnicos a considerar, optámos, no âmbito dos objetivos deste trabalho, por desenvolver apenas um dos materiais com maior notoriedade (e sobre o qual existe já suficiente informação técnica e científica): o cânhamo industrial, na forma de blocos ou de betão de cânhamo (*hempcrete*) e algumas das respetivas características termohigrométricas.

Relativamente ao betão de cânhamo, Simões *et al.* realca, que:

> O betão de cânhamo possui reduzida energia incorporada durante o processo de fabrico devido à sua composição: elevado teor de fibras de cânhamo, um ligante e água que formam uma pasta que aglutina as fibras. Este material de construção pode ser utilizado em elementos de alvenaria leves ou, geralmente, em placas de revestimento e isolamento. É muito higroscópico, podendo trazer vantagens a nível de economia energética, bem como da saúde e conforto térmico dos habitantes do espaço onde é aplicado. (Simões *et al.*, 2016, p. 307).

Estes materiais, obtidos a partir das fibras do cânhamo e de cal hidráulica como ligante, distinguem-se pelo seu alto desempenho quando utilizados como isolamentos térmicos e acústicos, além da capacidade de autorregulação do teor de humidade do espaço interior (Oliveira e Pinto, 2018, p. 83; Simões *et al.*, 2016, p. 308) e de um alto valor de atraso térmico, no mínimo igual ou superior a 12 horas (Oliveira e Pinto, 2018, p. 85; Bevan e Wooley, 2008, p. 67), tornando-o um material de eleição em termos da eficiência energética e da descarbonização.

A Ilustração 145 representa a variação da temperatura exterior e interior, registadas *in situ*, pelo Flemish Institute for Technological Research NV (VIT, durante o período de 25 de março a 03 de abril de 2016, num compartimento de um edifício multifamiliar de dois pisos, em Heusden (Bélgica), conforme relatório de ensaio **Analysis of the correlation between indoor and outdoor parameters in a hemp-lime constructed house** (Ma Yixiao, 2016).

Como se pode constatar, apesar de as variações na temperatura exterior atingirem um valor absoluto de 35ºC [-1ºC;+34ºC], a variação da temperatura interior no compartimento em causa (*koele berging)* não ultrapassa (+1ºC), no intervalo [+13ºC;+14ºC], exclusivamente devido aos materiais constituintes do envelope e sem qualquer interferência de equipamentos AVAC (Ilustração 143).

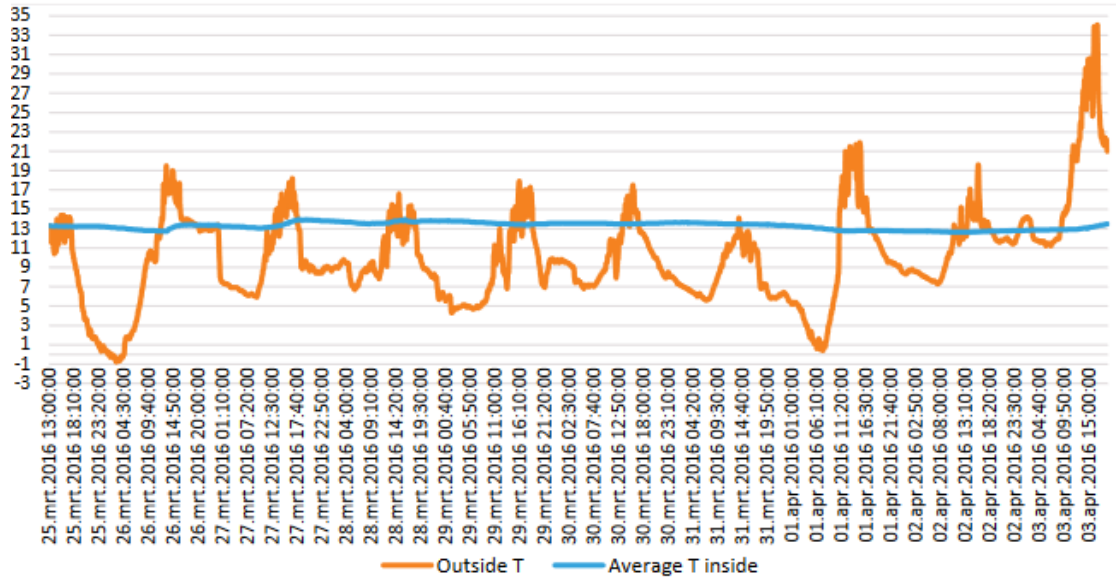


Ilustração 143 – Variação da temperatura (T) exterior (laranja) e interior (azul), num compartimento (*koele berging*) de um edifício de habitação com paredes de painéis preenchidos com betão de cânhamo. (Ma Yixiao, 2016, p. 5)

Também a permeabilidade ao vapor, ou a capacidade de *respiração* das paredes, coberturas, pavimentos, blocos ou painéis à base de cânhamo é um dado adquirido, desde que não seja comprometida com a aplicação de revestimentos de base cimentícia (Reilly *et al.*, 2019, p. 714) ou polimérica sintética, sendo uma das características mais originais e com maior relevância para o conforto dos utentes, e para a qualidade do ar interior (Bevan e Wooley, 2008, pp. 54, 55, 60).

Muito interessante, do ponto de vista construtivo, é a utilização do betão de cânhamo (B.C.) para betonilhas e lajes de soleira, aplicado diretamente no solo, devidamente preparado e compactado, sem necessidade de nenhuma impermeabilização ou barreira-vapor, o que vai em direção oposta aos sistemas habituais baseados na existência de barreiras à humidade (Bevan e Wooley, 2008, p. 74).

> Because of the unique characteristics of the material, and its unusual performance, scientists have been fascinated to discover why a simple mixture of hemp exhibits so many interesting characteristics. […] As with timber, the cellulose material in hemp can absorb water without damage, providing it is able to dry out again. In the past synthetic building materials have been developed to repel or not absorb water as it was thought this was the best way to ensure a longer life and avoid deterioration. Thus it involves a shift in thinking about building materials to welcome the ability of a material to cope with water. […] Being able to absorb moisture, particularly internally, ensures a breathing wall and will reduce the humidity and improve the indoor air quality of buildings. The moisture content in the material also serves as a thermal buffer (Bevan e Wooley, 2008, p. 54)

Tal deve-se, sobretudo, às características higroscópicas deste tipo de materiais, em que o vapor de água é absorvido e retido temporariamente, até ao momento em que o teor

de humidade relativa do espaço interior diminui (Pelsmakers, 2015, p. 260), evitando, deste modo, os problemas associados ao arrefecimento e à secura do ar, existentes na maioria dos edifícios modernos (Bevan e Wooley, 2008, pp. 74, 75).

A capacidade de armazenamento de humidade, ou a capacidade de uma superfície de material reter ou libertar humidade quando exposta a ciclos de diferentes níveis de humidade relativa (HR), é quantificada pelo indicador Moisture Buffer Value (MBV) (Equação 1), em que Δ*m* é a variação de massa (g), *A* é a área exposta (m^2) e Δ*HR* a amplitude entre humidades relativas (%) (Abdellatef *et al.*, 2020, p. 6; Simões *et al.*, 2016, p. 311; Rocha, 2016, p. 38).

Equação 1 – Capacidade de armazenamento de humidade (MBV)

$$MBV = \frac{\Delta m}{A\,(\Delta RH\,\%)}$$

Fonte: Abdellatef *et al.* (2020, p. 6)

Este conceito foi desenvolvido tendo como principal objetivo definir a capacidade de armazenamento de humidade dos materiais de construção, têxteis ou moveis existentes nos edifícios, e aplica-se ao sistema como um todo, e não às diversas camadas constituintes, no caso de materiais compósitos (Rocha, 2016, p. 37).

O betão de cânhamo assume, e de acordo com a espessura, valores médios bons ou ótimos de MBV (Simões *et al.*, 2016, p. 307; Abdellatef *et al.*, 2020, p. 1), tornando-o um material adequado para uma construção saudável e resiliente à humidade, o que é muito relevante no caso português, em que este fator é um dos principais responsáveis pela degradação e insalubridade do ambiente construído (Pinto, 2003, pp. 1211, 1213):

> Segundo Vasco Freitas e Vítor Abrantes (1995) numa comunicação intitulada "Condensações em Edifícios Portugueses", apresentada no International Symposium On Moisture Problems In Building Walls, no Porto, em 1995, a humidade é, actualmente, uma das principais causas de degradação observadas nas envolventes dos edifícios, justificando a importância da investigação nesse sentido, com o objectivo de definir regras relativas ao desenho das paredes dos edifícios, relacionadas com a humidade (Pinto, 2003, p. 1211).

De notar que os materiais de isolamento sintéticos derivados do petróleo (p.e., Poliestireno Expandido (EPS), Poliestireno Extrudido (XPS), Poliuretano (PUR), Poliisocianurato (PIR)), ou de base mineral (p.e, lã de rocha ou de vidro), e largamente utilizados de várias formas nos pavimentos, paredes e coberturas, têm pouca ou

nenhuma capacidade de absorver vapor de água e de regular a humidade interna (Pelsmakers, 2015, p. 260).

Em algumas situações específicas o B.C., e tendo em conta a humidade relativa existente e a utilização de materiais higroscópicos adequados, poderá conduzir à exclusão de meios mecânicos para o controlo higrotérmico do ambiente interior (Rocha, 2016, p. 1) o que é relevante e disruptivo face às técnicas de construção convencionais.

A Ilustração 144, referente ao relatório elaborado pelo VITO (e já acima mencionado), mostra a variação, ao longo do mesmo período, da humidade relativa exterior e interior no compartimento em questão. Neste caso, o teor da humidade relativa exterior (*Outside rH*) variou entre os 19% e os 100% sendo que a humidade relativa média interior (*Average rH inside*) se manteve praticamente constante ao redor dos 70%, no intervalo [67%; 75%], e nas condições já mencionadas anteriormente.

Os sistemas de isolamento térmico baseados em materiais renováveis têm um desempenho, no mínimo, ao nível dos isolamentos convencionais (não-renováveis), sem os seus inconvenientes ambientais, variando em densidade e espessura de modo a obter um valor de condutibilidade térmica (λ) em conformidade com a regulamentação ou os objetivos específicos (Tabela 29).

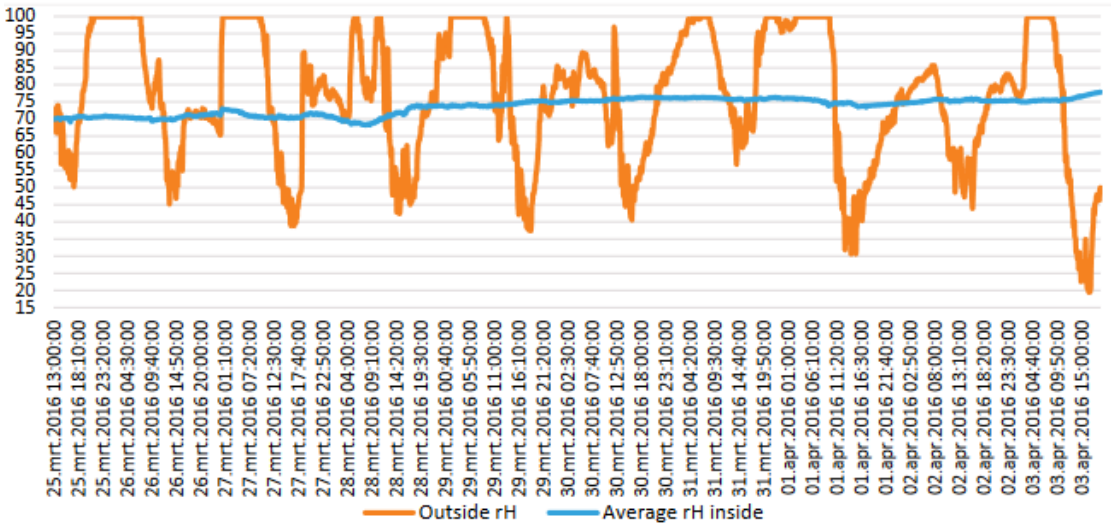


Ilustração 144 – Variação do teor de humidade relativa (rH) no exterior (laranja) e interior (azul), num compartimento de um edifício de habitação com paredes de painéis preenchidos com betão de cânhamo. (Ma Yixiao, 2016, p. 8)

Tabela 29 – Valores da densidade e da condutividade térmica (λ) de alguns materiais renováveis e não-renováveis.

Products		Density (kg/m^3)			Thermal Conductivity (W/mK)		
		Actual	Min	Max	Actual	At min density	At max density
Bio-Based	Mycelium	140	50	260	0.06	0.08	0.06
	Flax	23	20	80	0.038	0.045	0.03
	Sheep wool	18	10	40	0.038	0.045	0.033
	Cellulose	52	30	80	0.038	0.045	0.038
	Wood fibre	140	30	270	0.038	0.09	0.038
	Cork	165	110	170	0.04	0.05	0.037
Non-Renewable	Mineral wool	45	30	180	0.039	0.045	0.033
	PUR	35	30	100	0.025	0.03	0.024

Fonte: Cascione, V. *et al.* (2022, p. 3)

O betão de cânhamo tem uma condutibilidade térmica que pode oscilar entre 0,06 e 0,07 W/mK, para espessuras de 0,40m a 0,30m, com um valor de transmissão térmica (U) médio de 0.17 W/m2K correspondente a uma espessura de 0,35m e dependendo de vários fatores como o ligante utilizado ou o método construtivo, entre outros (Sparrow, 2014).

O envelope de um edifício (paredes exteriores e cobertura), uma componente vincadamente arquitetónica, influencia de modo determinante o seu comportamento termohigrométrico, a eficiência energética, e naturalmente, o conforto e a qualidade do ar interior do edifício. Por sua vez, as características higroscópicas dependem principalmente da condutibilidade térmica e da permeabilidade ao vapor (Demir e Doğan, 2020, p. 27).

O B.C., em relação à maioria dos materiais convencionais, tem a vantagem de ser um material de baixo impacte ambiental e de alto desempenho higrométrico, com as seguintes características: 1. Baixa condutibilidade térmica; 2. Elevada porosidade; 3. Elevada adsorção 4. Baixa densidade; 5. Elevado calor específico; 6. Excelente isolamento térmico e acústico; 7. Elevada massa térmica (Demir e Doğan, 2020, pp. 28, 30, 31).

Sendo o envelope o elemento construtivo que materializa a separação física entre o ambiente interior e o exterior, é também o principal responsável pelo achatamento da onda de calor sinusoidal (fator de decremento), um rácio que se encontra diretamente relacionado com a massa térmica dos materiais das paredes e da cobertura constituintes do envelope de um determinado edifício (Jihui Yuan, 2018, p. 1).

A massa térmica, definida como a capacidade de um material armazenar calor do ar circundante ou de uma superfície, funciona como um regulador de temperaturas entre o período diurno e noturno, podendo constituir um instrumento relevante da arquitetura passiva (Zahan, Katsarou e Julien, 2018, p. 98; Pelsmakers, 2015, p. 172).

Para além de ser diretamente proporcional à densidade (o fator com maior notoriedade) existem mais dois, dos quais esta grandeza também depende: calor específico (diretamente proporcional) e condutibilidade térmica (inversamente proporcional):

- Calor específico: a capacidade do material em armazenar calor por cada quilograma de massa (J/kgK);
- Densidade: a massa por unidade de volume de material (kg/m^3);
- Condutibilidade térmica: a facilidade com que o calor é conduzido através de um material (W/mK) (Zahan, Katsarou e Julien, 2018, p. 98; Pelsmakers, 2015, p. 249).

O betão de cânhamo, apesar da sua baixa densidade, apresenta um excelente valor de massa térmica devido principalmente ao elevado valor de calor específico, sendo, por isso, capaz de armazenar uma grande quantidade de calor, evitando o sobreaquecimento e decrementando as variações de temperatura no interior (Zahan, Katsarou e Julien, 2018, p. 98).

> When examining the thermal performance of materials, great emphasis is placed on the thermal conductivity; indeed, this is almost always the most important parameter. However, the thermal mass effect of a building—dependent in part on the heat capacity of the fabric—is also of importance, especially in climates with significant diurnal or seasonal temperature variation. The thermal mass of a building effectively damps fluctuations in temperature, and this can be an important contribution to the overall energy use, both positive and negative (Reilly *et al.*, 2019, p. 708).

De acordo com Abdellatef *et al.*(2020), os betões de cânhamo com um rácio de mistura de 1:1 (ligante: cânhamo) e densidade entre 300-400 kg/m^3 têm propriedades mecânicas e higrotérmicas adequadas para o preenchimento de cavidades em sistemas de paredes, com valores compreendidos entre 0,09 e 0,57 MPa, 0,087 a 0,10 W/mK e 1250 a 1557 J/kgK, e um valor médio de 2,78 (gm/m^2 RH%), para a resistência à compressão, condutibilidade térmica, calor específico e MBV, respetivamente (Abdellatef *et al.*, 2020, p. 1).

O tempo, medido em horas, necessário para a onda de calor atravessar o envelope é designado por *atraso térmico,* grandeza em relação à qual tem sido desenvolvida extensa investigação relacionada com o impacto do tipo de materiais, espessuras e sistemas com vista à obtenção do menor fator de decremento e do maior atraso térmico num determinado sistema construtivo (Jihui Yuan, 2018, p. 1; Pelsmakers, 2015, p. 249).



Ilustração 145 – Provetes de ensaio com isolamento na cavidade à base de flocos de palha e de mistura seca de cânhamo. (Ilustração nossa, 2023)

Nesse sentido, no âmbito do Projeto de Investigação PI 31 Habitação modular prefabricada, do CITAD – Centro de Investigação em Território, Arquitetura e Design, da Universidade Lusíada, foram realizados testes com vista à determinação do valor de transmissão térmica e do atraso térmico de painéis pré-fabricados para paredes exteriores, a partir de dois provetes cedidos pela empresa belga Ecotiv (Ilustração 145).

Os provetes (1,20m x 0,60m x 0,30m) eram constituídos por uma moldura estrutural de madeira de pinho e por placas de Óxido de Magnésio (MgO) de 9 mm de espessura, em ambas as faces. A cavidade (±0,30m) de cada um dos provetes foi preenchida com flocos de palha (Painel 1) e com uma mistura seca de fibras de cânhamo (Painel 2), para efeito de isolamento térmico (Ilustração 146) (Coelho e Simões, 2023, pp. 1, 2; Coelho e Simões, 2023, pp. 1, 2).

Os ensaios tiveram como primeiro objetivo a determinação dos valores de cálculo da resistência térmica (R_t) e do coeficiente de transmissão térmica (U), de acordo com as normas ISO 6946:2017 e ISO 10211:2017. Os seguintes resultados foram extraídos e constam dos **relatórios OEF089/23** (Tabela 30) e **OEF090/23** (Tabela 31) (Coelho e Simões, 2023, p. 4; Coelho e Simões, 2023, p. 4)

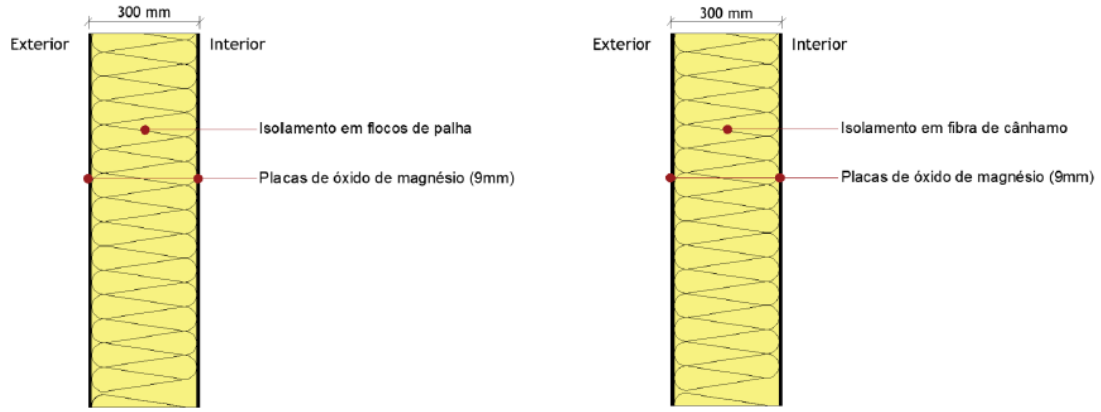


Ilustração 146 – Características técnicas dos provetes isolados com flocos de palha (Painel 1) e mistura seca de cânhamo (Painel 2). ([Adaptado de:] Coelho e Simões, 2023, p. 1; Coelho e Simões, 2023, p. 1)

Tabela 30 – Valores R_t e U conforme relatório OEF089/23 (Painel 1).

Tipologia	R_t [$(m^2 \cdot K)/W$]	U [$W/(m^2 \cdot K)$]
Painel 1	7,13	0,14

Fonte: (Coelho e Simões, 2023, p. 3)

Tabela 31 – Valores R_t e U conforme relatório OEF090/23 (Painel 2).

Tipologia	R_t [$(m^2 \cdot K)/W$]	U [$W/(m^2 \cdot K)$]
Painel 2	5,48	0,18

Fonte: (Coelho e Simões, 2023, p. 3)

O fator de decremento e o atraso térmico foram calculado em conformidade com a norma ISO 13786:2017, para uma parede vertical como envolvente exterior, considerando-se um fluxo unidirecional horizontal e um período de variação de temperatura de 24 h (Tabela 32) (Coelho e Simões, 2024, p. 1).

Tabela 32 – Fator de decremento e atraso térmico do Painel 1 e Painel 2.

Características térmicas dinâmicas	Painel 1 flocos de palha	Painel 2 fibras de cânhamo
Fator de decremento, f [-]	0,194	0,167
Atraso térmico (h)	12,95	14,23

Fonte: ([Adaptado de:] Coelho e Simões, 2024, pp. 2, 3)

Em conclusão, pode-se inferir que apesar de o sistema replicado no Painel 1 possuir um coeficiente de transmissão térmica (U) menor que o do Painel 2 (0,14 < 0,18), o facto de o valor do atraso térmico do Painel 2 ser superior (14,23 h > 12,95 h) (Coelho e Simões, 2024, p. 3), pode induzir a preferência por esta opção.

De realçar que as soluções baseadas em cânhamo, assim como de outros materiais renováveis são resistentes ao fogo, com excelentes propriedades de condicionamento e isolamento acústico, repelente de insetos e de fungos, além das características ímpares já mencionadas de permeabilidade ao vapor e de regulação da humidade.

Tais características, numa ótica empresarial, podem e devem ser exploradas do ponto de vista do *marketing* e da gestão comercial dos produtos, com vista à sua divulgação e penetração no mercado português, ainda muito distante do praticado noutros países, nomeadamente da UE. A título de exemplo apresentamos, parcialmente, duas fichas técnicas de produtos de empresas portuguesas operando no mercado nacional

No primeiro caso trata-se de uma empresa fabricante e distribuidora de blocos de cânhamo, onde as características técnicas fazem menção explicita à densidade, condutibilidade térmica, coeficiente de transmissão térmica, isolamento acústico, reação ao fogo, bem como o calor específico (1091,8 J/kg^{o}C) e o atraso térmico, que varia entre 5,3 e 14,4 horas para uma parede de 12 e de 30 cm, respetivamente (Tabela 33) (Cânhamor, 2022).

Tabela 33 – Características técnicas referentes a blocos de cânhamo.

Características	Unidade	Espessura				Norma
		12cm	20cm	25cm	30cm	
Dimensão modular	mm	500x250	500x250	500x300	500x250	EN 772-16
Espessura	mm	120	200	250	300	EN 772-16
Blocos/m2	Blocks/m2	7.6	7.6	6.4	7.6	-
Peso seco	kg	5.3	8.9	13.3	13.3	-
Peso máximo	kg	6.4	10.8	15.9	15.9	-
Densidade aparente seca	kg/m3	355				EN 772-13
Consumo de argamassa adesiva	kg/m2	11.2	18.6	21.3	27.9	-
Resistência à compressão	kPa	≥ 150	200	≥ 200	300	EN 772-1
Condutibilidade térmica seca	W/m°C	0.082				EN 12664
Resistência térmica Seca	m²K/W	1.46	2.44	3.05	3.66	ISO 6946
Coeficiente de tramissão térmico	W/m2°C	0.59	0.37	0.3	0.26	ISO 6946
Calor específico	J/kg°C	1091.8				-
Atraso térmico	h	5.3	9.4	11.9	14.4	ISO 13786
Reação ao fogo	-	B-s1,d0				EN 13501-1
Coeficiente de absorção sonora α	-	≤ 0.9	0.9	≥ 0.9	0.95	EN ISO 354
Índice de isolamento Sonoro RW	dB	42	45	45	45	ISO 10140-1
Resistência à difusão de vapor de água μ	-	5.25				ISO 12572
Sd - espessura de difusão equivalente	m	0.63	1.05	1.31	1.58	EN ISO 12572

Fonte: [Adaptado a partir de:] Cânhamor (2022)

Em contrapartida, a outra empresa tem como objeto a venda a retalho de materiais de construção convencionais, entre os quais constam os isolamentos sintéticos de origem fóssil, concretamente placas de XPS e EPS.

Tabela 34 – Características técnicas referentes a placas de XPS.

Propriedade	Produto			Unidade		Norma	
Resistência à Compressão (10% deformação)	Espessura >= 40 = 300			Kpa		EN 826	
Densidade nominal	33 (+/-9%)			Kg/m3		EN 1602	
Condutividade térmica (10ºC) >=40<=60 Condutividade térmica (10ºC) >=70<=100	0,033 0,034			W/m*k		EN 13164 EN 12667	
Condutividade térmica (10ºC)>100	0,036					EN 12939	
Espessura nominal (mm)	40	50	60	70	80	100	120
Resistência térmica (m2K/W)	1,20	1,50	1,80	2,05	2,35	2,95	3,30
Perpendicular à tração das faces	>=400			TR400		EN 1607	
Resistência ao cisalhamento (50 mm)	>=220 kPa			τ		EN 12090	
Módulo de cisalhamento (50 mm)	>=3800 kPa			G		EN12 090	
Absorção de água	<=0,7			% Volume		EN 12087	
Reação ao fogo	E			Euroclasse		EN 13501-1	
Temperatura limite de aplicação	-50/+70			ºC			
Dimensões							
Espessura (1)	40-50-60-80-100			mm			
Comprimento x largura (1)	1250x600			mm			
Acabamento da superficie	LISO/SEM			mm/m			
Esquadria	PELE <5			mm/m		EN 824	
Tolerância da espessura	+/- 2 (Espesor < 50) -2/+3 (Espesor >= 50)			mm		EN 823	
Tolerância de largura	+/-4			mm		EN 822	
Tolerância de comprimento	+/-8 (Largo <=1500 mm) +/-10 (Largo > 1500 mm)			mm		EN 822	
Acabamento lateral							
Aplicativo recomendado	REABILITAÇÃO/MURO PELO EXTERIOR						

Fonte: [Adaptado a partir de:] Obras360 (2024)

Como se pode verificar, apenas a densidade, a condutividade térmica e a reação ao fogo poderão servir de termo de comparação, sendo, porém, totalmente omissa relativamente ao calor específico e ao atraso térmico (em nossa opinião, o indicador mais importante em termos da eficiência energética), o que constitui a regra geral do mercado dos materiais convencionais (Tabela 34).

3.2.2.3. APLICAÇÕES EM CONSTRUÇÃO CIRCULAR

Na sequência do acima exposto, podemos concluir que os materiais renováveis podem constituir uma alternativa ambiental e economicamente vantajosa, contribuindo decisivamente para tornar o ambiente construído num efetivo sumidouro de carbono a longo prazo, por via da aplicação dos princípios da construção circular, nomeadamente os da prefabricação, da desconstrução seletiva e da reutilização de componentes, entre outros (Ilustração 147).



Ilustração 147 – A construção circular é um paradigma para a captura e armazenamento de carbono nos edifícios. (Ecotiv, 2024)

Existem atualmente várias opções renováveis e/ou naturais (como a terra e a cal hidráulica) que fornecem uma alternativa mais sustentável e circular para os vários elementos ou partes constituintes de um edifício: fundações, estrutura, fachadas, isolamentos e revestimentos (Parkes, 2021; Frearson, 2021).

Segundo De Man (2021), citado por Parkes, “Architects could "definitely" construct buildings completely out of biomaterials […] timber, hemp and mycelium could replace non-renewable materials like steel, plasterboard and cement.” (Parkes, 2021).

O facto de um edifício, independentemente da sua dimensão, poder ser construído a partir de materiais renováveis ou naturais já existentes, ou em fase de lançamento, implicará uma mudança de paradigma do setor, visto que, segundo Leboucq (2021), os materiais *bio-based* ainda terem uma quota diminuta de mercado, mas com perspetiva de forte crescimento, devido às condicionantes relacionadas com a temática do carbono (Frearson, 2021), o que constitui uma oportunidade.

Já dedicámos anteriormente espaço à aplicação de alguns destes materiais, nomeadamente ao cânhamo, à palha e à madeira engenheirada, em aplicações estruturais e como isolamento térmico. Na impossibilidade de tratar todas as aplicações e respetivas variantes, o autor optou por apresentar como exemplo de uma aplicação construtiva circular, um original sistema de drenagem de pavimento à base de conchas marítimas, com características anti-humidade e isolante térmico e acústico (Ecoshelp, 2024).

Este sistema, que permite a eliminação de placas de XPS ou de filmes plásticos para efeitos de isolamento térmico ou de barreira-vapor (Ecoshelp, 2024), constitui um exemplo que, à partida, se poderá com relativa facilidade transpor para Portugal, tendo em conta a extensa orla marítima e o facto de a grande maioria do parque edificado se situar no litoral (além da pequena dimensão do País), sem onerar o preço e a pegada de carbono do material.



Ilustração 148 – Aplicação de conchas como base drenante e isolamento térmico de uma betonilha de betão de cânhamo. (Ecoshelp, 2024)

Os moluscos produzem conchas, de modo regular e em quantidade indeterminável, pelo que se trata de um recurso circular e renovável, com excelentes características técnicas, podendo ser utilizadas – com o mínimo de manipulação e transformação industrial (apenas lavadas e peneiradas) – para base ou isolamento de fundações, soleiras, betonilhas (Ilustração 148), pisos sanitários, muros de suporte, entre outros (Ecoshelp, 2024; Depreeuw, 2022).

As características técnicas e de sustentabilidade deste material renovável, adequadas à construção circular, são apresentadas e resumidas por Depreeuw (2022) do seguinte modo:

> Shells are the only insulation that can withstand moisture without being degraded. They are bio-ecological, are not modified, are not anchored/glued (loose shells) and are therefore easy to recuperate and reused for similar application. That's what makes this a very circular product. In sustainable constructions you should use eco-friendly products with good insulating properties. Shells meet this demand. It needs no explanation that they are natural and sustainable. Furthermore, they are multifunctional. Shells occur in different forms and sizes. Smaller sizes are ideal for drainage, bigger versions are very heat insulating. They can even protect the climate inside the habitat because they form a natural barrier between groundwater and the inside floors. People sensitive to fluctuations

> in humidity (rheumatic and asthmatic patients) can breathe comfortably in every space. (Depreeuw, 2022).

Em todo o caso, há que realçar, uma vez mais, que a utilização massiva de materiais renováveis e biogénicos, principalmente os de crescimento rápido para fins de isolamento térmico do envelope dos edifícios – a par ou isoladamente da utilização de materiais biogénicos estruturais (Ilustração 149) – é uma estratégia simples e viável para a efetiva sequestração e armazenamento de carbono no edificado, e respetivas consequências no combate às alterações climáticas antropogénicas (Carcassi *et al.*, 2020, pp. 237, 238).



Ilustração 149 – Utilização de madeira como material estrutural e de acabamento interior no edifício InnoRenew CoE (Izola, Eslóvénia). (Cortesia do Professor Doutor Arqt. Alberto Reaes Pinto, 2023)

3.2.3. PRINCIPAIS SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE EDIFÍCIOS

Ao longo do tempo foram sendo desenvolvidos vários sistemas construtivos adequados à sociedade, ao tempo e ao lugar em que se inseriam. Os materiais de construção são as respetivas unidades constituintes, permitindo a materialização de edifícios de todas as dimensões e finalidades, pelo que é irrealista afirmar ser possível construir de forma sustentável e circular, sem materiais e sistemas construtivos circulares.

No caso português o sistema construtivo mais divulgado desde os meados do século XX, independentemente do seu porte ou dimensão, é aquele tradicionalmente executado *in situ* e baseado numa estrutura reticulada de betão armado, com lajes aligeiradas ou maciças e envelope em alvenaria (Ilustração 150). Os sistemas de isolamento e os tipos de acabamentos têm variado ao longo do tempo, em função das exigências dos utentes e dos regulamentos.



Ilustração 150 – Estrutura reticulada e lajes de betão armado com preenchimento de panos de alvenaria em Vila Nova de Gaia, Portugal. (Ilustração nossa, 2024)

Em Portugal, há a realçar o facto de que – e apesar das potenciais vantagens ambientais e económicas – a prefabricação em edifícios residenciais, segundo a perceção do autor, continua sendo residual e confinada a casos pontuais, independentemente da dimensão e do valor dos empreendimentos.

De igual modo há que referir que, tradicionalmente, a prefabricação em Portugal esteve predominantemente orientada para os edifícios não-residenciais (p.e.,industriais, comerciais, logísticos, desportivos), a partir de soluções pré-esforçadas de betão armado e, posteriormente, de soluções metálicas clássicas ou inovadoras (como os perfis de seção variável) e, por último, a madeira engenheirada.

Excecionalmente, existem alguns exemplos icónicos, como é o caso de Santo António dos Cavaleiros (Ilustração 151), um complexo residencial de aproximadamente 3.000 fogos (Pinto, 2023, pp. 86–103; Pinto, 2022, pp. 118–125) espraiados por 42 hectares, situado em Loures, na área metropolitana de Lisboa, projetado e executado com um sistema construtivo prefabricado tridimensional pesado (Pinto e Urbano, 2024, p. 103).



Ilustração 151 – Complexo residencial de Santo António dos Cavaleiros, Portugal. (Pinto, 2023, p. capa)

Mais recentemente, constata-se a entrada progressiva no mercado residencial de mais propostas de construção prefabricada de betão armado, mas também de aço e de madeira, para obra nova e reabilitação (Ilustração 152).

No entender do autor, as estruturas de grande porte executadas em aço, ou em madeira estrutural, não têm tido, até ao momento, expressão visível no nosso país, sendo expectável uma aceleração, tendo em vista as necessidades habitacionais, a urgente descarbonização do edificado e a transição para a construção circular.



Ilustração 152 – Reabilitação com sistema aligeirado de aço em Lisboa, Portugal. (Blinkhouse, 2022)

3.2.3.1. SISTEMAS DE ESTRUTURAS DE PEQUENO PORTE

Por estruturas de pequeno porte, entende-se, para efeitos deste trabalho, a supraestrutura de edifícios residenciais ou comerciais até dois pisos de altura, com cobertura plana ou inclinada, incluindo sótão.

De especial interesse para este tipo de estruturas, as fundações de aço helicoidais – penetrando no solo por rotação até atingir a capacidade de carga pretendida – são uma solução interessante tendo em conta a sua fiabilidade, custo e rapidez de execução, constituindo uma das soluções mais inovadoras e sustentáveis existentes no mercado (Perko, 2009, pp. 1, 2).

As fundações helicoidais oferecem múltiplas vantagens ambientais, nomeadamente a ausência de betão simples ou armado, a minimização da movimentação de terras e respetivo transporte, bem como de ruídos e vibrações, além de serem potencialmente removíveis no final do ciclo de vida, o que alarga o conceito de desconstrução seletiva às fundações (Ilustração 153) (Perko, 2009, p. 4).



Ilustração 153 – Fases de aplicação de fundações helicoidais numa obra em Vila Nova de Famalicão, Portugal.(Ilustração nossa, 2023)



Ilustração 154 – Fundações helicoidais aplicadas numa obra em Vila Nova de Famalicão, Portugal. (Ilustração nossa, 2023)

As fundações são, também, um elemento constituinte da estrutura, em geral com forte impacte e suscetíveis de serem ambientalmente otimizadas com vista à redução da sua pegada ecológica e à implementação da construção circular (Ilustração 154):

> Helical pile foundations are an environmentally conscientious and sustainable construction practice. The construction of a helical pile foundation consumes less raw material and requires fewer truck trips compared to other types of deep foundations. Substitution of helical piles for other deep foundations almost always reduces the carbon footprint of a foundation. Helical piles also can reduce disturbance in sensitive natural areas (Perko, 2009, p. 31).

Em termos gerais, os sistemas estruturais correntemente utilizados em Portugal para a construção de edifícios de pequeno porte, e de acordo com a nossa experiência, são aleatoriamente e em termos gerais, os seguintes:

- Estrutura reticulada de betão armado *in situ* (ou prefabricado);
- Sistema “Light Steel Framing” (LSF);
- Sistema “Light Wood Framing” (LWF);
- Sistema “Structurally Insulated Panel” (SIP) (Ilustração 155);
- Construção em terra (Taipa ou Adobe);
- Alvenaria resistente.



Ilustração 155 – Edifício residencial em Sintra, Portugal, pré-fabricado com painéis SIP de madeira preenchidos com flocos de palha. ([Adaptado a partir de:] Ecotiv, 2024)

Cremos ser consensual, que apesar de todos os desenvolvimentos ocorridos, atribuir à estrutura reticulada de betão armado preenchida com panos de alvenaria, a dominância das construções nacionais. Tal deve-se, em nossa opinião, a um leque variado de razões, entre as quais a aversão à mudança por parte dos projetistas e das empresas operantes no mercado, bem como à falta de informação e de educação em construção sustentável, por parte dos gestores e dos quadros, em geral.

No entanto, é nossa convicção que – e à semelhança dos restantes países europeus e desenvolvidos – os sistemas prefabricados têm ganho competitividade e quota de mercado, tanto por parte de empresas internacionais, como por fabricantes estabelecidos em Portugal, principalmente, em sistemas de aço leve (LSF), de madeira (LWF) e painéis (SIP[14]).

3.2.3.2. SISTEMAS DE ESTRUTURAS DE MÉDIO E GRANDE PORTE

Por estruturas de médio porte entendem-se, neste contexto, as estruturas que, entre outros critérios, se desenvolvam até seis pisos e as de grande porte, as restantes. Para

[14] No contexto deste trabalho, a sigla SIP – Structurally Insulated Panel designa todos os tipos de painéis autoportantes, elementos estruturais no interior e isolamento a preencher totalmente a cavidade, revestidos em ambas as faces com placas de material de espessura e resistência mecânica adequadas.

este efeito, os sistemas construtivos mais utilizados ou com potencial de utilização, resumem-se aos seguintes (a ordem de seriação é arbitrária) :

- Estrutura reticulada de betão armado *in situ* (ou pré-fabricado);
- Estrutura reticulada de aço (pré-fabricado);
- Estrutura de madeira engenheirada (pré-fabricado);
- Estrutura híbrida de betão-aço, aço-madeira ou betão-madeira (Ilustração 156).

Sendo maioritariamente executados em betão armado *in situ*, os edifícios de médio e grande porte, predominantes em ambiente urbano, são por isso mesmo suscetíveis de otimização em termos de sustentabilidade e de titularidade, pelas razões já expostas anteriormente. De notar que os edifícios residenciais ou de escritórios de estrutura reticulada de aço são praticamente inexistentes em Portugal, ao contrário de outros países, em vários continentes.



Ilustração 156 – Estrutura híbrida de betão armado e CLT no edifício Hotel Antas Garden, no Porto, Portugal. ([Adaptado a partir de:] Ordem dos Engenheiros Região Norte. Delegação Vila Real, 2023)

No entanto, verifica-se, recentemente, em algumas cidades do país (p.e., Braga, Guimarães, Porto, Lisboa) o surgimento de soluções alternativas em prefabricação

modular baseada em madeira engenheirada, motivada por agentes económicos e tendo em vista o alinhamento com a atual e futura legislação europeia e nacional.

Tal é o caso do Hotel Antas Garden, no Porto, com uma estrutura híbrida de betão armado e madeira CLT, incluindo as lajes e as paredes exteriores e interiores (Ilustração 170), tendo sido, eventualmente, o primeiro edifício do país de grande porte com estas características (Ilustração 157).

No decurso de uma visita técnica organizada pela Ordem dos Engenheiros Região Norte (OERN) à obra, em junho de 2023, com o objetivo de os participantes terem " […] contacto com esta solução inovadora – CLT." (Ordem dos Engenheiros Região Norte. Delegação Vila Real, 2023), pode ler-se:

> A madeira laminada cruzada utilizada neste edifício, também conhecida pela sigla CLT (de Cross-laminated timber), é um tipo de produto estrutural de madeira que compreende várias camadas de madeiras, dimensionada colada, tal como a madeira laminada colada, porém, diferente desta, cada tábua ou lamela é orientada perpendicularmente à anterior. Essa orientação garante maior rigidez estrutural para a CLT em ambas as direções, tal qual uma chapa de compensado, mas com componentes mais espessos, resistindo melhor a tração e compressão.(Ordem dos Engenheiros Região Norte. Delegação Vila Real, 2023).



Ilustração 157 – Paredes exteriores em CLT no edifício Hotel Antas Garden no Porto, Portugal. (Ilustração nossa, 2023)

Diretamente relacionada com a arquitetura, a questão dos sistemas estruturais e construtivos é, no nosso entender, de extrema importância para alcançar a sustentabilidade e a circularidade no edificado, sendo também um aliado na mitigação dos efeitos das alterações climáticas antropogénicas, através do edificado.

Nesse sentido, a possibilidade de prescrição e adoção de soluções baseadas na natureza, tais como coberturas e paredes verdes, por parte das estruturas e sistemas construtivos, nomeadamente em edifícios de médio e grande porte onde predominam as coberturas planas, é determinante para a gestão sustentável da água e obtenção de cidades mais circulares (Ilustração 158) (Pearlmutter *et al.*, 2021, pp. 2, 3).

Para além de vantagens em termos de biodiversidade, arrefecimento, produção local de alimentos, conforto térmico, captação de carbono e dos efeitos benéficos na saúde humana, há também a destacar o papel das coberturas verdes na retenção (atraso) do caudal das águas pluviais, evitando a sobrecarga da rede de drenagem, a qual poderá conduzir a inundações no pico de fluxo (Ilustração 159) (Pearlmutter *et al.*, 2021, p. 13; Silva *et al.*, 2023, p. 76; Valle, 2022, pp. 17, 18; Freitas Jr. *et al.*, 2017, p. 37).

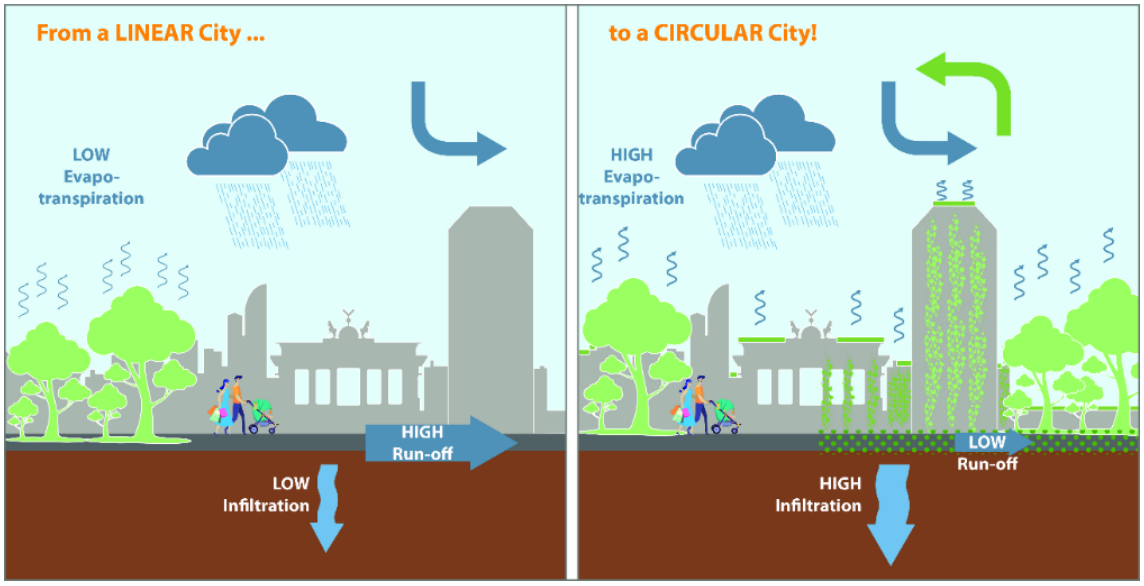


Ilustração 158 – As coberturas e as paredes verdes como ferramentas arquitetónicas para a obtenção de cidades circulares. (Pearlmutter *et al.*, 2021)

Mais recentemente, surgiram propostas inovadoras com vista a melhorar não só a capacidade de retenção das coberturas verdes, mas, também, a detenção, via fricção, dilatando substancialmente o tempo de escoamento, refletida no achatamento da curva do caudal (Ilustração 160) (Detention Roof, 2024; Sempergreen, 2021; The Purple-Roof System, 2019).

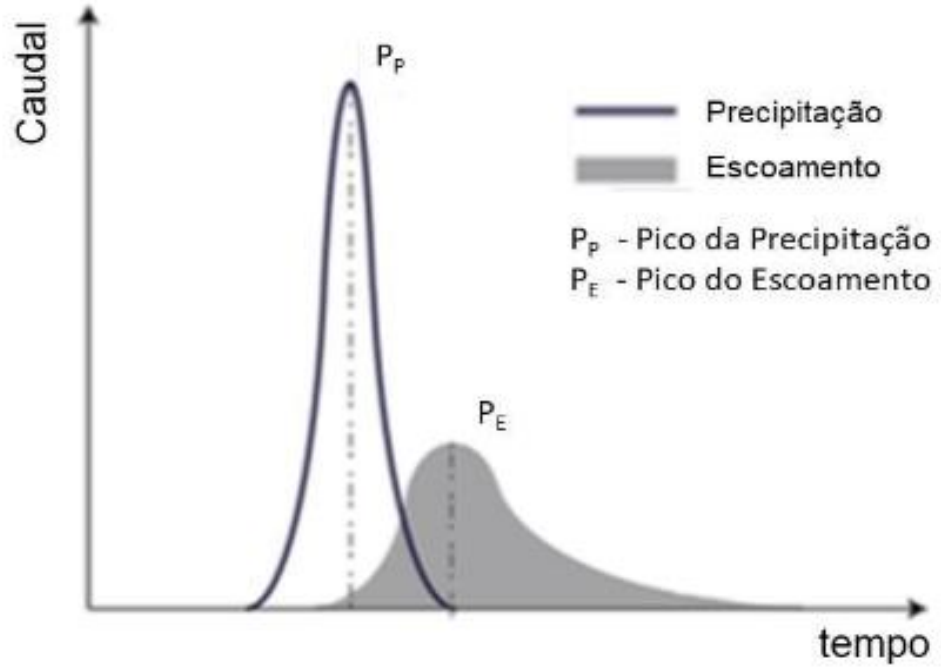


Ilustração 159 – Atenuação do pico do caudal pluvial devido ao efeito de retenção de uma cobertura verde. (Valle, 2022, p. 18)

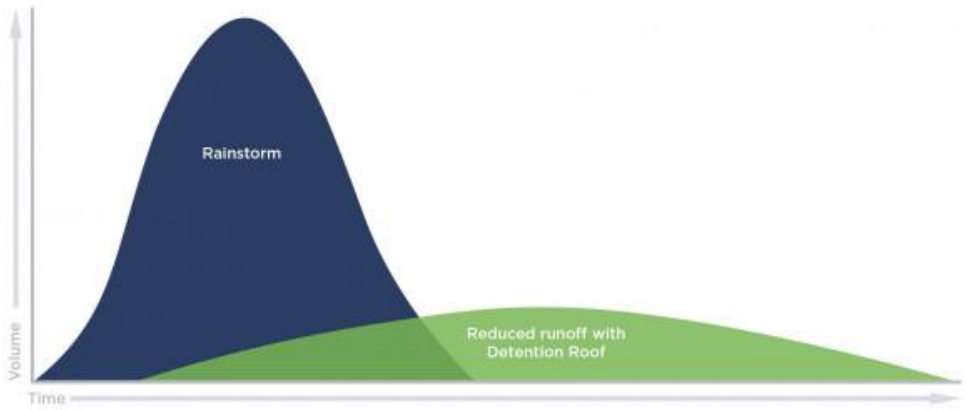


Ilustração 160 – Achatamento da curva do caudal de escoamento, devido a uma cobertura verde com efeito adicional de detenção. (Detention Roof, 2024)

Essencialmente, o fenómeno de detenção respeita à capacidade de abrandamento da velocidade e do fluxo de escoamento da água pluvial, o que conduz a uma diminuição da quantidade de água por unidade de tempo, permitindo uma melhor percolação do solo, sem comprometer a eficácia da rede de drenagem (Ilustração 161) (Zakrisson, 2022).

> How detention is achieved varies between systems, but the idea is that there is built-in functionality that delays and reduces the peak outflow of water even when the roof is

> entirely saturated. A retention-only green roof becomes a pipeline when it is saturated, analogous to a soaked bath sponge. However, stormwater solutions must function even if it has been raining for several days or if the storm is so large that the green roof's retention capacity fills up long before the storm has passed. (Zakrisson e Uppala, 2022).

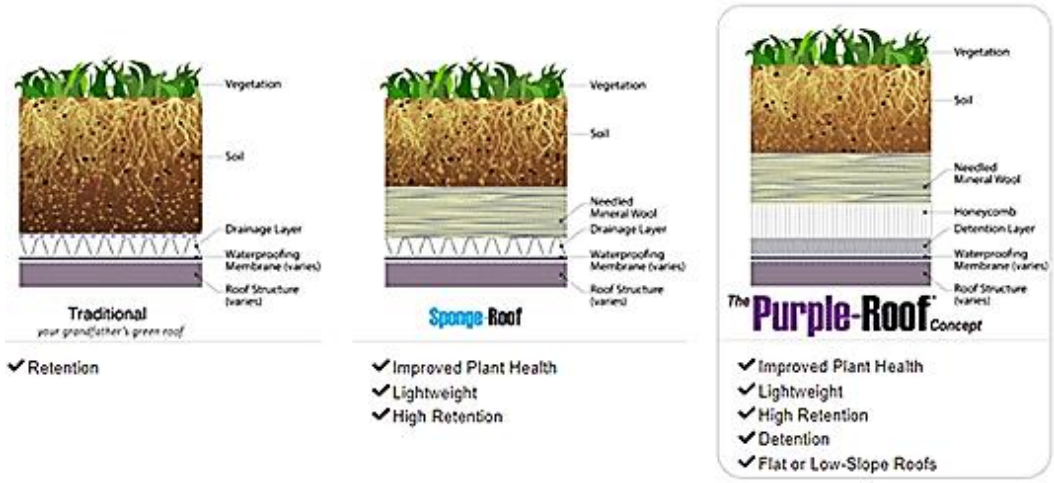


Ilustração 161 – As diferenças entre uma cobertura verde com retenção e outra com retenção + detenção. ([Adaptado a partir de:] Zakrisson, 2022)

Esta solução, em conjunto com outras técnicas de detenção de água em infraestruturas (tanques, cisternas, bacias de retenção, entre outras) baseado em coberturas verdes com efeito de fricção permitem, numa primeira fase, a retenção da água e a sua posterior lenta e controlada libertação, traduzindo-se em benefícios ambientais e económicos) (Zakrisson, 2022; Pelsmakers, 2015, pp. 124–126).

3.2.3.3. SISTEMAS DE PAREDES INTERIORES E EXTERIORES

Parede exterior é o elemento vertical confinante, que separa o interior do exterior, protegendo da intempérie e garantindo privacidade, segurança, beleza e conforto. Pode ter funções estruturais, conforme o material e o sistema construtivo, ou de simples preenchimento (como no caso das estruturas reticuladas) e integra outros materiais como isolamentos, revestimentos e caixilharias (Ilustração 162) (McMorrough, 2014, p. 95).

As paredes interiores, ao contrário das exteriores, dividem espaços dentro de um edifício, tendo por isso características distintas do envelope, devendo garantir estabilidade e conforto, garantindo a resistência ao fogo, bem como isolamento térmico e acústico, entre outras (Meireles *et al.*, 2024, p. 2).

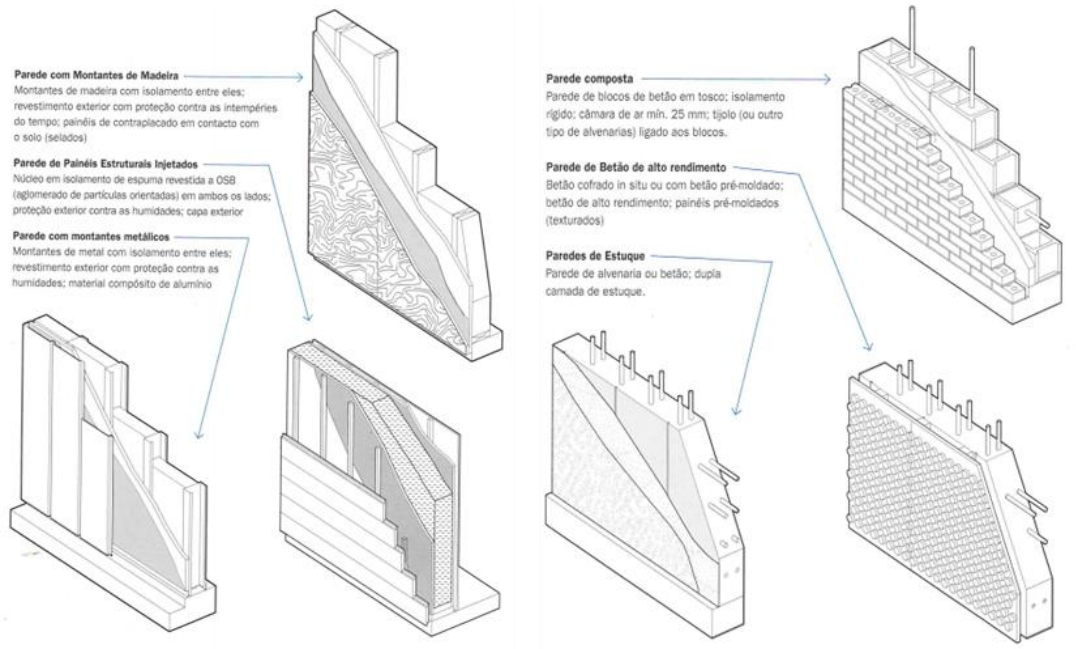


Ilustração 162 – Alguns sistemas de paredes exteriores de edifícios.([Adaptado a partir de:] McMorrough, 2014, pp. 94, 95)

Atualmente, as paredes interiores tendem a ser de construção seca ligeira (tabiques), de vários tipos e sistemas (estrutura aligeirada de aço ou madeira), de espessura reduzida com vista a maximizar a área útil (Meireles *et al.*, 2024, pp. 2, 7), ao contrário dos sistemas tradicionais, em que as construções de terra ou de alvenaria resistente implicam, necessariamente, a existência de paredes interiores autoportantes.



Ilustração 163 – Parede interior de alvenaria de tijolo furado e respetivos resíduos originados pela abertura de roços. (Meireles *et al.*, 2024, p. 8)

Em Portugal, na construção industrializada convencional, as paredes interiores ainda são, na perspetiva do autor, executadas maioritariamente *in situ*, à base de alvenaria de tijolo furado de reduzida espessura, solidarizado com argamassa cimentícia e sem

função estrutural, tendo como consequência uma série de inconvenientes associados à construção circular, nomeadamente a geração de RCDs e as dificuldades relativamente à desconstrução seletiva e à flexibilidade, entre outros (Ilustração 163) (Meireles *et al.*, 2024, p. 7).

Com vista a contornar, ou mesmo eliminar, os fatores que comprometem a implementação dos princípios de circularidade na construção, a prefabricação surge como um dos instrumentos que mais influenciam as estratégias para os alcançar, em contraponto com a construção industrial convencional (Meireles *et al.*, 2024, pp. 2, 3; Zairul, 2021, pp. 1, 2; Eberhardt, Birkved e Birgisdottir, 2022, pp. 98, 105; Minunno *et al.*, 2018, pp. 1, 2; Pinto, 2000, p. 59; Pinto e Urbano, 2024, p. 126).

> […] However, the barriers that stop the CE from being applied to traditional buildings are mainly related to their monolithic nature, architectural aspects that lead to a lack of standard measures, and an underdeveloped closed-loop supply chain. Prefabrication of buildings could represent a solution to these issues (Minunno *et al.*, 2018, p. 2).

Através da prefabricação é possível potenciar a desmontagem seletiva, a adaptabilidade, a modularidade, a reciclagem e a reutilização de materiais e componentes, além da ausência significativa de resíduos em obra e a otimização do tempo e da gestão, entre outros aspetos (tabela 35) (Minunno *et al.*, 2018, p. 9; Eberhardt, Birkved e Birgisdottir, 2022, p. 105; Pinto e Dias, 2018, p. 9; Pinto, 2000, p. 59; Pinto e Urbano, 2024, p. 109).

Segundo Pinto (2000), a pré-fabricação é uma variante da construção industrializada, caracterizada pela produção em fábrica (*off-site*) e posteriormente transportada e instalada em obra (Pinto, 2018, pp. 61, 62; Pinto e Urbano, 2024, p. 102).

Tabela 35 – A prefabricação como catalisador das estratégias de construção circular

	Strategy	Traditional Buildings	Prefabricated Buildings
1.	Reduction of construction waste and the lean production chain	−	+
2.	Integration of scrap, waste, and by-products into new components	+	−
3.	Reuse of replacement parts or entire components	=	=
4.	Design toward adaptability (reduction through life extension) during operational stages	−	+
5.	Design toward disassembly of goods into components to be reused	=	=
6.	Design for recycling of construction materials	−	+
7.	Systems to track materials and components within their supply chain	−	+

Fonte: Minunno *et al.* (2018, p. 9)

Pode ser classificada como total ou parcial, leve ou pesada e, conforme os componentes fabricados em: 1. linear (pilares e vigas); 2. plana (lajes e paredes); 3. plana-linear

(pilares, vigas, lajes e paredes) e 4. tridimensional (módulos) (Ilustração 164) (Pinto, 2023, pp. 27, 28; Pinto, 2022, p. 104; Pinto, 2000, pp. 141, 152).



Ilustração 164 – Construção tradicional desenvolvida e prefabricação como variantes da construção industrializada. ([Adaptado a partir de:] Pinto, 2023, p. 27)

Independentemente da sua classificação, um dos aspetos com mais relevância para a construção circular é a potencial substituição de materiais minerais (p.e., betão armado ou aço) (Ilustração 165) e sintéticos (p.e., EPS, XPS, PU), por alternativas de pré-fabricação leve, executadas com materiais renováveis de elevado desempenho técnico: estrutural, higrotérmico e acústico (Pinto e Dias, 2018, pp. 8, 9; Pinto e Urbano, 2024, pp. 101, 109).



Ilustração 165 – Prefabricação de painéis exteriores resistentes em betão armado: fabrico, armazenamento e aplicação em obra. ([Adaptado de:] Pinto, 2023, pp. 64, 78 , 96)

No caso específico das paredes exteriores, resistentes ou não, a questão térmica assume, entre outras, especial importância, tendo em conta a questão do conforto dos utilizadores e da eficiência energética (Pinto e Dias, 2018, p. 11; Pinto, 2018, p. 142) sendo geralmente aceite que é um problema recorrente, mas não exclusivo, dos painéis e fachadas pré-fabricadas.

Deste modo, a possibilidade de utilização de painéis ou módulos tridimensionais exteriores leves, garantindo (por via dos materiais naturais e/ou renováveis utilizados) um atraso térmico mínimo de 12 horas, é uma inovação prática no sentido de uma efetiva descarbonização do ambiente construído, sem os inconvenientes comumente

associados à prefabricação pesada e à construção industrializada desenvolvida, na linha do expressado por Pinto (2000):

> Princípios "sagrados" da construção de edifícios podem ser postos em causa (a massa, a espessura, o peso, resolvendo até aqui os problemas da robustez, da longevidade, da defesa à água, do conforto higrotérmico e acústico, da poupança de energia, etc.) com a tendência de, através da investigação, se encontrarem materiais novos, por exemplo para a construção de paredes, com os quais aquelas características se alcançam ou se ultrapassam, utilizando espessuras sensivelmente menores (tanto dos suportes rígidos como de multicamadas de materiais isolantes), integrando o máximo de funções na espessura das paredes (Pinto, 2000, p. 61).

Como exemplo do acima referido, a indústria da construção oferece cada vez mais soluções ambientalmente orientadas e tecnicamente vantajosas de painéis de fachada leves, de alto desempenho. De notar que existe a tendência de incorporar cada vez mais elementos no contexto de prefabricação plana, como caixilharias e revestimentos finais (Ilustração 166) (Branco-Teixeira (Coord.) *et al.*, 2023, pp. 156, 157).



Ilustração 166 – Painel de fachada prefabricado leve com caixilharia e revestimentos integrados. ([Adaptado de:] Grupo Casais, 2024)

Para além dos materiais renováveis, também os materiais naturais, como a terra, podem ser abordados industrialmente, como elementos pré-fabricados, como é o caso do sistema desenvolvido pelo arquiteto austríaco Martin Rauch, potenciando a descarbonização, o conforto e a economia circular na construção (Ilustração 167).

As vantagens técnicas dos painéis prefabricados de terra batida (*rammed earth*) são semelhantes às dos congéneres *bio-based*, nomeadamente as relacionadas com a qualidade do ar interior e atraso térmico, refletidas em conforto, saúde e eficiência energética, entre outras:

> These walls are not only good for the indoor climate, but also for the environment. Like all our products, ERDEN Walls are made of 100% earth. They are, if you will, the stuff from which dream houses are built. Of course, this has not only to do with the appearance, but also with the acoustic and thermal advantages. Earthen walls passively regulate the

room temperature and humidity in a natural way. Or to put it simply: in summer it stays pleasantly cool and it winter it stores and releases warmth. Our walls are made from raw earth that is excavated at local construction sites. This reduces logistical CO2 emissions to a minimum (Erden, 2018).

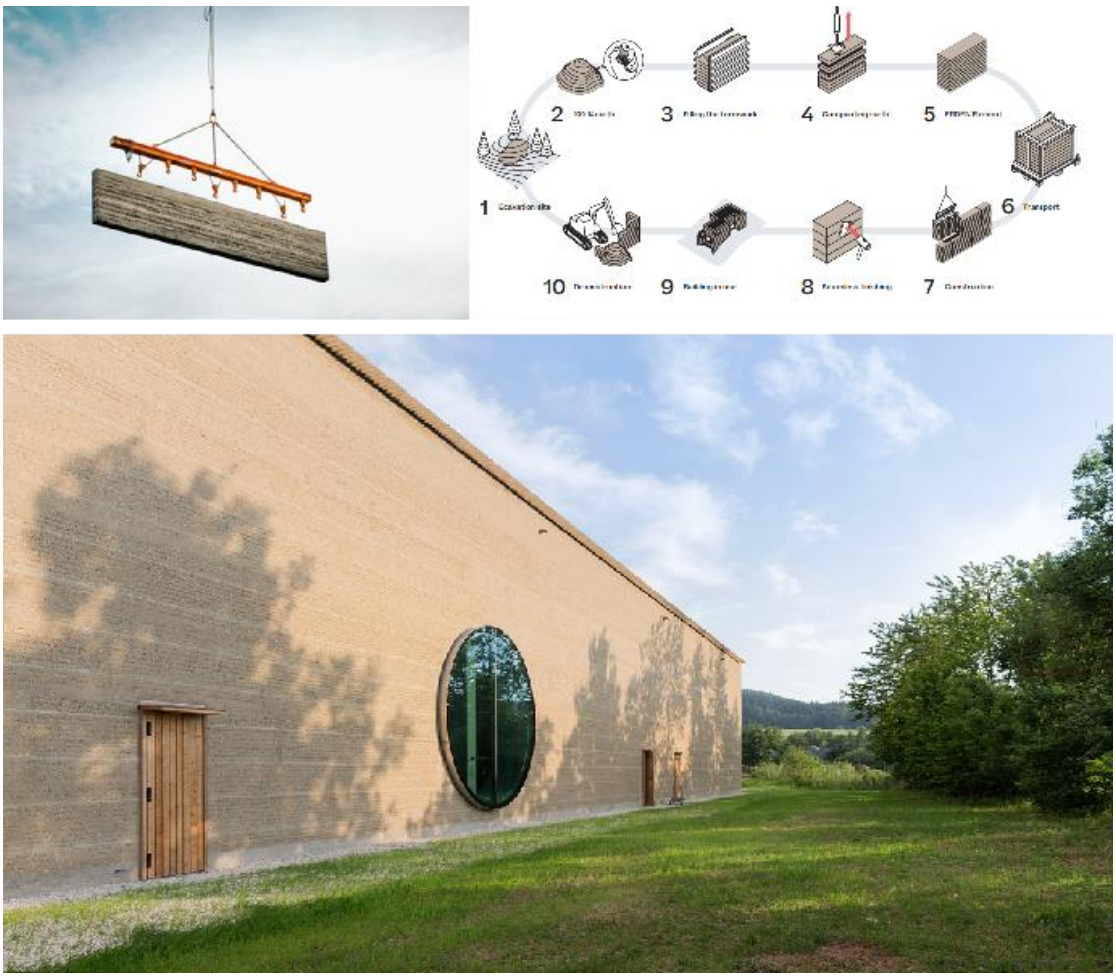


Ilustração 167 – Painéis prefabricados de terra batida e a sua circularidade. ([Adaptado a partir de:] Erden, 2018)

Acompanhando a tendência internacional, o grupo empresarial DSTgroup e o arquiteto Norman Foster estabeleceram um acordo de parceria com vista a transformar a construção em Portugal por via da promoção da construção prefabricada e modular "[…] de modo a responder de forma eficiente às necessidades crescentes do mercado mundial." (Espaço de Arquitetura, 2022).

3.3. PROJETO CIRCULAR DE EDIFÍCIOS

Definir previamente o que é um edifício circular, deverá ser uma condição necessária para a execução de um projeto circular. Segundo Pomponi e Moncaster (2017) esse termo é utilizado "[…] to define a building that is designed, planned, built, operated,

maintained, and deconstructed in a manner consistent with CE principles." (Pomponi e Moncaster, 2017, p. 711).

Campino (2022) aponta ainda, com base num estudo exploratório sobre a circularidade em projetos de arquitetura em Portugal, " […] para um patamar de conhecimento […] relativamente baixo por parte dos arquitetos que desenvolvem projetos de arquitetura em Portugal, que responderam ao questionário." (Campino, 2022, p. 34).

Do mesmo modo, e em relação aos recursos disponíveis para execução, afirma que, no geral: "[…] não se constata uma familiaridade com conceitos e ferramentas ecoinovadoras consideradas facilitadoras da implementação da circularidade em projetos de arquitetura." (Campino, 2022, p. 34).

As mesmas questões, entre outras, estão plasmadas na análise SWOT (*Strenghts, Weaknesses, Opportunities, Threats*) que consta no PACCO - Plano de Ação para a Circularidade na Construção (2022), relativamente à construção circular, onde se pode ler:

> As fraquezas identificadas centram-se no desconhecimento e falta de consciencialização ao longo da cadeia (reguladores, projetistas, construtores, donos de obra, entre outros) com a manutenção do *business-as-usual.* Existe uma grande dificuldade de colaboração (e comunicação) entre empresas e entre departamentos/funções dentro das empresas/entidades que parte da falta de compromisso da administração. […] Os produtos e construções não são projetados segundo os princípios da EC (durabilidade, adaptabilidade) e quando são circulares são aplicados numa economia linear. Para além disso, os custos elevados de recolha e tratamento dos resíduos em oposição aos baixos custos de deposição de resíduos em aterro não incentivam a correta gestão dos resíduos (seguindo a hierarquia dos resíduos). Por fim, sublinha-se a falta de incentivos às boas práticas e a não internalização no custo da degradação ambiental e social que são obstáculos para a transição para uma EC. (Fonseca *et al.*, 2022, pp. 45, 46).

De notar que, sintomaticamente, existe uma total ausência de referências à circularidade na construção no Regime Jurídico da Urbanização e Edificação (RJUE), o principal documento normativo do setor (Fonseca *et al.*, 2022, p. 30), mesmo após as alterações recentemente introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 10/2024.

Tal é refletido pela baixa taxa de circularidade da construção em Portugal, e que é definida como "[…] a razão entre o uso de materiais circulares e o total de materiais utilizados, medindo a parcela percentual do material reciclado e reintroduzido na economia assim reduzindo a extração de matérias-primas primárias." (Fonseca *et al.*, 2022, p. 107).

Este indicador, que mede a utilização de material circular, coloca Portugal (2,3%) abaixo da média europeia (12%) e da Espanha (10%), e ainda muito distante dos Países Baixos (30%), da Bélgica (24%) e da França (20%) (Fonseca *et al.*, 2022, p. 107; Fonseca *et al.*, 2022, p. 28), pelo que urgem medidas no sentido da sua correção, não se confundindo com meras medidas de gestão de resíduos.

Nesse caso, o panorama é diferente, se considerarmos isoladamente a taxa de recuperação de RCDs, refente á reutilização e reciclagem dos resíduos minerais não perigosos, onde Portugal apresenta valores elevados (93%), acima da média (88%) e próximo da Bélgica (97%) e da Holanda (100%) (Fonseca *et al.*, 2022, p. 109).

Contudo, deve ter-se em consideração que" […] diferentes critérios foram utilizados pelos diversos países da UE neste cálculo. resultando em taxas que não podem ser diretamente comparadas, pelo que há a necessidade de algum cuidado na sua análise." (Fonseca *et al.*, 2022, p. 109).

3.3.1. A CONCEÇÃO

Os arquitetos, englobados no grupo dos projetistas (Ilustração 168), são tidos como um alvo estratégico para a implementação da construção circular, visto que são diretamente responsáveis pela conceção e pelo potencial de circularidade do projeto, e, consequentemente, pelos "[…] objetivos específicos de promoção de durabilidade, adaptabilidade e de redução de resíduos". (Fonseca *et al.*, 2022, p. 50).



Ilustração 168 – Os oito grupos estratégicos para a implementação do PACCO. ([Adaptado de:] Fonseca *et al.*, 2022, p. 49)

Apesar de as estratégias de projeto e construção circular serem cada vez mais aceites e implementadas pela indústria da construção, as grandes linhas orientadoras ainda não se encontram devidamente consolidadas, nem constituem um todo coerente (Eberhardt, Birkved e Birgisdottir, 2022, p. 94).

Segundo Thung *et al.* (2024), e tendo em conta os princípios gerais da economia circular, podem-se reconhecer quatro grandes tendências do projeto para a construção circular, sintetizados nos seguintes aspetos específicos (Ilustração 169) (Thung *et al.*, 2024, pp. 7, 8; Ellen MacArthur Foundation, 2022):

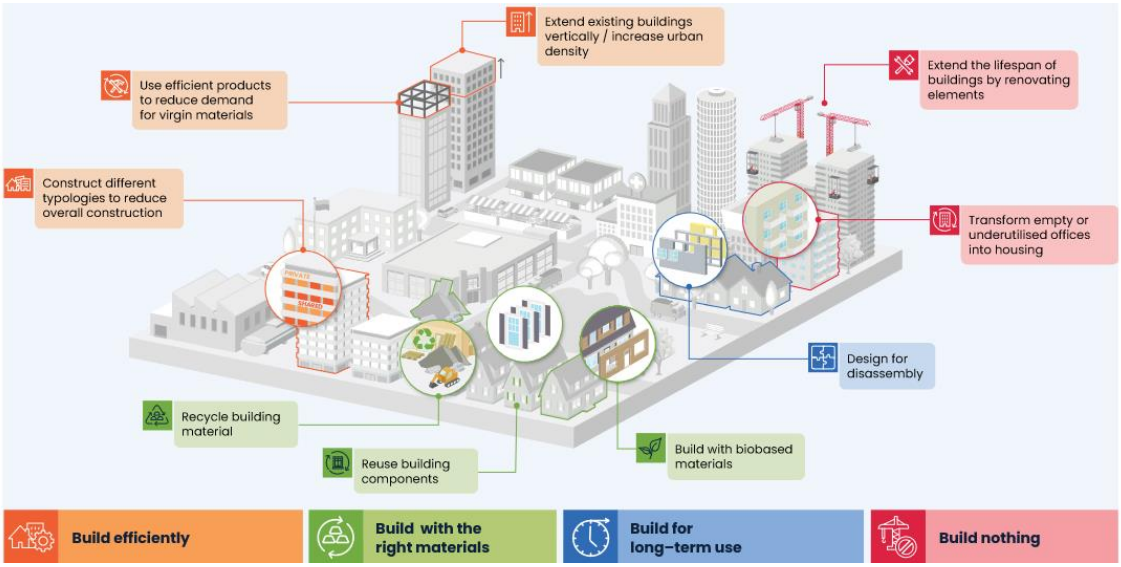


Ilustração 169 – Os quatro princípios do projeto circular. ([Adaptado a partir de:] Thung *et al.*, 2024, p. 7)

1. Construir eficientemente:

A eficiência no setor da construção atinge-se por meio de projetos de arquitetura que, em simultâneo, não só minimizem em quantidade e promovam a utilização de materiais e produtos de menor impacte ambiental, como também pela apresentação de propostas arquitetónicas alternativas com vista à obtenção de espaços funcionais partilhados e de extensões verticais;

2. Construir com os materiais adequados:

Inclui a reutilização e a reciclagem de materiais de construção não contaminados e a preferência por materiais renováveis, evitando emissões massivas de carbono, poluição e resíduos e, adicionalmente, sequestrando e armazenando carbono nos edifícios;

3. Construir para utilização a longo-prazo:

A característica mais importante deste aspeto respeita à conceção e prescrição para uma futura rápida e fácil desmontagem do edifício ou das suas partes, com vista, entre outros, a potenciar novos modelos de negócio baseados na abordagem *product-as-a-*

service e a manter o carbono armazenado nos edifícios, construídos a partir de materiais renováveis;

4. Reabilitar e renovar:

Este aspeto enfatiza a prioridade da renovação e da utilização sobre a demolição e/ou a nova construção, implicando a extensão do ciclo de vida, através de renovações ou da alteração da utilização de um edifício, de uma fração ou de um espaço para uma nova finalidade, potenciando, entre outros, a descarbonização, a redução de poluição associada e da afetação do solo (Thung *et al.*, 2024, p. 8).

3.3.1.1. ADAPTABILIDADE, DURABILIDADE E REUTILIZAÇÃO

Tendo em conta os quatro princípios acima enunciados – 1. Construir eficientemente; 2. Construir com os materiais adequados; 3. Construir para utilização a longo prazo; 4. Reabilitar e renovar – queremos, de seguida, destacar alguns aspetos que, no nosso entender, poderão assumir maior relevância no contexto nacional, a começar pela tríplice temática da adaptabilidade-durabilidade-reutilização:

- A adaptabilidade respeita à capacidade (flexibilidade) dos edifícios poderem ser utilizados para outras funções ao longo do tempo, mantendo o seu valor social e económico. O projeto arquitetónico deve, por isso, ser capaz de promover a versatilidade e a conversibilidade dos espaços (Thung *et al.*, 2023, p. 20) com vista a permitir alterações nos edifícios, minimizando as necessidade de demolições e/ou de nova construção (Thung *et al.*, 2024, p. 53).

- A durabilidade está relacionada com a maximização do tempo de vida útil e da utilização do edifício ou das suas partes, mantendo o valor económico e amortizando o respetivo impacte ambiental, minimizando as emissões, a extração de materiais e os custos. (Thung *et al.*, 2023, p. 18). Do mesmo modo, deverão ser desenvolvidos futuramente, instrumentos legais e financeiros que suportem e facilitem estes novos modelos imobiliários (Thung *et al.*, 2024, p. 52).

- A reutilização tem não só a ver com o acima exposto (adaptabilidade e durabilidade) mas refere-se, também, ao conceito de materiais secundários, os quais, juntamente com os materiais renováveis, são uma ferramenta cada vez mais importante no sentido da redução do impacte ambiental dos novos edifícios,

nomeadamente, diminuindo o fluxo de RCDs em aterros e a extração de matérias-primas, entre outras (Thung *et al.*, 2024, p. 31).

Do ponto de vista da circularidade, a reutilização de materiais de construção é preferencial à reciclagem, desde logo porque requer menos energia (ciclo mais curto) para a sua disponibilidade no mercado (Ilustração 170). No entanto, para que tal seja possível, é fundamental que os edifícios sejam prefabricados e concebidos de forma modular permitindo uma desmontagem seletiva, e que os materiais, componentes ou produtos que o constituem não sejam contaminados por substâncias tóxicas (Thung *et al.*, 2024, pp. 32, 53).

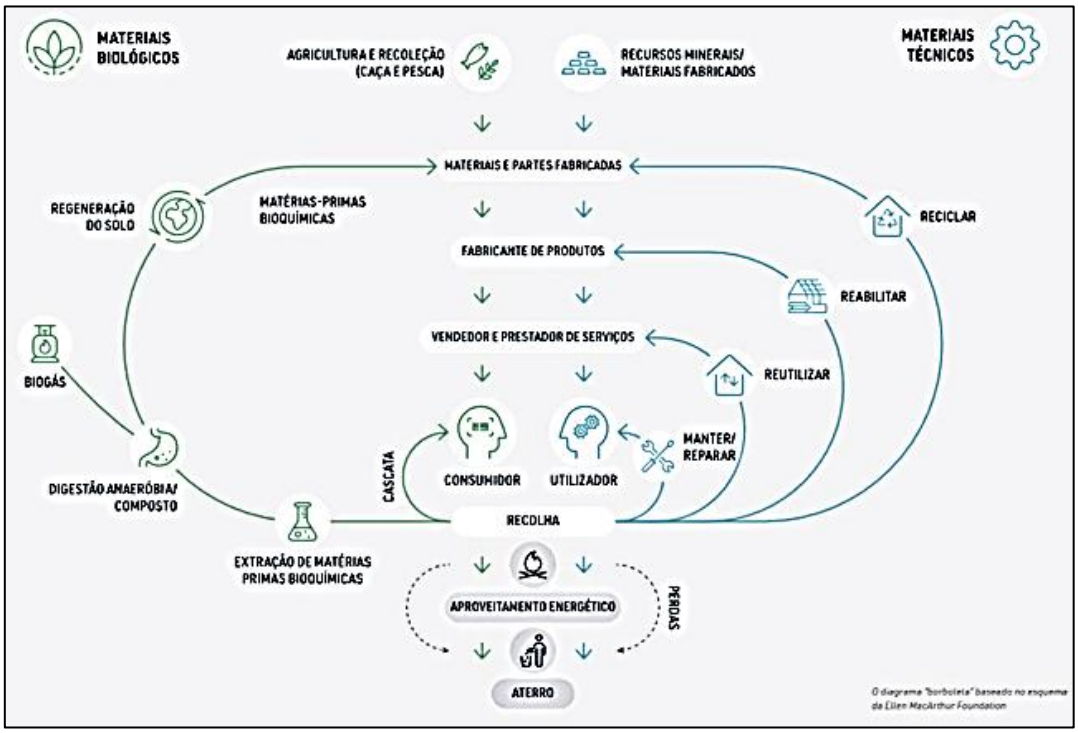


Ilustração 170 – Diagrama da circularidade na construção. (Fonseca *et al.*, 2022, p. 9)

3.3.1.2. SELEÇÃO DE MATERIAIS E PRODUTOS

Como já referido, a seleção e a prescrição de materiais e produtos de construção é um aspeto fundamental para almejar a sustentabilidade e a circularidade do ambiente construído, concretamente, a opção por materiais renováveis e biogénicos – sequestradores e armazenadores de carbono – como alternativa a materiais intensivos e emissores, principalmente para fins estruturais e de isolamento (Ilustração 171) (Pomponi *et al.*, 2020, pp. 157, 158; Thung *et al.*, 2024, p. 31; Carcassi *et al.*, 2022, pp. 5214, 5215).

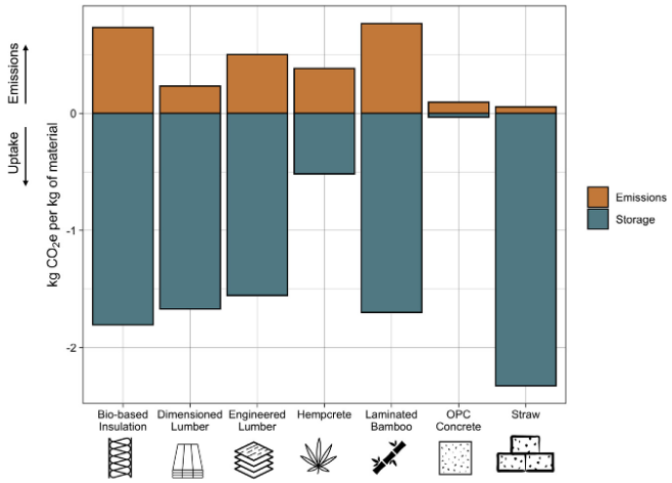


Ilustração 171 – Potencial de armazenamento de carbono de materiais de construção. (Pomponi *et al.*, 2020, p. 158)

O potencial de substituição dos materiais convencionais pelos naturais (que inclui os renováveis) é vasto, e constitui uma oportunidade para a arquitetura contemporânea reencontrar e aplicar princípios vernaculares nas tecnologias de construção, indo ao encontro de elevados padrões estéticos, técnicos e ambientais (Tabela 36) (Salihbegovic e Salihbegovic, 2020, p. 2).

> One of the most effective strategies for mitigating embodied emissions is through interventions at the material level. These interventions can be clustered into material efficiency (using less of the same material) and material substitution (using alternative materials with lower embodied emissions). When conventional materials are substituted, a further opportunity exists if the choice falls on so-called biobased materials that can store carbon. The transition to zero-carbon cities requires the use of carbon-storing materials because of both their storage potential and their reduced life-cycle emissions. (Pomponi *et al.*, 2020, p. 157).

Tabela 36 – Materiais naturais e respetivas características para aplicação em arquitetura contemporânea.

Natural materials	Density ρ [kg/m3]	Thermal conductivity λ [W/(mK)]	Embodied energy [4] [MJ/(kg)]	Usage
Wood	400 - 1000	0.075 - 0.25	1.19 – 9.19	Elements of load-bearing structure (wall, roof, ceiling, floor), infill, cladding, roofing
Stone	1500 - 2000	1.16 - 1.4	0.5	Elements of load-bearing structure (walls), cladding, roofing
Gabions				Elements of structure, infill, cladding, roofing
Loam	1000 - 2200	0.20 - 0.95	0.5 - 1.2	Elements of load-bearing structure (walls), infill
Rammed earth				Cladding - green envelope
Straw	90 - 180	0.044 - 0.063	14.5	Elements of load-bearing structure (walls), infill, cladding, roofing
Sheep's wool	13 - 25	0.039	29	Structural infill (thermal and sound insulation)
Hemp and flax	20 - 40	0.040 - 0.045	50	Structural infill (thermal and sound insulation)
Cotton	360-450	0.040	55	Structural infill (thermal and sound insulation)
Wood fibres	35 - 900	0.039 - 0.050	30 - 40	Structural infill (thermal and sound insulation)
Cork	130	0.045 - 0.060	18 - 30	Structural infill (thermal and sound insulation)
Cellulose fibre	20 - 60	0.039 - 0.04	16 - 35	Structural infill (thermal and sound insulation)

Fonte: Salihbegovic e Salihbegovic (2020, p. 2)

Contudo, o regresso aos princípios da arquitetura vernacular, numa abordagem baseada nos princípios da sustentabilidade e utilizando predominantemente materiais naturais, pode constituir um desafio para a arquitetura, no sentido de se poder, ou não, alcançar uma identidade contemporânea (Ilustração 172) (Salihbegovic e Salihbegovic, 2020, p. 3).

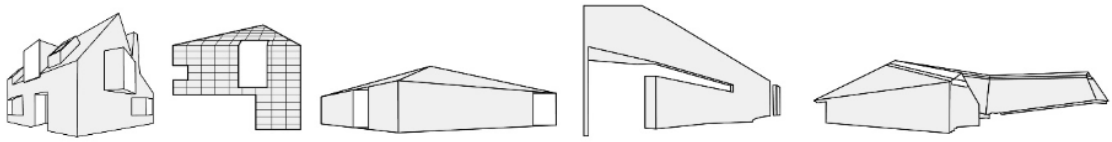


Ilustração 172 – Diagramas de edifícios contemporâneos utilizando materiais naturais. (Salihbegovic e Salihbegovic, 2020, p. 3)

Tendo em conta o horizonte 2050, a necessidade de construção à escala mundial e os compromissos assumidos em prol da descarbonização (neutralidade carbónica), concorrem para a adoção, em larga escala, de materiais *bio-based* no setor AEC, como forma de reduzir, sequestrar e armazenar as emissões (Carcassi *et al.*, 2022, pp. 5213, 5214).

Nesse sentido, Carcassi *et al.* (2022) propõem uma nova pirâmide de materiais baseada no valor do potencial de aquecimento global (net-GWP), divididos em materiais *climate positive* e *climate negative*, sendo estes predominante renováveis, com vista à neutralidade carbónica na construção (Ilustração 173) (Carcassi *et al.*, 2022, pp. 5215, 5216).

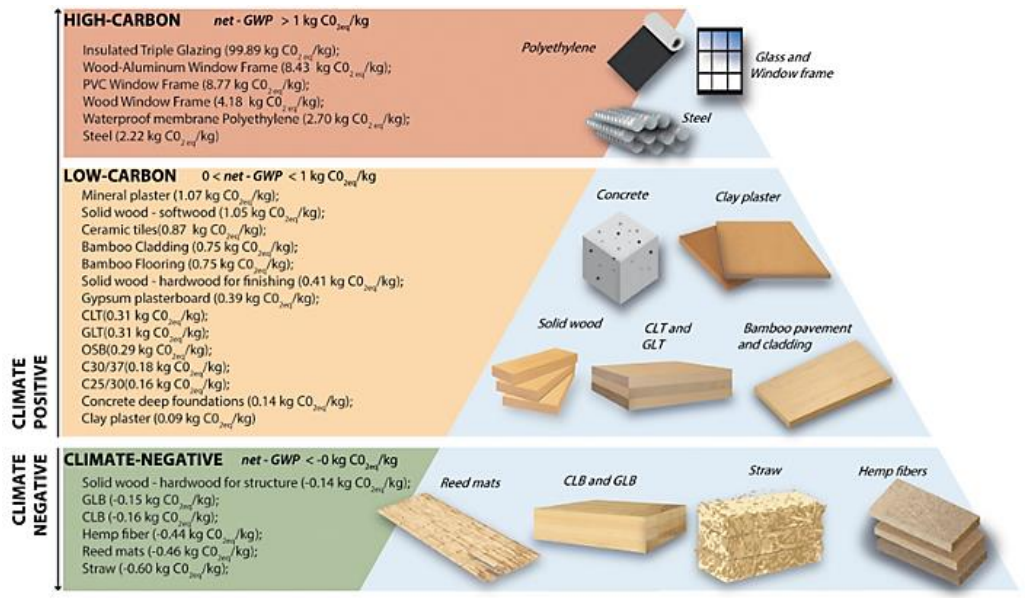


Ilustração 173 – Classificação de materiais de acordo com o seu potencial de aquecimento global (net-GWP). ([Adaptado a partir de:] Carcassi *et al.*, 2022, p. 5214)

Como exemplos de materiais *climate negative* (estruturais e de isolamento) aponta-se a madeira maciça (*solid wood),* o bambu compósito GLB (Glue Laminated Bamboo) e CLB (Cross Laminated Bamboo*),* a fibra de cânhamo (*hemp fiber*), a palha (*straw*) e as palhetas de junco (*reed mats*), enquanto o CLT (Cross Laminated Timber), assim como outros produtos compósitos de madeira são classificados como *climate positive: low carbon* (Salihbegovic e Salihbegovic, 2020, p. 5214).

3.3.1.3. AS DIFERENTES CAMADAS CONSTRUTIVAS

Como já referido, os edifícios podem ser encarados como um conjunto de camadas (*layers*) de diferentes materiais, com diferentes funções e tempos de vida útil (p.e., estrutura, revestimentos, instalações técnicas) que deverão ser concebidas como independentes entre si, possibilitando que possam ser intervencionadas sem interferir com as restantes, otimizando os custos e os prazos (Koster *et al.*, 2020, p. 16), naquilo que é designado por *Open Building Design* (Thung *et al.*, 2023, p. 84).

Esta abordagem é um aspeto importante dos projetos de arquitetura e de engenharia, sendo essencial na implementação de uma estratégia de construção circular, permitindo aumentar a durabilidade, a adaptabilidade e reutilização do edifício, mas também, permitindo a sua desconstrução ou desmontagem seletiva, sem a qual, dificilmente poderá ser executada de forma eficiente, tendo em conta a potencial interdependência existente entre as diversas camadas (Koster *et al.*, 2020, p. 16).

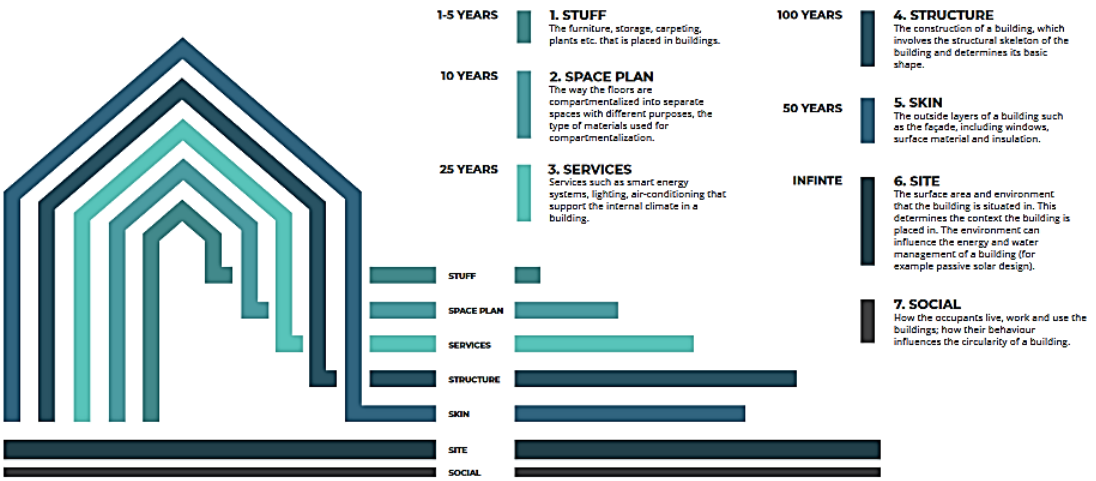


Ilustração 174 – As sete (6 +1) camadas construtivas constituintes de um edifício. (Thung *et al.*, 2023, p. 20)

A este modelo, já anteriormente citado e originalmente conhecido como as *S-layers* de Brand *,* foi agora acrescentada uma sétima: a social (Ilustração 174), referente ao modo:

"How the occupants live, work and use the buildings; how their behaviour influences the circularity of a building." (Thung *et al.*, 2023, p. 20).

Este modelo é um requisito fundamental para a aplicação dos princípios da economia circular em edifícios, os quais, materialmente, mais não são que um aglomerado de camadas heterogéneas, com períodos de vida útil que podem variar entre centenas de anos (*Structure*), a poucos meses ou mesmo semanas (*Stuff)* (Cheshire, 2016, p. 35).

> The principles of the circular economy cannot be applied, wholesale, to buildings as they are a complex collection of products, all with different lifespans, purposes and demands. The idea of designing in layers helps to unlock this tricky problem by allowing designers to approach each element of the building using different rules. So, the structure and fabric can be made to be adaptable and over-engineered to last a lifetime, while the internals will be fickle and have to be designed to be reusable or compostable. Similarly, the idea of leasing a structural beam may be far-fetched, but leasing furniture instead of purchasing it, makes complete sense. Keeping each of the layers independent allows the structure to be retained when upgrading the fabric and the building will be easier to disassemble at end-of-life so that the components can be reused, remanufactured or recycled (Cheshire, 2016, p. 40).

A partir do trabalho de Thung *et al* (2023), a tabela 37 sintetiza a descrição das características e o respetivo tempo estimado de vida útil das várias categorias de camadas construtivas (*layers),* constituintes de um edifício:

Tabela 37 - As sete (6 +1) camadas construtivas de um edifício.

As 6 camadas construtivas *(S-layers)* de Steward Brand							7ª camada
Categoria	***Stuff***	***Space plan***	***Services***	***Structure***	***Skin***	***Site***	***Social***
Descrição	Mobiliário, alcatifas, plantas, etc., e restante material colocado no edifício.	A forma como os pisos são compartimentados e o tipo de materiais utilizados.	Sistemas AVAC, energia, iluminação, etc., que influenciam o ambiente interior.	A parte estrutural do edifício; sua tipologia, materiais e influência na forma.	A fachada exterior (envelope), incluindo caixilharias e isolamentos.	O contexto em que o edifício se insere, p.e., o terreno e o local.	O modo como se utilizam os edifícios e a respetiva influência na circularidade dos mesmos.
Tempo vida útil	1 – 5 anos	10 anos	25 anos	100 anos	50 anos	Sem limite	-

Fonte: [Adaptado a partir de:] Thung *et al.*(2023)

Estabelecendo uma forte relação entre a arquitetura e a engenharia, é essencial que se entenda o projeto de arquitetura como um todo, envolvendo "[…] o domínio de todas as camadas propostas (sejam elas aparentes ou não) que devem se materializar na obra." (Ghisleni, 2019), incluindo a funcionalidade da estrutura e das instalações técnicas em soluções estéticas devidamente integradas, em lugar de […] uma colagem recebendo

uma infinidade de apêndices e camadas que possibilitam sua sustentação e funcionamento." (Ghisleni, 2019).

3.3.2. INTEGRAÇÃO DA ARQUITETURA E DA ENGENHARIA

Como uma profissão independente da arquitetura, a engenharia nasceu com o advento dos novos materiais tecnológicos como o ferro, betão armado e vidro, materiais até à data maioritariamente desconhecidos e sem escala, tendo sido necessário um profissional especialista para desenvolver novos métodos de construção adaptados as características destes materiais de construção, baseados no cálculo científico (Behrendt, 1959, pp. 63, 64; Richards, 1959, pp. 57, 58; Collins, 1998, p. 189).

Com a fundação da École des Ponts et Chaussés (1747), e ao seu primeiro diretor, Rodolphe Perronet (Collins, 1998, p. 190), a construção de vias de comunicação e a engenharia hidráulica converteram-se numa área específica, separada do campo de atuação do *architecte decorative* e confiada ao novo *architecte constructeur*, posteriormente designado por engenheiro (Behrendt, 1959, p. 64).

> Así, plenamente de acuerdo con el principio de división del trabajo, el cual domina el proceso moderno de producción, la especialización también se produjo en la profesión de arquitecto, dividiéndola en dos ramas diferentes, la artística y la constructiva – y esto para su gran detrimento (Behrendt, 1959, p. 64).

No entanto, em contraponto a este cisma (Collins, 1998, p. 193), vários nomes se levantaram, em França e no Reino Unido, tais como James Fergusson (1808 –1886), e Donaldson (1795 – 1885), notáveis arquitetos, que negaram a distinção entre as duas profissões:

> Donaldson también negó la distinción entre ambas profesiones. En 1842, insistió en que, puesto que la ingeniería y arquitectura estaban tan íntimamente relacionadas, su práctica debía ser la misma, sus estudios los mismos, y los edificios y construcciones a los que se aplicaban comunes a ambas. […] Tenían que pasar muchos años antes de que se integrara sistemáticamente la enseñanza de la ingeniería y da la arquitectura en Inglaterra, aunque en el King`s College de Londres, los cursos de ingeniería civil y arquitectura se daban juntos. (Collins, 1998, p. 193).

No seguimento destes acontecimentos, gerou-se uma corrente no sentido da integração das duas profissões, tal como o atesta o prólogo do primeiro número da Revue Generále de l`Àrchitecture (1840), ao mesmo tempo que, em 1841, Alfred Bartholemew (1801 – 1845), *deplorava* a proposta de fundação do College of Civil Engineers, por este, formalmente, aumentar a cisão entre a arquitetura e a engenharia (Collins, 1998, p. 194).

Como apontamento e já na era contemporânea, Le Corbusier (1887 – 1965), na sua obra Vers une Architecture,, proclama um dos seus *statements* mais conhecidos: “The house is a machine for living in.” (Porteous, 2002, p. 103), acrescentando ainda mais adiante: “Our engineers produce architecture, for they employ a mathematical calculation which derives from natural law, and their works give us the feeling of HARMONY.” (Porteous, 2002, p. 103).

Existe, atualmente, uma tendência internacional que ganha cada vez mais tração, no sentido da existência de programas de graduação e pós-graduação multidisciplinares, abertos a arquitetos e engenheiros (ilustração 175), assim como departamentos de universidades e instituições de ensino superior comuns, ou mesmo, associações profissionais transversais, como é o caso da SIA – Société suisse des ingénieurs et des architectes:

> La Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA) est l’association professionnelle de référence des spécialistes qualifiés dans l’ingénierie, l’architecture, les techniques du bâtiment et l’environnement. Forte de plus de seize mille membres, elle constitue un réseau interdisciplinaire hautement compétent animé par la volonté de façonner un cadre de vie de qualité, durable et porteur d’avenir.(Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2024).

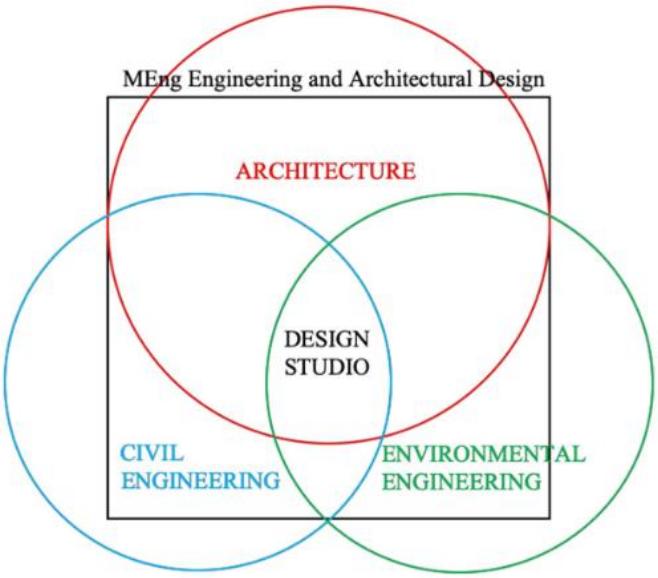


Ilustração 175 – Diagrama da estrutura do Master em Engineering and Architectural Design. (Oliveira *et al.*, 2021, p. 1256)

Na prática, a questão da integração, da relação, entre a arquitetura e a engenharia tem dois aspetos principais: o projeto (integrado) e a sua execução (entrega), atividades cada vez mais complexas e multidisciplinares, e que contam, nas suas várias fases, com a participação de vários e diversos intervenientes.

De notar que, no caso da engenharia de estruturas (uma das especialidades mais importantes e determinantes para a arquitetura) existem vários exemplos de duplas estabelecidas ao longo do tempo, como são os casos de Rem Koolhass e Cecil Balmond, de Óscar Niemeyer e Joaquim Cardozo (Ghisleni, 2019), ou ainda, de Siza Vieira e Segadães Tavares (Tavares, 2020), possibilitando obras como a Casa da Música (Porto) ou o Pavilhão de Portugal (Lisboa) (Ilustração 176), entre outras.



Ilustração 176 – A pala de betão armado pré-esforçado do Pavilhão de Portugal (Lisboa, Portugal). (Marina Parque das Nações, 2021)

Sendo a arquitetura uma matéria essencialmente interdisciplinar, deverá ser capaz de oferecer uma abordagem holística – projeto integrado – articulando entre si as várias partes (Ilustração 177), recolhendo a informação e os contributos de disciplinas afins ou de outras áreas de conhecimento, de modo a oferecer uma conceção de qualidade, "[…] onde o todo é mais importante que a soma das partes." (Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 2).

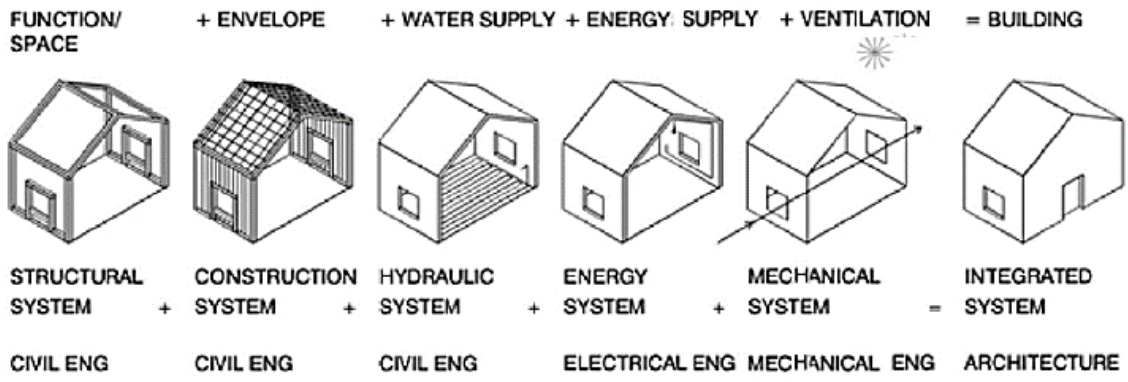


Ilustração 177 – "Conceito de Sistema Integrado/Projeto Integrado". ([Adaptado de:] Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 2)

A par da criatividade, fundamental num projeto de arquitetura, deve ser adotada uma metodologia de coordenação, onde, citando Souto Moura: "[…] tudo é feito num diálogo constante e constantemente avaliado" (Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 3), articulando as várias especialidades envolvidas, condição essencial para uma "[…] resposta coerente, integradora e otimizada." (Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 3).

O projeto integrado caracteriza-se por: 1. Colaboração entre as diversas áreas e especialidades; 2. Pelo intercâmbio de conhecimento entre diferentes áreas ou disciplinas; 3. Inclusividade; 4. Gestão do risco e da incerteza; 5. Definição e enquadramento alargado dos problemas (Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 3).

Uma das vantagens associadas à coordenação e colaboração interdisciplinar é o facto de, em consequência, se ter de alocar mais tempo à fase inicial de projeto, diminuindo os custos e os prazos devidos a erros, omissões ou alterações futuras (Ilustração 178), bem como se ter demonstrado que, também, pode ser um importante fator de inovação do produto final (Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 3).

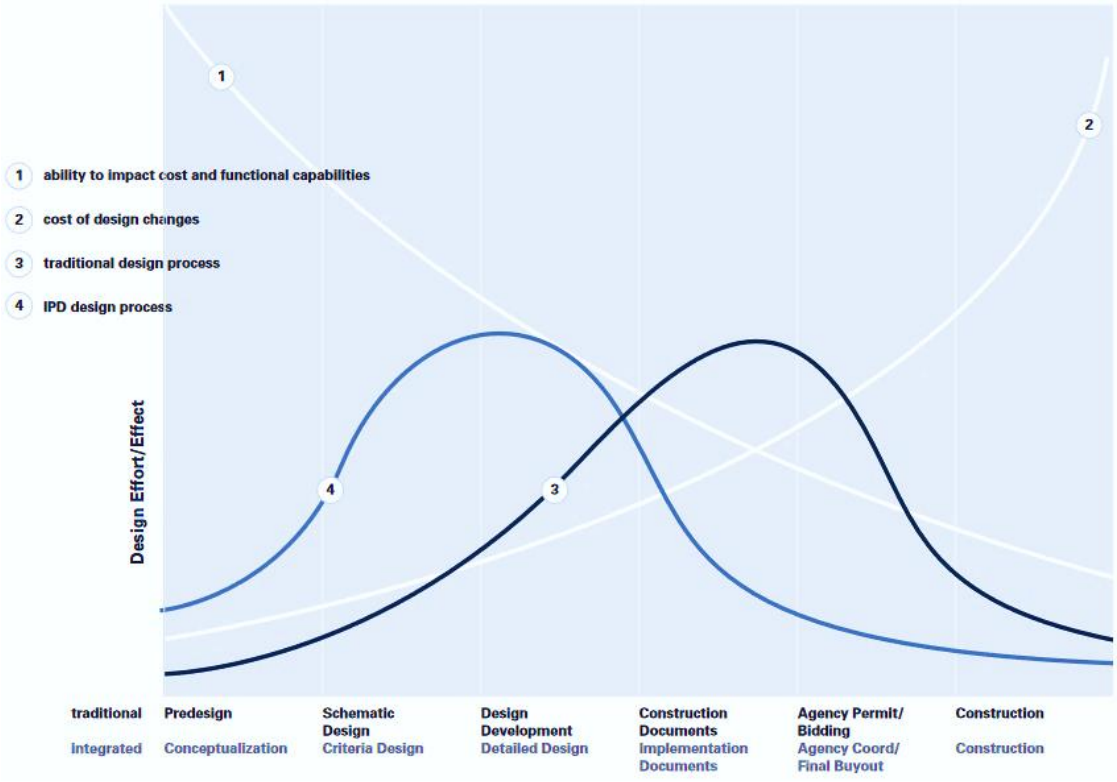


Ilustração 178 – A curva de Macleamy representando o fluxo de esforço de atividades na fase inicial do projeto, tornando-o mais eficiente e menos oneroso. (The American Institute of Architects, 2007, p. 21)

3.3.2.1. INTEGRATED PROJECT DELIVERY

O Projeto Integrado ou Integrated Project Delivery (IPD) é uma metodologia de entrega de projetos, alternativa à dominante no mercado, do tipo conceção-licitação-construção (DBB – Design-Bid-Build), da conceção-construção (DB – Design-Build) e da CM-AT-RISK. No primeiro caso (DBB), o cliente contrata um arquiteto, que por sua vez desenvolve um programa que serve de base a um projeto, elaborado conjuntamente com a equipa de engenheiros, o qual é posteriormente lançado a concurso para seleção do empreiteiro (Ribeiro, 2012, pp. 17, 19).

Na segunda situação (DB) , o empreiteiro também é responsável pelo projeto, pelo que os arquitetos surgem como consultores e preparam a documentação associada quer ao projeto quer à execução, enquanto na terceira opção (CM-AT-RISK) inclui-se um novo elemento, designado por gestor da construção (CM – Construction Manager) (Ribeiro, 2012, pp. 19, 21).

Finalmente, o IPD leva a integração e a intercomunicação entre os diversos atores a um nível elevado, recolhendo sistematicamente contributos e melhorando a metodologia conceção-construção (onde o empreiteiro desempenha um papel relevante) e integrando plenamente o cliente na fase de projeto (Ilustração 179) (Ribeiro, 2012, p. 23).

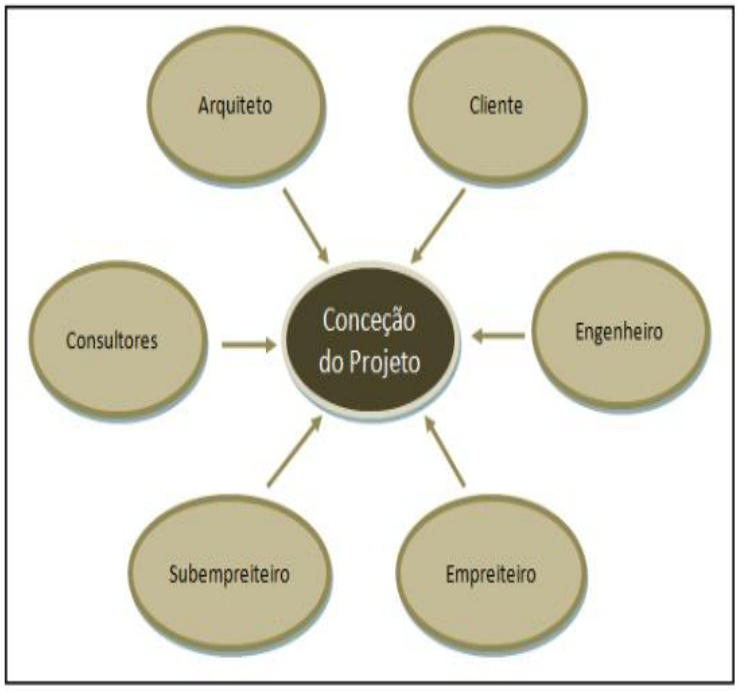


Ilustração 179 – "Esquema de um processo integrado". (Ribeiro, 2012, p. 23)

São também aspetos importantes a adoção da prefabricação e do BIM ((Ribeiro, 2012, pp. 30, 31), o que tem diretamente a ver com a sustentabilidade e a circularidade do projeto.

As principais características da metodologia IPD, segundo Ghassemi e Becerik-Gerber (2011) e referenciados por Rangel *et al.* (2016), são as seguintes: 1. A existência de contratos multilaterais entre as partes; 2. Envolvimento desde o início dos principais atores; 3. Participação no processo de tomada de decisão e de controlo; 4. Partilha de riscos e de recompensas; 5. Objetivos desenvolvidos em conjunto 6. Responsabilidade coletiva (Rangel *et al.*, 2016, p. 1281).

A tabela 38 sintetiza as principais diferenças entre a IPD e as metodologias convencionais, segundo o guia elaborado pelo AIA American Institute of Architects (AIA), e que, em conjunto com o Royal Institute of Brithish Architects (RIBA), foram os precursores do desenvolvimento e da disseminação da metodologia IPD a nível global (Rangel *et al.*, 2016, p. 1279).

Tabela 38 – Diferenças principais entre a metodologia IPD e o paradigma dominante de entrega de projetos.

Traditional Project Delivery		Integrated Project Delivery
Fragmented, assembled on "just-as-needed" or "minimum-necessary" basis, strongly hierarchical, controlled	teams	An integrated team entity composed key project stakeholders, assembled early in the process, open, collaborative
Linear, distinct, segregated; knowledge gathered "just-as-needed"; information hoarded; silos of knowledge and expertise	process	Concurrent and multi-level; early contributions of knowledge and expertise; information openly shared; stakeholder trust and respect
Individually managed, transferred to the greatest extent possible	risk	Collectively managed, appropriately shared
Individually pursued; minimum effort for maximum return; (usually) first-cost based	compensation/ reward	Team success tied to project success; value-based
Paper-based, 2 dimensional; analog	communicatitons/ technology	Digitally based, virtual; Building Information Modeling (3, 4 and 5 dimensional)
Encourage unilateral effort; allocate and transfer risk; no sharing	agreements	Encourage, foster, promote and support multi-lateral open sharing and collaboration; risk sharing

Fonte: The American Institute of Architects (2007, p. 1)

De referir que a constituição da equipa de projeto é uma etapa determinante e que deve incluir, desde o primeiro momento, não só o arquiteto e o engenheiro principal, mas

também todos os restantes consultores (energia, acústica, sustentabilidade, etc.) e o cliente, em função dos objetivos e do tipo de projeto (*Big Room concept*) .

No entanto, a implementação do *Big Room* só será possível graças à ferramenta BIM, a qual, quando devidamente partilhada entre todos os membros da equipa, serve como base de dados para estruturar, gerir e manter a informação de forma eficiente e não-redundante, possibilitando um modelo colaborativo, integrado e transparente (Jones, 2014, p. 530).

> The implementation of Integrated Project Delivery (IPD) and BIM (especially BIM as a process) turned out to be an important element, conducive to the integration of architectural and engineering activities. This is why designing has evidently become a team game (Kapliński e Bonenberg, 2020, p. 5).

De salientar que, atualmente, e para além do paradigma da sustentabilidade, a relação entre a arquitetura e a engenharia é fortemente influenciada por três fatores: a construção circular, o apoio à tomada de decisão multicritério e o *design* paramétrico (Kapliński e Bonenberg, 2020, p. 5).

3.3.2.2. BUILDING INFORMATION MODELLING

A digitalização, nomeadamente os modelos de informação na construção (BIM), é uma das quatro grandes tendências do setor AEC, a par da automatização, da eficiência energética e da economia circular, contribuindo para trazer maior produtividade ao setor (que se tem mantido estagnado), e para o dotar de indicadores mais equiparáveis às restantes indústrias (Ramos e Figueiredo, 2020, p. 197).

Nesse sentido, o BIM assume uma dupla vertente: o apoio à conceção de um projeto através das suas capacidades aplicadas ao desenho e à documentação ,mas também a de potenciar a comunicação consistente e fluida entre os vários intervenientes e especialidades do projeto (Ilustração 180) (Krygiel e Nies, 2008, p. 25).

Desse modo, torna-se exequível o acesso a informação relevante que permita justificar, de forma expedita e quantitativa, as várias as opções de projeto (como é o caso da energia ou impacte ambiental dos materiais, produtos e sistemas construtivos a utilizar, entre outros), alterando a maneira como os projetistas e decisores trabalham, e guiando a industria da construção rumo à sustentabilidade (Krygiel e Nies, 2008, p. 25); (Santiago, 2025, p. 83).

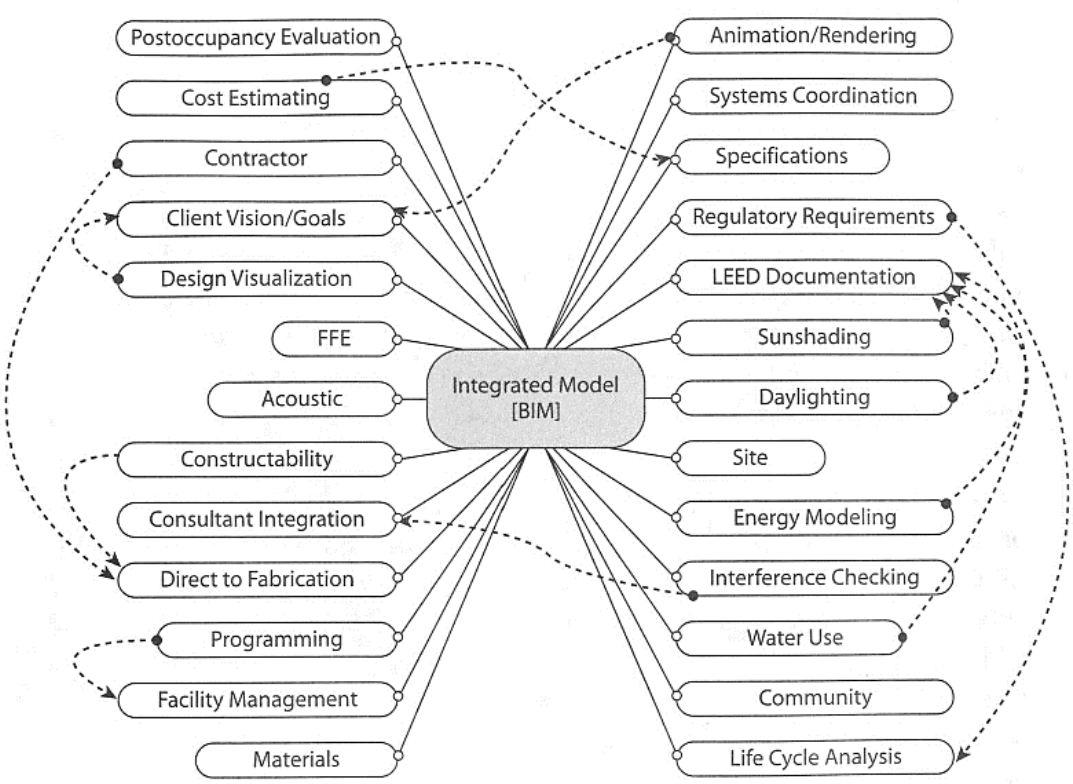


Ilustração 180 – Algumas funcionalidades do BIM e interoperabilidade entre elas. (Krygiel e Nies, 2008, p. 52)

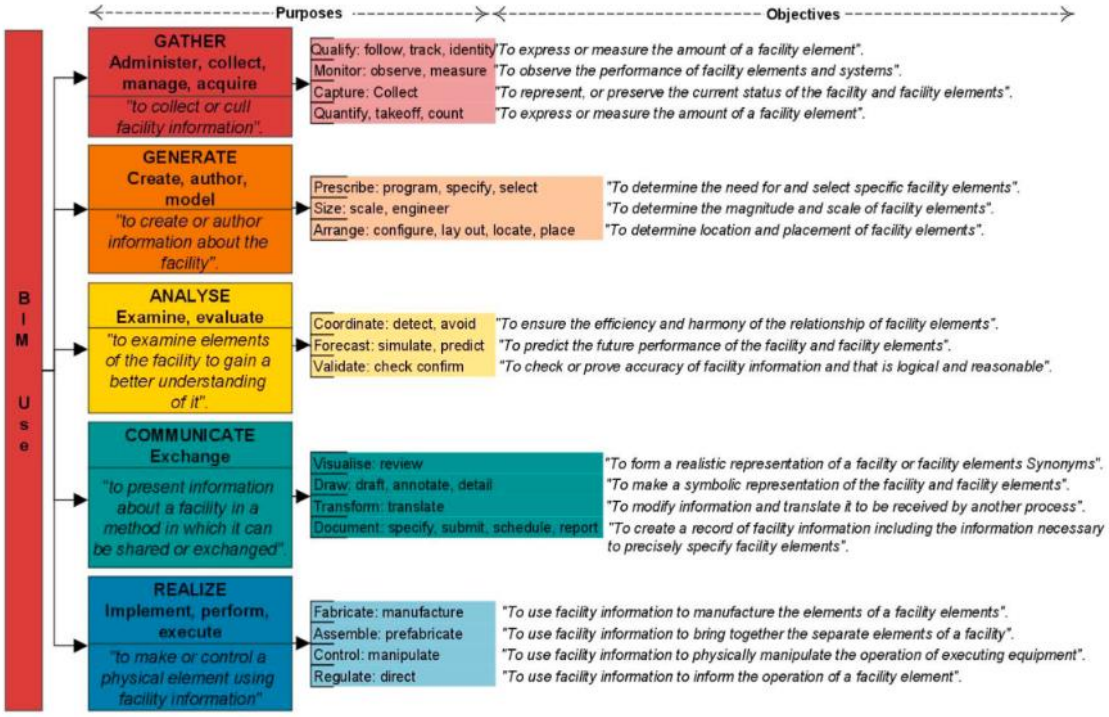
Esta tecnologia permite obter uma representação digital dos edifícios ou infraestruturas, fazendo o interface entre todos os projetos e documentos de todas as especialidades, ao longo de o todo o ciclo de vida (Ramos e Figueiredo, 2020, p. 197; Branco-Teixeira (Coord.) *et al.*, 2023, p. 202), como já anteriormente observado.

Muito importante é a distinção em relação ao CAD (Computer-Aided Design), em que cada peça é desenhada manual e separadamente sem qualquer relação entre elas, ao contrário do BIM, em que o esforço e a atenção são dedicados ao modelo, que posteriormente é capaz de gerar plantas, cortes, alçados, pormenores, etc. (Krygiel e Nies, 2008, p. 27):

> BIM is defined as the creation and use of coordinated, consistent, computable information about a building project in design – parametric information used for design decision making, production of high-quality construction documents, prediction of building performance, cost estimating, and construction planning. […] With BIM, you create a parametric 3D model used to autogenerate traditional building abstractions such as plans, sections, elevations, details, and schedules. Drawings are not collections of manually coordinated lines, but interactive representations of the model. As you shift elements in plan, those changes appear dynamically in elevation and section. If you remove a door from your model, the software simultaneously removes the door from all views and your door schedule is updated. (Krygiel e Nies, 2008, p. 27).

Os usos atribuídos à modelação BIM, independentemente das várias finalidades e objetivos, podem ser agrupados em cinco grandes áreas: 1.Reunir; 2.Gerar; 3. Analisar; 4.Comunicar; 5.Realizar (Tabela 39) (Charef e Emmitt, 2021, pp. 3, 4; Rezek, Scheer e Tavares, 2022, p. 235).

Tabela 39 – Usos do BIM e seus diferentes propósitos e objetivos.



Fonte: Charef e Emmitt (2021, p. 4)

No entanto, e apesar de serem reconhecidos um total de trinta e oito usos com potencial para apoio à implementação da construção circular (Charef e Emmitt, 2021, p. 4), continua a haver escassez de produção científica que relacione o BIM com a economia circular, conforme demonstrado pelo grande afastamento entre os dois termos, no gráfico de co-ocorrência (Ilustração 181) (Delgado e Oyedele, 2020, pp. 1271, 1272; Rezek, Scheer e Tavares, 2022, p. 634).

De facto, correntemente as utilizações mais comuns do BIM na construção respeitam à visualização 3D, estrutura, instalações técnicas e pormenores construtivos e que progressivamente se estendem ao planeamento (4D) e aos custos (5D), relacionados com as fases de planeamento, conceção, construção e operações do ciclo de vida (Branco-Teixeira (Coord.) *et al.*, 2023, pp. 205, 206).

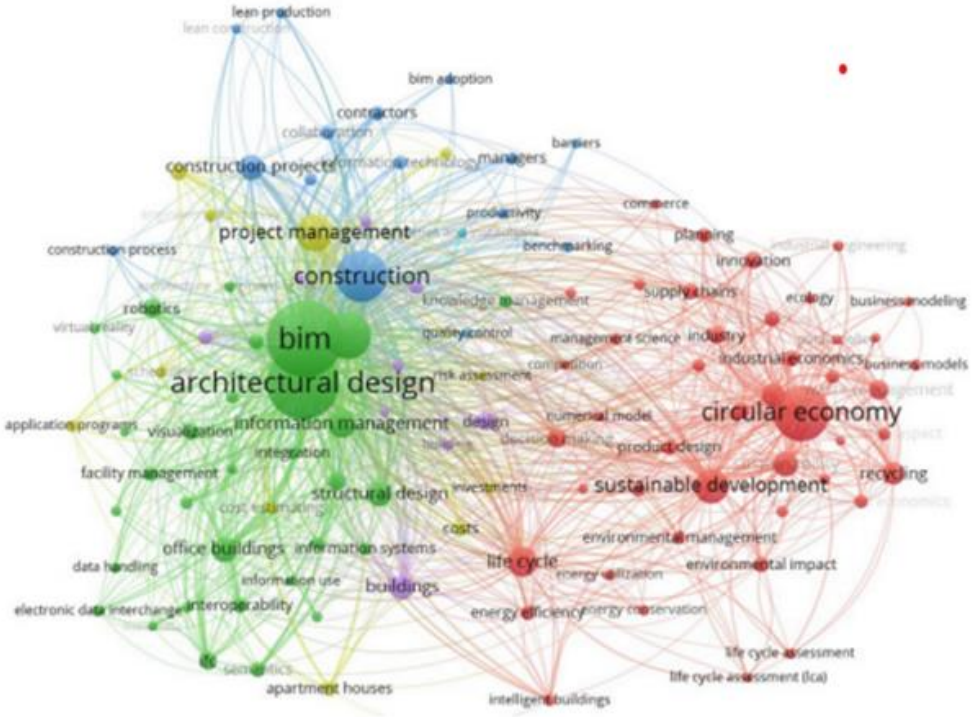


Ilustração 181 – Gráfico de co-ocorrência dos termos BIM e economia circular. (Delgado e Oyedele, 2020, p. 1273)

Contudo, subsistem ainda falhas relativamente à fase final (reabilitação, desconstrução/ demolição) e à subsequente gestão dos RCDs, no sentido da sua eliminação, minimização, reciclagem ou reutilização, o que constitui um obstáculo à implementação da economia e da construção circular (Charef e Emmitt, 2021, p. 2; Akanbi *et al.*, 2018, p. 176; (Santiago, 2025, p. 83)

Akanbi *et al.* (2018) referem um estudo de sua autoria, em que se avalia a eventual recuperação de materiais com base na dicotomia reutilização/reciclagem baseado no BIM, em que para um determinado caso específico, um sistema estrutural de aço pré-fabricado e com ligações mecânicas é o mais reutilizável (97% reutilizável e 0,7% reciclável), seguido de um sistema similar de madeira (65% reutilizável e 35% reciclável), enquanto uma estrutura de betão recupera uma grande maioria de materiais para reciclagem, excluindo praticamente as hipótese de reutilização (Akanbi *et al.*, 2018, p. 184).

3.3.2.3. CIÊNCIA DA CONSTRUÇÃO

Perante o acima exposto, e tendo em conta a necessidade de uma abordagem holística e integrada para o ambiente construído, impõe-se a adoção de uma estratégia integrada que articule eficazmente os interfaces disciplinares ao longo das várias fases do projeto,

considerando os critérios exigenciais e de composição, adequados para os parâmetros de edificabilidade definidos (Tabela 40) (Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 5).

Tabela 40 – Parâmetros de edificabilidade.

EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO				CRITÉRIOS DE COMPOSIÇÃO				PARÂMETROS DE EDIFICABILIDADE
DEFINEM OS VALORES NECESSÁRIOS PARA RESPONDER ÀS EXIGÊNCIAS				DEFINEM A FORMA DE CADA ELEMENTO				DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE COMPOSIÇÃO
EXIGÊNCIAS PROGRAMÁTICAS	+	EXIGÊNCIAS CONSTRUTIVAS	+	CRITÉRIOS TIPOLÓGICOS	+	CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO	=	
CONSTANTE				VARIÁVEL				RESULTADO
REGULAMENTOS NORMAS				OPÇÕES DA CONCEÇÃO				DEFINIÇÃO DO PROJETO

Fonte: [Adaptado de:] Rangel, Carneiro e Abrantes (2016, p. 5)

Importante salientar o conceito de *agradabilidade,* o qual, segundo Moreira da Costa (1995) citado por Rangel, Carneiro e Abrantes (2016), corresponde aos "[…] parâmetros quantitativos que podem auxiliar na conceção de edifícios de habitação […]" (Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 7), e que são expressos sinteticamente na seguinte equação (Equação 2):

Equação 2 – "Equação de projeto".

$$\text{AGRADABILIDADE} = \frac{\text{CONFORTO ACÚSTICO} + \text{CONFORTO VISUAL} + \text{CONFORTO HIGROTÉRMICO} + \text{QUAL IDADE DO AR}}{\text{CRITÉRIOS FUNCIONAIS} + \text{CRITÉRIOS EXIGENCIAIS} + \text{CRITÉRIOS ECONÓMICOS}}$$

Fonte: Rangel, Carneiro e Abrantes (2016, p. 7)

A agradabilidade é um dos critérios exigenciais que exprimem o compromisso entre os requisitos de conforto e os construtivos, considerando também a segurança, a adequação espácio-temporal, a articulação espacial, a personalização e a economia (Tabela 41) (Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 6).

Neste contexto, caberá à arquitetura definir os critérios de composição, tendo em conta os tipológicos (formais, espaciais e construtivos) e os de dimensionamento (funcionais e económicos) de modo a […] organizar e ordenar os elementos formais que irão definir a solução construtiva." (Rangel, Carneiro e Abrantes, 2016, p. 7).

Considerar um edifício como um sistema composto por materiais, componentes e sistemas que interagem com os fenómenos físicos, com o intuito de atingir um determinado nível de desempenho para os seus ocupantes é um aspeto que caracteriza

a recentemente designada Ciência da Construção (Kesik, 2019), e que está relacionado com os critérios exigenciais, acima descritos.

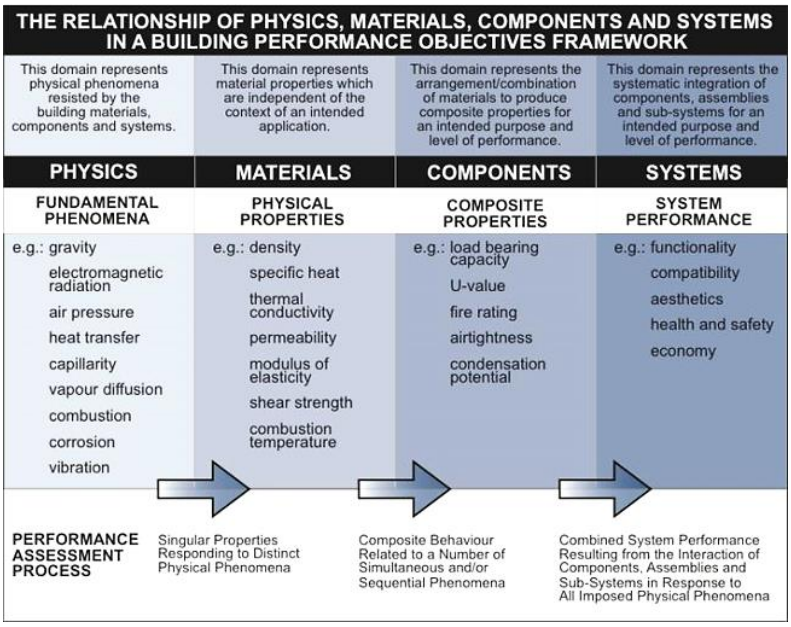
Tabela 41 – Exigências de desempenho, respetivas exigências construtivas e correspondentes critérios de dimensionamento.

EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO	EXIGÊNCIA CONSTRUTIVA	CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO
AGRADABILIDADE	CONFORTO ACÚSTICO CONFORTO VISUAL CONFORTO HIDROTÉRMICO QUALIDADE DO AR	ISOLAMENTO ACÚSTICO ILUMINAÇÃO NATURAL VENTILAÇÃO NATURAL HIGROTERMIA
SEGURANÇA	NO USO NORMAL CONTRAINCÊNDIOS CONTRA AGRESSÃO E ROUBO VIÁRIA	DIMENSIONAMENTO DE ABERTURAS RELAÇÃO COM O EXTERIOR
ADEQUAÇÃO ESPÁCIO-FUNCIONAL	CAPACIDADE ESPACIOSIDADE FUNCIONALIDADE	DIMENSIONAMENTO ESPACIAL
ARTICULAÇÃO ESPACIAL	PRIVACIDADE ACESSIBILIDADE	RELAÇÃO INTERIOR/EXTERIOR
PERSONALIZAÇÃO	APROPRIAÇÃO ADAPTABILIDADE	CAPACIDADE DE CRESCIMENTO
ECONOMIA	CUSTO DA CONSTRUÇÃO CUSTO DE EXPLORAÇÃO CUSTO DE MANUTENÇÃO	VALOR ADEQUADO AO CONTEXTO ONDE SE INSERE

Fonte: Rangel, Carneiro e Abrantes (2016, p. 6)

De facto, os fenómenos físicos provenientes do ambiente exterior, quando aplicados a um material, componente ou sistema de um edifício, implicam respostas diretas e indiretas dos mesmos (desempenho), devendo serem adequadas às solicitações. De realçar que o nível de complexidade do processo aumenta à medida que se avança no projeto, desde a seleção dos materiais, até à integração de sistemas, passando pela disposição ordenada dos componentes, pelo que a sua integração é indispensável de forma a alcançar um nível de desempenho pré-determinado (Tabela 42) (Kesik, 2019).

Tabela 42 – Os fenómenos físicos e a sua relação com os materiais, componentes e sistemas.



Fonte: Kesik, (2019)

O conceito de *edifício-como-um-sistema* é relativamente recente na indústria da construção e deriva da moderna teoria dos sistemas e da aplicação dos princípios da ciência da construção ao comportamento e desempenho dos edifícios, e requer que os arquitetos e engenheiros, de forma explícita e consciente, considerem as interações entre os vários elementos primários que constituem o sistema, com vista à sua harmonização:

- Envolvente ou envelope (separação entre o ambiente interior e exterior);
- Ocupantes (humanos, animais e plantas);
- Instalações (elétricas e mecânicas);
- Local (paisagem e infraestruturas)
- Ambiente externo (clima) (Kesik, 2019)

Destes elementos, o que reconhecidamente merece mais atenção pelo papel que assume na obtenção de um edifício de alto desempenho é a envolvente (envelope), e que tem uma extrema importância no controlo passivo do ambiente, nomeadamente com a eficiência energética e a qualidade do ar interior (Kesik, 2019), temas intrinsecamente relacionados com a sustentabilidade e com o objeto deste trabalho.

Na abordagem sistémica, para além das naturais solicitações estruturais (sobrecarga, peso-próprio, vento, sismo, etc.), existem quatro mecanismos físicos primários associados com o comportamento do ambiente interior, em diferentes combinações e momentos ao longo do tempo: 1. Fluxo de calor; 2. Fluxo de ar; 3. Fluxo de humidade; 4. Radiação solar. Neste contexto, as investigações sobre o assunto consideram o controlo da humidade prioritário em relação às demais, a par das medidas de eficiência energética, as quais se encontram muito correlacionadas (Kesik, 2019).

O papel do projetista, de acordo com esta abordagem, é o de encontrar soluções que vão ao encontro dos parâmetros de desempenho (estéticos, segurança, sustentabilidade, economia, etc.), ainda durante a fase de conceção, de modo a atingir na prática os objetivos propostos de durabilidade, conforto, eficiência energética, qualidade do ar interior, saúde e segurança (Ilustração 182) (Kesik, 2019).

Sendo uma condição necessária, mas não suficiente para a arquitetura, a Ciência da Construção apresenta-se como um elemento importante a considerar, não só para projeto, mas também como forma de eliminar ou reduzir drasticamente os litígios entre partes nos projetos e obras, que se devem na sua maior parte à existência de anomalias ou à falta de cumprimento de parâmetros de desempenho dos elementos (Kesik, 2019), o que não é de todo despiciendo.

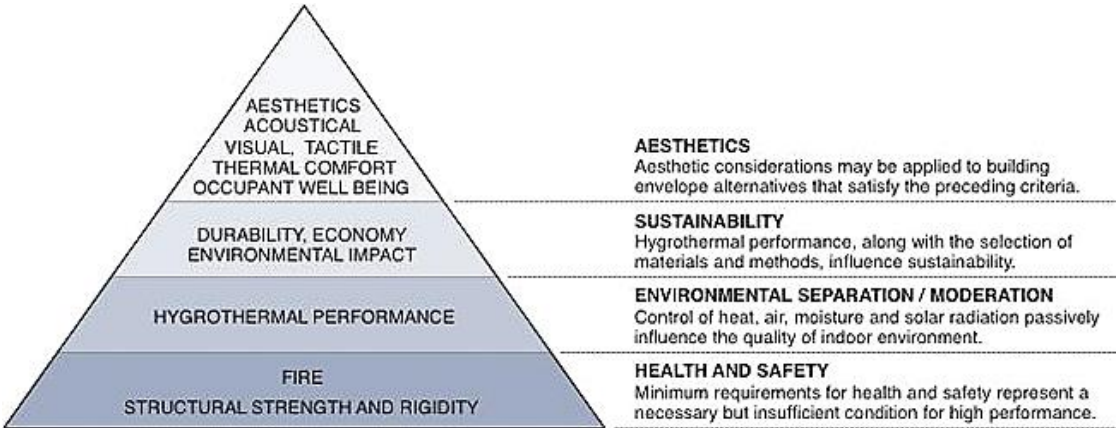


Ilustração 182 – Hierarquia de parâmetros de desempenho para envolventes de edifícios. (Kesik, 2019)

Tendo em conta a abordagem sistémica (*building as a system*) e o contributo de várias disciplinas científicas nesse sentido, Kesic (2019) define Ciência da Construção do seguinte modo:

> Building science is a field of knowledge that draws upon physics, chemistry, engineering, architecture, and the life sciences. Understanding the physical behavior of the building as a system and how this impacts energy efficiency, durability, comfort and indoor air quality is essential to innovating high-performance buildings. Modern building science attempts to work with models of the building as a system, and to apply empirical techniques to the effective solution of design problems (Kesik, 2019).

Considerando que, nesta perspetiva, premissa base de um projeto tem a ver com os objetivos de desempenho (o que aliás vai ao encontro dos diversos códigos e regulamentos de construção nacionais e internacionais), devidamente balizada pelos condicionamentos físicos e pelas exigências funcionais, é possível dotar os projetistas de um enquadramento com vista à obtenção de edifícios mais integrados, sustentáveis e circulares, aliando a arquitetura e o desempenho (Ilustração 183) (Kesik, 2019).

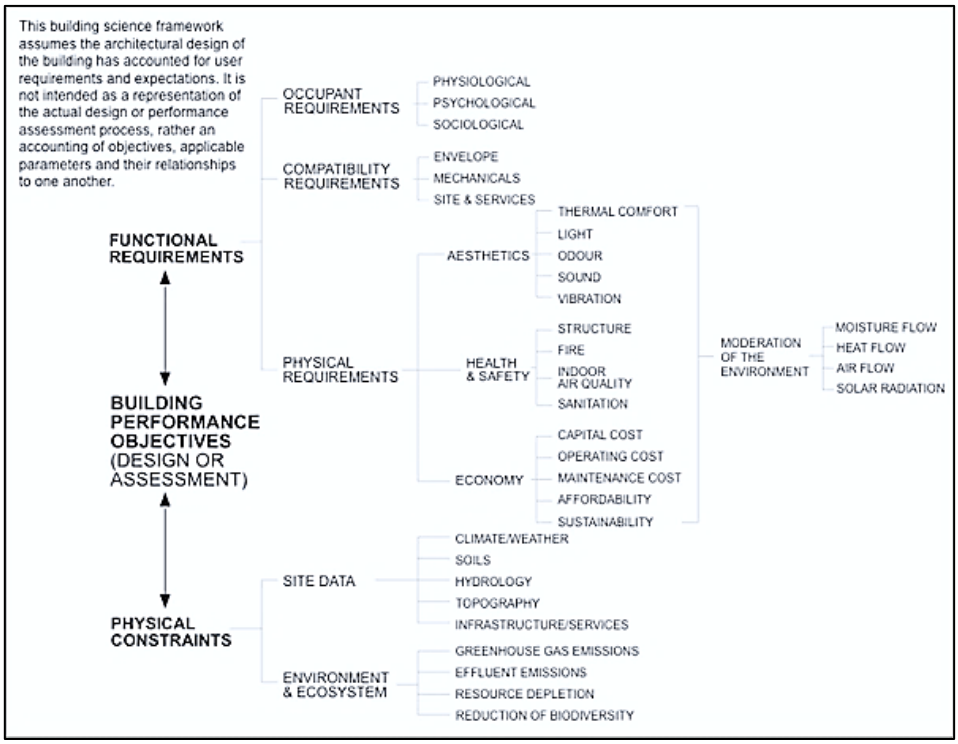


Ilustração 183 – Quadro de objetivos de desempenho em edifícios. (Kesik, 2019)

3.3.3. A DESCONSTRUÇÃO

No sentido de possibilitar e acelerar a transição para a economia circular no setor, o Plano de Ação para a Circularidade na Construção (PACCO), em linha com o macro objetivo 2 do Level (s) – Resource efficency and circular material life cycles – menciona três princípios específicos aplicáveis ao projeto circular de edifícios:: 1. Durabilidade; 2. Adaptabilidade e 3. Redução e gestão apropriada dos RCDs, nomeadamente pela via da desconstrução (Fonseca *et al.*, 2022, p. 51; European Commission, 2020, pp. 5, 6).

Contudo, tal só será possível através da maximização do potencial de reutilização dos materiais e componentes dos edifícios, por via da aplicação dos princípios do DfD, de forma a manter o valor económico desses ativos (em conformidade com os princípios da economia circular), contemplando o edifício como um todo, desde as alvenarias e demais componentes de fachadas, interiores e instalações, incluindo a estrutura.

Desse modo, é possível projetar para manter, reabilitar, adaptar e reutilizar, deixando a remanufactura, a reciclagem e a compostagem como opções de recurso, em contraste com a situação dominante atual, evitando ou minimizando, em simultâneo, os resíduos e o carbono envolvidos no processo (Ilustração 184) (Architects Climate Action Network, 2024, pp. 16, 17).

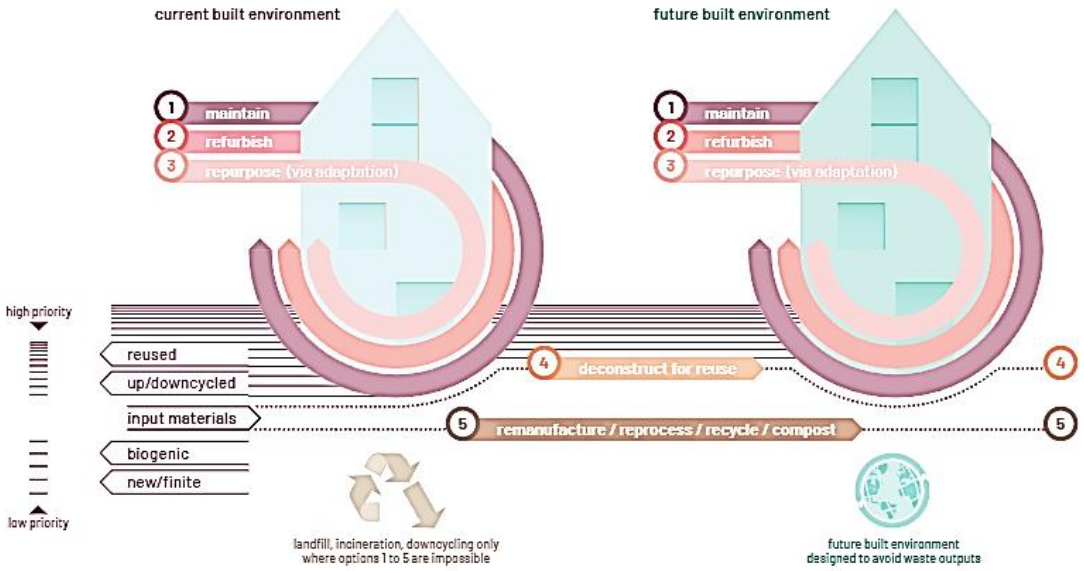


Ilustração 184 – O ambiente construído do futuro será projetado de modo a possibilitar a desconstrução e a reutilizar os seus componentes e materiais de modo eficaz e eficiente. (Architects Climate Action Network, 2024, p. 16)

3.3.3.1. PROJETAR PARA DESCONSTRUIR

O projeto circular de edifícios contempla, necessariamente, uma estratégia de adaptação e reversibilidade, dotando o edifício de flexibilidade perante os vários cenários ao longo do tempo, potenciando a transformação estrutural , espacial e material e permitindo a reutilização de materiais, sistemas e edifícios (Ilustração 185) (Architects Climate Action Network, 2024, p. 27).

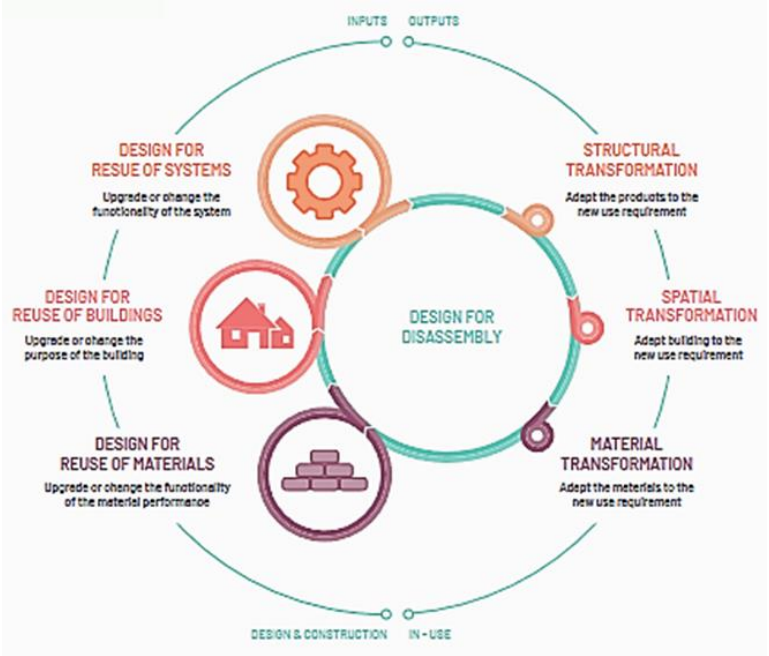


Ilustração 185 – Projetar para a desconstrução. (Architects Climate Action Network, 2024, p. 28)

Muito importante, e relacionado com o projeto e a construção em camadas, é o conceito de *permutabilidade* que exprime a independência entre as diversas camadas construtivas e a possibilidade de existirem ligações (*interface design*) eficientes entre elas, permitindo intervir, reabilitar ou desconstruir com o mínimo de impacto nas restantes (Architects Climate Action Network, 2024, p. 28):

> Traditional, linear building design is characterised by complex and closed hierarchy of building components, where the replacement of one component significantly impacts other building parts. In an optimised, circular built asset, the components are independent and exchangeable. Independency means that the assembly, transformation and disassembly of components within a building layer can be carried out without affecting others. Exchangeability means the systems and components can be disassembled without damaging surrounding parts of the structure and providing potential for their reuse. Independence and exchangeability depend on the physical relations between building layers and components (e.g. interface design). (Architects Climate Action Network, 2024, p. 29).

A existência de conexões físicas e reversíveis (ao invés de químicas e permanentes) é condição essencial para a independência e a permutabilidade das camadas e, por conseguinte, para o projeto e construção circulares (*Designing in layers*) . Deverão ser previstas ligações de encaixe ou aparafusadas (mecânicas), em detrimento das ligações químicas (onde dois componentes são ligados mediante um agente químico), visto tal inviabilizar ou dificultar a desconstrução, induzindo à demolição (*Design for disassembly*) (Tabela 43) (Architects Climate Action Network, 2024, pp. 32, 33).

Do mesmo modo, uma outra possibilidade é o agrupamento em camadas de acordo com a vida útil dos componentes, numa ótica de ciclo de vida: materiais e elementos com igual tempo expetável de vida devem ser agrupados com o objetivo de permitir a sua substituição e reabilitação, sem causar perturbação significativa nas camadas adjacentes (Tabela 43) (UK Green Building Council, 2019, p. 17; Architects Climate Action Network, 2024, p. 31).

Um edifício sustentável, proveniente de um projeto circular, não só é energeticamente eficiente, saudável, estético, durável e socialmente valorizado, mas também suscetível de ser facilmente desconstruído, total ou parcialmente, com o intuito de ser reutilizado ou de as suas partes e componentes fornecerem um banco de materiais, baseado em novos modelos de negócio, no âmbito da economia circular (UK Green Building Council, 2019, p. 51).

Tabela 43 – Tempo de vida útil de diferentes elementos e as diferentes camadas construtivas do edifício.

		Short life components		Long life components	
	Lifespan	0-5 years	5-10 years	20-30 years	30-300 years
	Example components	Internal finishes, furniture	Internal partitions, ceilings, floors, local services	Building services	Sub-structure, structure, floors, fabric
	Overall strategy	Match material to lifespan, design for disassembly and return to manufacturer	Design for reconfiguration, use modular systems	Design for maintenance, replaceability, remanufacture	Long life, loose fit Adaptable to different uses Temporary buildings designed to be relocatable
Principles and examples of application	Designing in layers	Ensure finishes allow access to services	Non-structural partitions	Services to be accessible and replaceable	Avoid interdependency of structural frame and facade
	Lean design	Inherent finishes	Exposed soffits Modular tea points	Design out systems	Lightweight structures
	Design out waste and use of reclaimed materials/ components	Remanufactured furniture; remanufactured paint	Reclaimed glass partitions	Modular systems, offsite manufacture to reduce site waste Challenge supply chain to provide remanufactured equipment	Offsite manufacture Standardised components Select grids that optimise material efficiency
	Partnership models and return to manufacturer	Lease components or arrange for return to manufacturer	Design interiors that can be reconfigured or disassembled	Leasing service arrangements for items such as lifts and lighting	Select elements that can be reused or returned to manufacturer
	Materials selection	Use biological materials that can be composted at end of life or certified products (e.g. C2C / Natureplus)	Use partitions made from bio -composites Use certified products (e.g. C2C / Natureplus)	Use plant and equipment that can be remanufactured Fabric ductwork	Structural elements with recycled content Certified facade systems
	Design for disassembly	Use furniture and fittings designed for disassembly	Dry-lay floor tiles Relocatable partitions	Equipment and distribution systems that are modular	Structure and facade that is designed with reversible mechanical fixings

Fonte: UK Green Building Council (2019, p. 20)

A possibilidade de reutilização e recuperação de partes e componentes (*salvage*) originada pela facilidade de desconstrução, implícita na conceção para a desconstrução e no modelo de camadas construtivas, assim como as características de flexibilidade, adaptabilidade e durabilidade e a redução dos impactes ambientais, próprias de um edifício circular, são geradoras de valor económico e ambiental e incentivam à inovação (Banihashemi *et al.*, 2024, p. 14; Thung *et al.*, 2023, p. 72), que deve ser devidamente refletido num sistema contabilístico normalizado adaptado à economia circular (Thung *et al.*, 2023, p. 72), algo que, no caso português, ainda falta implementar (Ilustração 186).

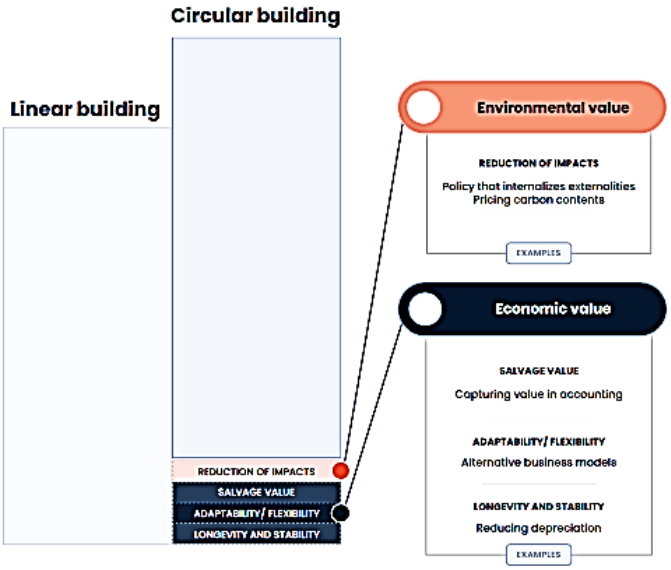


Ilustração 186 – Edifício circular capta mais valor económico e ambiental que o edifício linear. (Thung *et al.*, 2023, p. 73)

3.3.3.2. O EDIFÍCIO COMO UM BANCO DE MATERIAIS

O projeto orientado para a conceção por camadas e para a desconstrução está intrinsecamente relacionada com a temática dos passaportes de materiais, e esta, por sua vez, com a dos bancos de materiais, ambas já anteriormente abordadas.

A conceção de edifícios executada segundo os princípios da circularidade assegura, à partida, uma elevada capacidade de desconstrução, o que por sua vez potencia a existência de um mercado de materiais secundários, proveniente da relativamente fácil e exequível recuperação e reutilização das parte e componentes, o que justifica a existência de uma ferramenta digital – Passaporte de Materiais – que forneça informação técnica e ambiental detalhada e relevante (Thung *et al.*, 2023, p. 84; Copeland e Bilec, 2020, p. 145).

A estratégia circular de implementar projetos BAMB é uma das mais eficazes para desenvolver o mercado secundário e baseia-se essencialmente em criar e manter um *stock* de materiais, partes e componentes de edifícios sujeitos a desconstrução seletiva, potencialmente recuperáveis e reutilizáveis em novas construções (Copeland e Bilec, 2020, p. 143).

No documento **Relatório do estado atual da Circularidade no setor da Construção em Portugal**, Fonseca *et al.*(2022) chamam a atenção para a importância de considerar o edificado português como um BAMB, e priorizar a reutilização em lugar da reciclagem de RCDs:

> Portugal tem desde 2008 uma legislação robusta para a correta gestão dos RCD. No entanto, a quantidade de RCD reciclados é ainda reduzida e é necessário aumentar a circularidade do setor. Há um enorme potencial de reciclagem dos RCD e alguns países têm dado uma atenção especial e crescente para a reutilização de elementos/componentes provenientes da renovação e da desconstrução de edifícios, considerando o parque edificado como um stock de materiais (*buildings as materials banks*). A reutilização de elementos, a reciclagem ou recuperação de materiais são maximizadas se existir uma auditoria detalhada de pré-demolição sendo privilegiadas a demolição seletiva, a separação dos resíduos e a sua descontaminação. (Fonseca *et al.*, 2022, p. 49).

Como já referido anteriormente, o projeto europeu BAMB – e, portanto, aplicável a Portugal – refere-se a um PM com informação respeitante à recuperação e reutilização dos materiais e produtos, salubridade e respetivos fabricantes dentro do espaço comunitário.(Nuo Zhang, Qi Han e de Vries, 2021, p. 9).

Contudo, outros tipos de passaportes têm sido desenvolvidos com fins específicos, (p.e., para a aplicação do BIM com vista à otimização de projeto), ou ainda de novos formatos mais completos, tendo em conta um modelo baseado na circularidade do fluxo de materiais, como é o caso do Building Circular Material Passaport (BC MP) (Ilustração 187) (Nuo Zhang, Qi Han e Vries, de, 2021, p. 10).

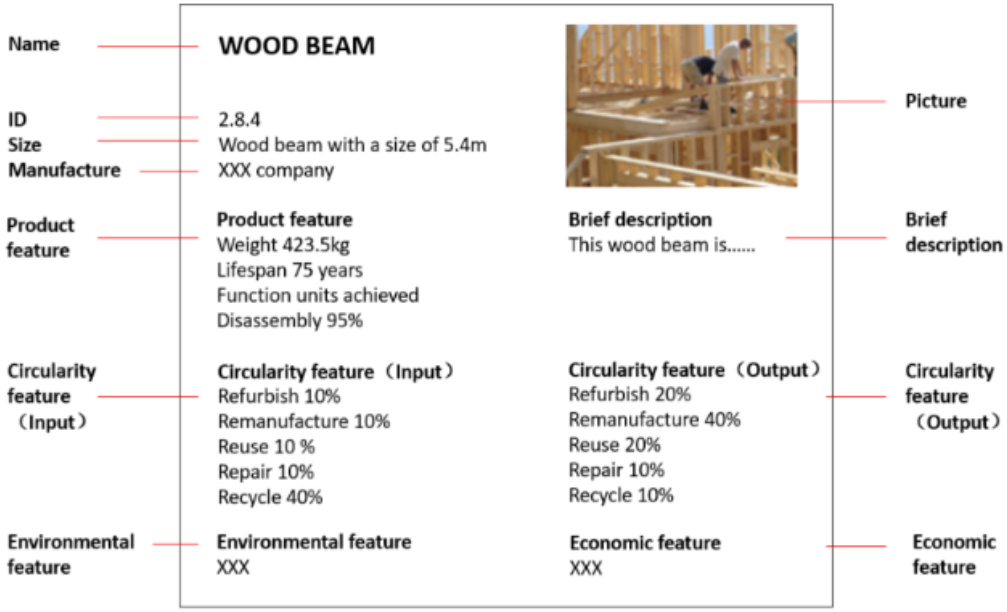


Ilustração 187 – Exemplo da nova versão do Passaporte de Materiais BC MP (Nuo Zhang, Qi Han e de Vries,2021, p. 11)

Esta nova proposta de passaporte, aplica-se tanto a materiais como a componentes e consta de cinco partes. 1. Informação básica; 2. Características do produto; 3. Características de circularidade; 4. Características ambientais; 5. Características

económicas e baseia-se num novo modelo de fluxo de materiais com o objetivo de representar o conceito de *Building Circularity* (BC) ou fluxo de circularidade no setor AEC (Nuo Zhang, Qi Han e de Vries, 2021, pp. 5, 11).

O fluxo de circularidade (BC) é definido a partir dos aspetos ambientais, económicos, sociais e tecnológicos envolvidos, representados pelos ciclos biológico, económico, técnico e social (Ilustração 188). De salientar a importância da metodologia LCA na determinação da circularidade do ciclo biológico e do Custo do Ciclo de Vida (CCV) ou Life Cycle Cost (LCC) no cálculo da circularidade do ciclo económico (Nuo Zhang, Qi Han e Vries, de, 2021, p. 5).

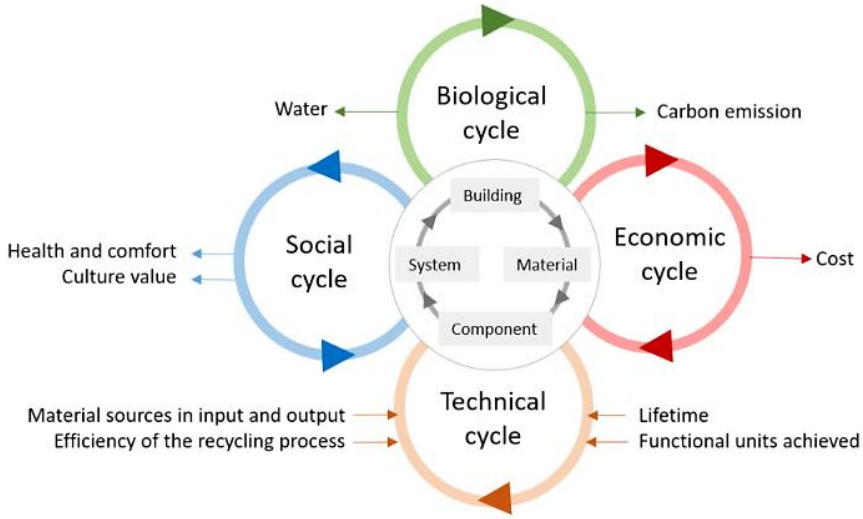


Ilustração 188 – Os ciclos circulares presentes no conceito BC. (Nuo Zhang, Qi Han e Vries, 2021, p. 6)

A questão da existência de um banco de materiais, assim como dos passaportes de materiais, só é possível através de um ambiente digital potenciado pelo BIM e pela implementação do conceito de construção reversível ou desconstrução, baseada na prefabricação e no conceito de camadas, que tornam possível a reutilização de materiais, partes e componentes dos edifícios (Copeland e Bilec, 2020, p. 144).

A conjugação do BIM com a prefabricação permitirá, não só a eficaz comunicação entre todos os intervenientes no processo, nomeadamente os arquitetos, mas também a existência de modelos virtuais (gémeos digitais) alimentados a partir dos elementos físicos pela tecnologia RFID (Radio-Frequency Identification), previamente incorporada nos elementos prefabricados (*chips*), permitindo uma efetiva gestão dos materiais (Banihashemi *et al.*, 2024, p. 9; Santiago, 2025, p. 83).

Também a tecnologia Blockchain pode ser usada nos projetos BAMB, assegurando de forma eficaz e fidedigna o registo das transações decorrentes da procura e da oferta, bem como o armazenamento de toda a informação proveniente do dispositivos RFID, permitindo o seu rastreio ao longo do ciclo de vida do material (Copeland e Bilec, 2020, p. 145).

Este aspeto é de extrema importância, tendo em conta o princípio da construção em camadas, pois a correta e exata identificação dos componentes com igual tempo de vida útil permitirá a sua reutilização, reparação ou substituição, a partir da informação enviada pelos sensores RFID e do inventário BIM, desde que o sistema construtivo tenha sido concebido com a desconstrução (DfD) e a reutilização como finalidade (Banihashemi *et al.*, 2024, p. 10).

A fase de conceção é essencial para a incorporação deste princípios, sendo que as ferramentas digitais são indispensáveis para os projetistas, de modo a estarem capacitados para criarem e desenvolverem construções mais circulares e sustentáveis, ao mesmo tempo otimizadas em termos de custos e de prazos (Banihashemi *et al.*, 2024, pp. 12, 14).

O PACCO realça e contempla a importância da digitalização para a circularidade do setor em Portugal, através das medidas e linhas de atuação do pilar tecnológico, como as plataformas e as ferramentas digitais (Fonseca *et al.*, 2022, p. 52), nomeadamente a ação 12.4: Proposta de desenvolvimento de plataforma de apoio ao projeto e verificação de qualidade, circularidade e sustentabilidade integrando passaportes digitais e modelos BIM (Fonseca *et al.*, 2022, p. 56).

No entanto, os autores chamam a atenção para os vários bloqueios existentes neste domínio, em Portugal, e que devido à sua importância, transcrevemos:

> No âmbito tecnológico surgem outros bloqueios como por exemplo a falta de plataformas de partilha de dados, o ineficiente tratamento destes e a sua limitada disponibilização. Por não existirem plataformas de colaboração implementadas, há falta de informação sobre oferta e procura de materiais reciclados (dificultando as ações de construção numa economia circular), informação geográfica sobre o stock de materiais (decorrente das ações de desconstrução e de demolição) dificultando o acesso aos materiais quando necessário, impactando o custo e o tempo da construção. A inexistência de plataformas de disponibilização de materiais que poderiam resultar do cruzamento entre as auditorias de pré-desconstrução ou demolição, com a quantificação e tipificação de materiais e a sua disponibilização a outras empresas para utilização nas operações de construção ou reabilitação. Este é um bloqueio significativo e em que poderá ser ultrapassado através

> do (correto) uso da tecnologia (por ex. através do uso adequado de metodologias BIM e integração com ferramentas SIG). […] Uma parte significativa dos bloqueios «Tecnológicos» deve-se à falta de desenvolvimento de novas técnicas, equipamentos e metodologias para a triagem dos materiais, bem como para a realização de desconstruções/demolições seletivas, que mantenham a integridade dos materiais e produtos para reaplicação. O desenvolvimento de novas tecnologias poderá vir a ser essencial para ultrapassar alguns destes bloqueios tecnológicos (por ex.: utilização de tecnologia *blockchain* promovendo a transparência e a rastreabilidade. (Fonseca *et al.*, 2022, pp. 61, 62).

Neste contexto, pode-se dizer que novas competências e capacitação relacionadas com as tecnologias de informação, a gestão de dados e a utilização e integração de tecnologias irão emergir , levando à necessidade da criação de novas profissões, ou ao alargamento do âmbito das existentes, como é o caso de *Digital Architect* ou *Material Scientist*, entre outras (Tabela 44) (Peters *et al.*, 2017, pp. 25, 26).

Tabela 44 – Passaportes de materiais como instrumento dos projetistas (*Design & Build Team*) para a criação de bancos de materiais.

	Owners & Planners	Design & Build Team	Suppliers & Manufacturers	Recovery Specialists	Governments & Cities
Roles included	Developers, investors, advisors, financers, building and product owners	(Digital) Architects, designers, engineers, contractors, builders, material scientists	Supplier of new and/ or reused/ remanufactured products, components and materials	Urban Miners, specialized deconstruction companies/ planners, demolition companies, recyclers / refiners, waste management companies	Cities, municipalities, Country/ regional/ local government, city planners, regulatory bodies
Common needs	Building regulation compliance (incl. energy, circular targets, etc.) Product and material regulatory compliance (health, liability) Digital building profile Building Transformation Capacity profile Digital product and material profile (i.e. building or material passport, and includes condition or product journey data) Residual value and reuse options of building and product portfolio	Building regulation compliance (incl. energy, circular targets, etc.) Building Transformation Capacity profile Product and material regulatory compliance (health, liability) Digital product and material profile (i.e. building or material passport, and includes condition or product journey data) Available supply of building, products, components and materials	Product and material regulatory compliance (health, liability) Digital product and material profile (i.e. building or material passport, and includes condition or product journey data) Available supply of building, products, components and materials Residual value and reuse options of product portfolio	Product and material regulatory compliance (health, liability) Digital product and material profile (i.e. building or material passport, and includes condition or product journey data) Available supply of building, products, components and materials Reuse options of product portfolio	Building regulation compliance (incl. energy, circular targets, etc.) Product and material regulatory compliance (health, liability) Digital building profile of cities Building Transformation Capacity profile of cities Available supply of building, products, components and materials to understand (future)resource constraints

Fonte: [Adaptado a partir de:] Peters *et al.* (2017, pp. 36, 37)

Contudo, e como se pode depreender, a efetiva concretização do conceito de construções e edifícios como banco de materiais, e de um respetivo mercado secundário, só se tornará possível mediante a implementação de novos modelos de

negócio, inovadores e circulares no setor da construção, em oposição aos atuais modelos lineares (Fonseca *et al.*, 2022, pp. 76, 77).

3.3.3.3. NOVOS MODELOS DE NEGÓCIO E SIMBIOSES INDUSTRIAIS

A aplicação de um sistema de economia circular exige a conceção e a implementação de modelos de negócio que utilizem o mínimo de recursos naturais, durante o maior tempo e valor possíveis, desenvolvendo uma cadeia de valor baseada na eficiência de custos, na eficácia produtiva e no desempenho empresarial (Geissdoerfer *et al.*, 2020, p. 2).

Geissdoerfer *et al.* (2020) referem que, devido à importância do tema, este tem merecido atenção no sentido de uma conceptualização clara e do seu papel na economia e na gestão das empresas (Geissdoerfer *et al.*, 2020, p. 2), definindo modelos de negócio circulares como :

> […] business models that are cycling, extending, intensifying, and/or dematerialising material and energy loops to reduce the resource inputs into and the waste and emission leakage out of an organisational system. This comprises recycling measures (cycling), use phase extensions (extending), a more intense use phase (intensifying), and the substitution of products by service and software solutions (dematerialising). (Geissdoerfer *et al.*, 2020, p. 7).

A importância da adoção por parte do setor da construção de modelos de negócio circulares ou Circular Business Models (CBM) (Carra e Magdani, 2017, p. 2), está também contemplada no PACCO, no âmbito das medidas do pilar de mercado, com vista a desenvolver medidas de apoio à transição para negócios baseados em modelos de serviços (servitização da economia) em lugar do produto (Fonseca *et al.*, 2022, p. 58).

Tais modelos circulares incluem novas abordagens relacionadas com a logística reversa, a extensão da vida útil, plataformas de partilha, produto-como-um-serviço, entre outras (Fonseca *et al.*, 2022, p. 76; Carra e Magdani, 2017, pp. 21, 22), baseadas na fase do ciclo de vida do edifício em que o negócio se foca: 1. Conceção circular ; 2. Utilização circular; 3. Recuperação circular (Carra e Magdani, 2017, pp. 24, 25, 26):

- A conceção circular respeita à fase de projeto (desenvolvimento e planeamento), e tem a ver com e com o desenvolvimento de novos sistemas, produtos e

materiais, nomeadamente renováveis, com vista a desenvolver a capacidade de reutilização e de reciclabilidade dos edifícios (Carra e Magdani, 2017, p. 24);

- A utilização circular tem a ver com a fase operacional e foca-se na servitização (p.e., *leasing* e partilha), orientada para o modelo *produto-como-um serviço*, para a extensão da vida útil dos produtos, partes e componentes e para o mercado secundário de materiais (Carra e Magdani, 2017, p. 25);

- A recuperação circular incide na fase final do ciclo de vida dos produtos e na existência de uma plataforma de logística reversa, com a intenção de recuperar e valorizar os produtos, possibilitando a sua transformação noutros de valor acrescentado, reduzindo o fluxo de resíduos a vazadouro e custos associados (Carra e Magdani, 2017, p. 26).

Seguindo um padrão semelhante, Jonker, Faber e Haaker (2022) definiram sete grupos de modelos CBM (Ilustração 189): 1. Recursos; 2. Conceção ; 3. Extensão da vida útil ; 4. Partilha; 5. Produto-como-um-serviço; 6. Fim de vida; 7. Ciclo de vida (Jonker, Faber e Haaker, 2022, p. 16).

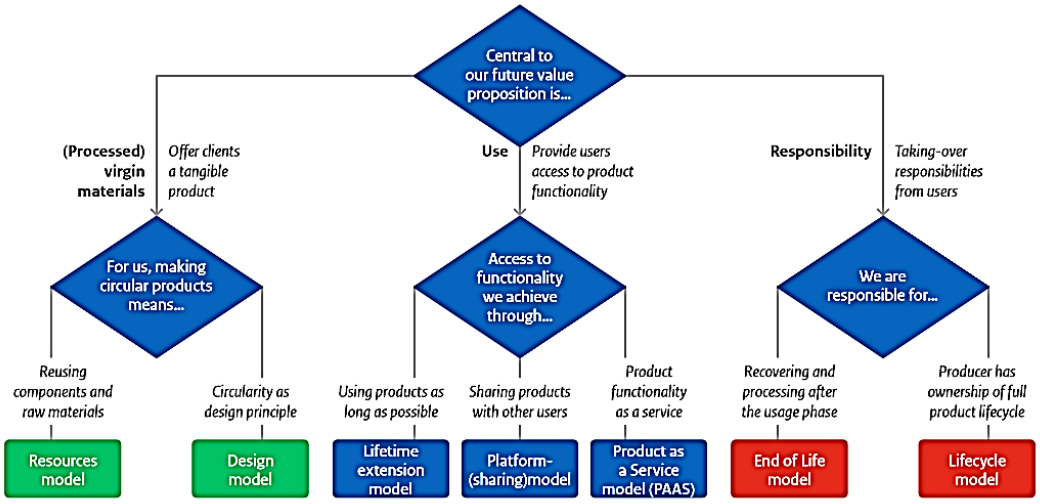


Ilustração 189 – Fluxograma de modelos de negócio circulares em função de três fases do ciclo de vida: conceção, operacional e fim de vida. (Jonker, Faber e Haaker, 2022, p. 26)

No contexto da desconstrução, para além dos modelos baseados na conceção circular, assume especial destaque o modelo de utilização circular *produto-como-um-serviço* ou Product-as-a-Service (Paas), que permite ao utilizador ter acesso à funcionalidade do produto mantendo o fornecedor como proprietário mediante uma subscrição, com vista

à sua desmaterialização (Jonker, Faber e Haaker, 2022, p. 20; Thung *et al.*, 2023, p. 86).

Este modelo diferencia-se de outros (p.e. *leasing*) pelo facto de, além do pagamento da subscrição pelo utilizador, também a manutenção e os custos operacionais serem geridos pelo fornecedor do serviço, o que incentiva e facilita a ligação aos modelos de recuperação, nomeadamente o de ciclo-de-vida, fechando o *loop* (Thung *et al.*, 2023, p. 94*;* Jonker, Faber e Haaker, 2022, pp. 22, 24).

Existem várias oportunidades de aplicação do modelo PaaS no setor AEC. A interseção do modelo da construção em camadas, com as características do modelo, leva à identificação das mais propensas à sua aplicação (Tabela 45).

Tabela 45 – Adequação do modelo PaaS às diferentes camadas construtivas.

		Longevity and Stability	**Outcome Focused**	**Operational Performance**	**Material Recovery**
		Lifespan with reasonable investment period (30-50 Yrs) High volume-to-value ratio	Ability to monitor direct impact of performance High rate of obsolescence	Use phase consumes resources (energy, water, materials) Requires regular maintenance and repair	Potential residual value Does not compromise functional completeness
Stuff	M-H	Medium	High	Mid-High	Mid-High
Space Plan	M	Mid-High	Mid-High	Low	Medium
Services	H	High	High	High	High
Structure	M	Mid-High	Low	Medium	Mid-High
Skin	M-H	High	Low-Medium	Mid-High	Mid-High
Site	L	Low	Low	Low	Low

Fonte: Thung *et al.* (2023, p. 96)

Desse modo, identificou-se que a camada com mais potencial é a *Services* (instalações elétricas e mecânicas) das qual é o exemplo o Light-as-a-Service (LaaS), mas também *Skin* (envelope) com o caso Facade-as-a-Service (FaaS) e *Stuff* (mobiliário) (Thung *et al.*, 2023, pp. 96, 97).

Finalmente, a recuperação circular tem duas abordagens: a de fim-de-vida, com a implementação da responsabilidade alargada do produtor, derivada da legislação europeia e onde o produtor assume a responsabilidade pelos produtos após a utilização

e deposição dos mesmos, e a de ciclo-de-vida, onde o produtor mantem a propriedade do produto (componentes e materiais usados) até ao final do ciclo, levando a servitização ao máximo e onde se encaixa o modelo PaaS (Jonker, Faber e Haaker, 2022, pp. 20–22).

No contexto de um modelo de negócio de recuperação baseado no fim-de vida e na responsabilidade alargada do produtor, faz sentido falar de logística reversa com o objetivo de coletar os resíduo*s* e de os valorizar, através da reutilização, reciclagem ou utilização como matéria-prima para outras indústrias.

É o caso do modelo de negócio conhecido como Simbiose Industrial (SI) onde "[…] os resíduos de uma entidade poderão ser utilizados por outra como matérias-primas, reduzindo-se a extração de recursos naturais." (Silva, 2024), e que constitui uma ferramenta estratégica para a implementação da economia circular (Planelles Aragó *et al.*, 2021, p. 25).

Nas simbioses industriais estabelece-se uma rede entre empresas ou entidades geograficamente próximas (Zargar *et al.*, 2022, p. 357), com interações sinergéticas de materiais, energia e resíduos, recuperando o valor dos subprodutos e trazendo benefícios económicos e sociais (Yifei Yu *et al.*, 2021, p. 2; Zargar *et al.*, 2022, p. 357) (Henriques *et al.*, 2021, p. 1):

> Industrial Symbiosis (IS) is commonly associated to Industrial Ecology (IE) and constitutes a strategy to promote circular economy, as it replicates or mimics nature in an industrial environment or industrial ecosystem. This business model recreates an ecosystem where the elements or industrial actors actively share resources and wastes. One of the most accepted definitions establishes IS as the use by one company or sector of underutilised resources broadly defined (waste, by-products, residues, energy, water, logistics, capacity, expertise, equipment, and materials) from another, with the result of keeping resources in productive use for longer. The firms involved in these kinds of synergies through these exchanges achieve economic, environmental and social benefits. In practice, the companies may benefit from reduced operational costs, reduced taxes, job creation and reduced emissions of CO2. (Henriques *et al.*, 2021, p. 1).

O primeiro e mais conhecido caso de sucesso de SI é o do parque eco-industrial de Kalundborg, na Dinamarca, existente desde 1973. Atualmente encontra-se a funcionar num sistema entre dezasseis empresas e a autarquia, aproveitando as sinergias do fluxo de materiais resultante da atividade industrial (Yifei Yu *et al.*, 2021, p. 2; Henriques *et al.*, 2021, p. 1), e fornecendo energia para a cidade, sob a forma de calor e vapor , como

produto do seu metabolismo (Ilustração 208) (Silva, 2024; Kalundborg Symbiosis, 2024).

Um Parque Eco-Industrial (PEI) é um local com infraestruturas comuns, onde as empresas cooperam entre si com a finalidade primária de reduzirem os resíduos e a poluição através de trocas simbióticas, e simultaneamente de alcançarem uma redução os custos e de implementação de processos de produção mais sustentáveis (Henriques *et al.*, 2021, p. 3; Zargar *et al.*, 2022, p. 357).

De notar que as sinergias existem a vários níveis, tanto geograficamente (na mesma zona, como num parque industrial, ou entre empresas em diferentes regiões), como entre setores (intra ou intersetorial), que ao nível operacional podem ser classificadas genericamente como de substituição, mutualidade e génese (Ilustração 190) (Planelles Aragó *et al.*, 2021, pp. 25, 26).



Ilustração 190 – Tipos de sinergias operacionais no âmbito da SI (Planelles Aragó *et al.*, 2021, p. 26)

As sinergias de substituição são aquelas mais facilmente identificáveis no quadro da economia circular e trata-se da utilização por parte de uma empresa, de um fluxo de materiais (resíduos) proveniente de uma outra, ou seja, de matérias-primas secundárias.

Contudo, as sinergias de mutualidade ou de partilha de serviços (públicos e privados) e de infraestruturas, entre outros, é um também um aspeto igualmente importante e caracterizador da SI. Finalmente, as sinergias de génese respeitam ao desenvolvimento de conhecimento para o desenvolvimento e gestão de novos produtos, serviços e mercados (Planelles Aragó *et al.*, 2021, p. 26).

Uma outra vertente, a nível macro é a Simbiose Urbana Industrial (SUI), descrita como uma rede sinergética entre agentes comunitários e industriais, nomeadamente o fornecimento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs) às empresas, como matéria-prima (Henriques *et al.*, 2021, p. 3), o que se enquadra no modelo de cidades circulares.

Em Portugal, o primeiro exemplo de um PEI foi o do Relvão, na Chamusca, não sendo do conhecimento do autor nenhum caso aplicado especificamente ao setor da construção. No entanto, em relação aos parques existentes e em funcionamento, alguns subprodutos são utilizados como combustível na indústria cimenteira, ou em outras aplicações da indústria da construção (Silva, 2024; Plataforma Florestas.pt, 2023).

> Em Portugal, há vários exemplos de simbioses industriais. É o caso em funcionamento no Eco Parque do Relvão, na Chamusca, onde baterias, óleo, lamas e outros subprodutos de metal, papel e cartão são trocados para reaproveitamento entre empresas diferentes. Outro exemplo é a simbiose industrial entre a Lisnave, a Secil e a SEIA – Sociedade de Engenharia e Inovação Ambiental – para a reutilização de granalha de aço da Lisnave pela Secil. Outro ainda é o da *The Navigator Company* que tem parcerias de colaboração para a circularidade e gestão de resíduos com a empresa SMI – *Specialty Minerals Inc* e com a Secil Britas e a *Saint-Gobain*, em Aveiro. No primeiro caso, o Complexo Industrial da Figueira da Foz recebe o excedente de lamas de carbonato de cálcio (subproduto do processo de produção de pasta de papel) e produz carbonato de cálcio precipitado, um aditivo que é depois usado na produção de papel de impressão e escrita (UWF); e no segundo caso, as areias das caldeiras de biomassa da produção de pasta (pasta para papel) são integradas em matérias de construção (como argamassa), evitando a utilização de areias de origem natural.(Plataforma Florestas.pt, 2023).

Como exemplo a seguir, é de realçar que a indústria cerâmica espanhola desenvolveu, no *cluster* de Castellón, vários projetos de simbiose do tipo intrasectorial, intersetorial e urbana industrial, neste caso, mediante o fornecimento à indústria de águas residuais urbanas provenientes das estações de tratamento, em vez de água potável proveniente de aquíferos ou da rede (Ilustração 191) (Planelles Aragó *et al.*, 2021, pp. 28, 29).

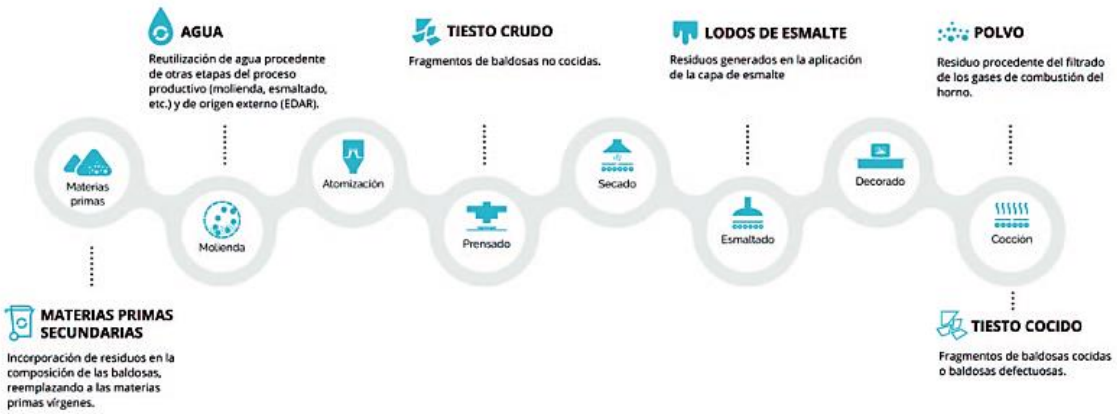


Ilustração 191 – Processo de fabrico de elementos cerâmicos a partir de matérias-primas secundárias e de água residual tratada. (Planelles Aragó *et al.*, 2021, p. 28)

Este exemplo é motivador para que, em Portugal, e no contexto de uma transição para a construção circular, se lancem e desenvolvam unidades de simbioses industriais, tendo em conta os vários *clusters* existentes, como é o caso das importantes indústrias da cerâmica e da pedra, entre outras.

4. CASOS DE ESTUDO

4.1. Metodologia

Em todas as latitudes começam a fazerem-se sentir os efeitos de um massivo corpo teórico, que aponta no sentido de uma transição do setor para uma prática mais sustentável, tal como descrito ao longo deste trabalho.

O autor apresenta três exemplos ilustrativos (estudo de casos) orientados para a identificação dos princípios de circularidade relacionados com as camadas construtivas tidas como mais relevantes (estrutura e envelope), a par da eventual existência de modelos de negócio circulares (PaaS) e de certificações de sustentabilidade ou de circularidade.

Os casos para estudo foram os seguintes: 1. Redbridge School (Campo de Ourique, Lisboa); 2. MUDA Reserve (Aldeia da Muda, Comporta); 3. Rocket & Tigerli (Winterthur, Zurique).

Dois dos casos já foram executados (Caso 1), ou ainda em fase de construção (Caso 2), em Portugal, enquanto o terceiro se trata de um projeto a decorrer num país da Europa Central (Suíça), por se considerar relevante a nível internacional.

No âmbito da metodologia proposta, recorreu-se complementarmente a entrevistas não-estruturadas com especialistas técnicos no Caso 1 e no Caso 2 e à análise de informação escrita sobre os projetos ou os empreendimentos (Ilustração 192). No Caso 3 não foi possível realizar a entrevista pelo facto de ausência de resposta à solicitação, pelo que se fez unicamente análise documental.

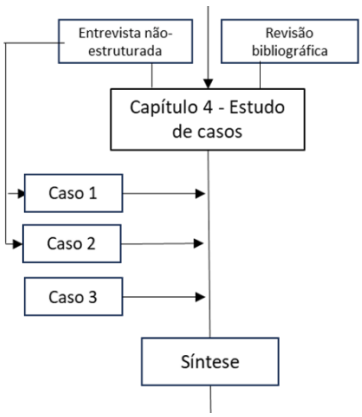


Ilustração 192 – Pormenor da estrutura conceptual da tese referente ao capítulo 4. (Ilustração nossa, 2025)

No Caso 1 (Redbridge School), o interlocutor foi o gabinete ARX Portugal Arquitectos, na qualidade de entidade projetista de arquitetura, na pessoa da Arquiteta Ana Sofia Amador, que aceitou o convite para ser entrevistada e disponibilizou material fotográfico por via eletrónica. A entrevista foi realizada por via telefónica, tendo decorrido em setembro de 2024.

No Caso 2 (MUDA Resort), foram efetuadas três entrevistas, em julho e agosto de 2024, duas presenciais e a terceira por via telefónica. As presenciais decorreram na sede da Vanguardeagle, em Lisboa, e tiveram como interlocutores o Professor Doutor Manuel Collares-Pereira (Consultor Científico) e o engenheiro Pedro Leal Aguardela (Diretor de Projeto), que além dos esclarecimentos técnicos, forneceram também material impresso e digital.

O engenheiro Paulo Lajes (Administrador), da Projectus C2F, empresa responsável pelo projeto de engenharia, foi entrevistado por via telefónica, respondendo a questões relacionadas com o sistema construtivo utilizado.

No Caso 3, e apesar da insistência junto do gabinete de arquitetura (SHL – Schmidt Hammer Lassen Architects, Copenhaga), através de pedidos de reunião física ou remota, solicitados por correio eletrónico, não obtivemos retorno em tempo útil, pelo que a análise foi exclusivamente efetuada a partir da informação disponibilizada no sítio da internet do gabinete e do promotor (Implenia AG).

As respostas às entrevistas e a análise do material consultado permitiram obter dados relativos a aspetos de sustentabilidade e de circularidade, concretamente respeitantes aos materiais e técnicas utilizados, para além de informações quanto aos intervenientes e respetivas competências, no âmbito das respetivas empreitadas. Para este objetivo específico, a revisão bibliográfica e a respetiva análise temática incidiram sobre brochuras e *websites* das empresas associadas a cada um dos casos.

Embora diferentes em tipologia, função e objetivos, os três casos têm um fator em comum que a investigação confirmou, para além da qualidade dos arquitetos: o papel fundamental do promotor na adoção de soluções mais sustentáveis como fator de valorização do edificado.

Através do processo de análise seguidamente descrito, pretende-se identificar, de modo simplificado, um eventual padrão de circularidade, aplicando a seguinte estrutura

conceptual ao desenvolvimento do capítulo 4 (Ilustração 193), com vista a obter resultados.

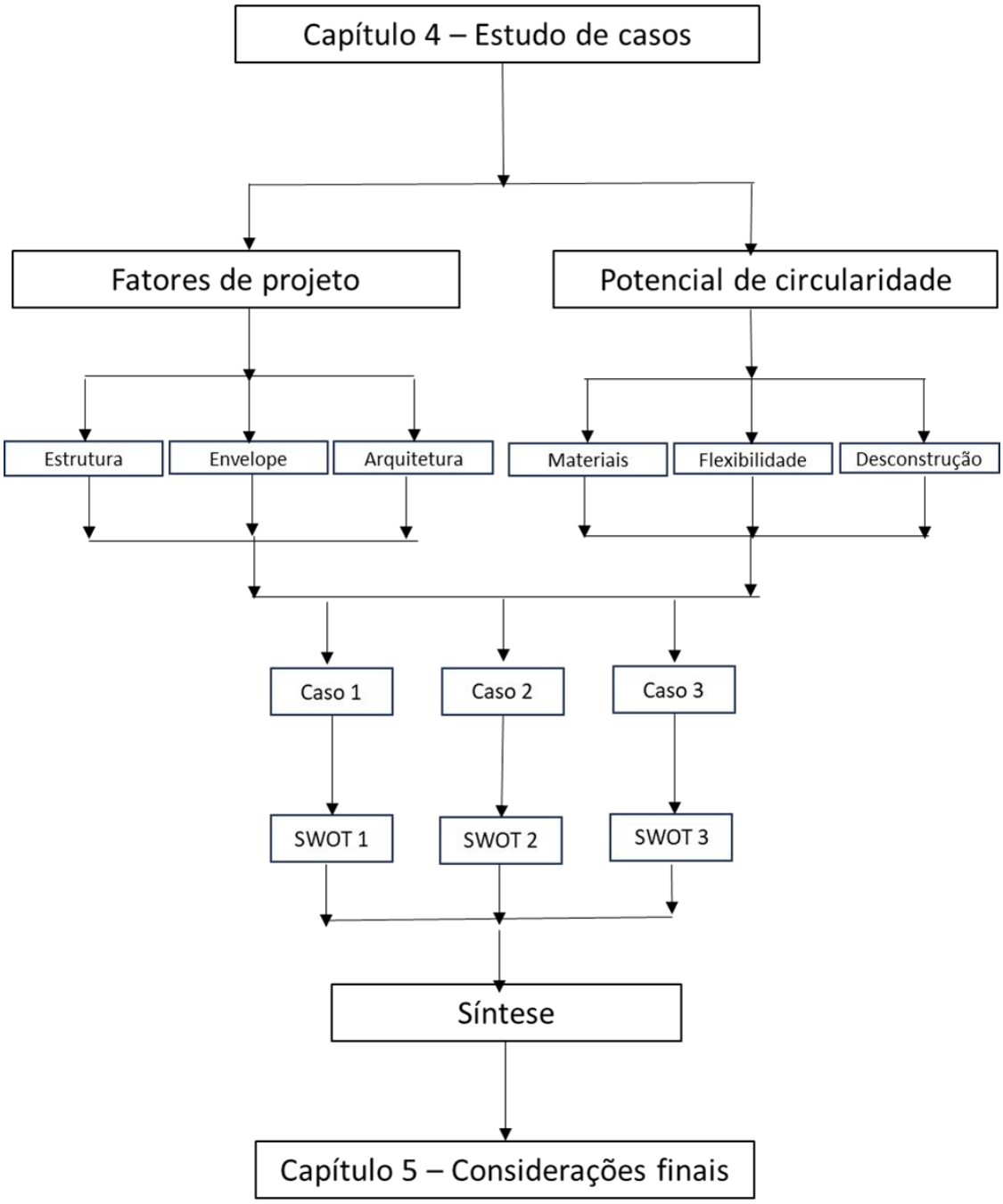


Ilustração 193 – Estrutura conceptual do capítulo 4. (Ilustração nossa, 2025)

Para esse efeito, partimos do princípio de que existem elementos ou fatores intrínsecos ao projeto que têm, em termos gerais, mais impacto que outros. Pela sua relevância, e como já anteriormente referido, o modo como a estrutura e o envelope são concebidos e materializados assume uma especial importância nos aspetos sociais, económicos e

ambientais de um edifício, concomitantemente com a determinística qualidade do projeto de arquitetura.

Tendo em conta o acima descrito, escolhemos três elementos ou Fatores de Projeto, comuns a todos os edifícios, como objeto de referência sobre o eventual potencial de circularidade existente: “estrutura – envelope – arquitetura”.

De modo a poder construir uma matriz do Grau de Circularidade, consideraram-se três aspetos essenciais que afetam direta e profundamente a circularidade de um edifício: os materiais com que é construído; a maior ou menor flexibilidade ou adaptabilidade dos espaços interiores e do envelope; a facilidade de execução do processo de desconstrução seletiva.

A tríade “materiais – flexibilidade – desconstrução” influencia de modo irreversível o Potencial de Circularidade na prática, e está diretamente relacionada com as decisões e opções a tomar por promotores e projetistas na fase de conceção.

Este modelo de análise 2D será aplicado a cada um dos três casos, nas suas várias combinações, de modo a levar a cabo uma análise SWOT simplificada (*streamline*), onde também foi considerada a eventual e voluntária existência de ferramentas e processos como ACV, DAPs, pegada de carbono, projeto de desconstrução ou passaporte de materiais.

Uma nota para este último assunto, pois a situação tenderá a alterar-se face às mais recentes orientações emanadas da Comissão Europeia, nomeadamente a nova EPBD (2024), que aponta para a efetiva descarbonização do parque edificado, comprovado através do cálculo do carbono incorporado, e que tem implicações diretas na escolha dos materiais estruturais e de revestimento.

Os resultados dos três casos são apresentados sob a forma clássica de matriz SWOT, de modo a facilitar a sua apreensão e entendimento, com a listagem sumária das Forças/Fraquezas e das Oportunidades/Ameaças, a partir das quais será feita uma síntese, a qual irá contribuir para o Capítulo 5 – Considerações finais.

O autor procurou ir ao encontro de modelos atuais e paradigmáticos, que tenham tido ou venham ter impacto técnico significativo, e que à data possam ser efetivamente reconhecidos como exemplos de uma transição para a sustentabilidade e a circularidade na construção.

Os casos para estudo são seguidamente apresentados por esta ordem: 1. Redbridge School (Campo de Ourique, Lisboa); 2. MUDA Reserve (Aldeia da Muda, Comporta); 3. Rocket & Tigerli (Winterthur, Zurique).

4.2. ESTUDO DE CASOS

4.2.1. CASO 1 – REDBRIDGE INTERNATIONAL SCHOOL (LISBOA, PORTUGAL)



Ilustração 194 – Alçado do Edifício Norte. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)

O complexo escolar Redbridge School, localizado em Campo de Ourique (Lisboa), e projetado pelo gabinete ARX Portugal Arquitectos, é constituído por dois edifícios, dos quais o Edifício Norte (Ilustração 194), chegou a ser o mais alto do país construído em estrutura de madeira engenheirada.

O sistema estrutural, calculado para o efeito, é constituído na sua maior parte por pilares, vigas e estrutura secundária em madeira lamelada colada GL24, desde o piso zero, e de lajes CLT nos pisos superiores (Diário Imobiliário, 2019; Silva, 2019; ARX Portugal Arquitectos, 2024).

Apesar de já existirem algumas moradias unifamiliares e equipamentos recreativos, desportivos e industriais executados em madeira lamelada (p.e. Pavilhão Atlântico), o sistema construtivo adotado foi um marco, tendo em conta a utilização a que se destina e o desenvolvimento em altura, conforme a seguinte descrição:

> O Edifício Norte é um volume urbano que define a rua e a cidade. Tem quatro pisos acima do solo, e alberga o programa principal da escola – Primária, 1º e 2º ciclos, e todas as áreas comuns da escola. O último andar é um grande espaço aberto, uma sala polivalente de eventos, ginásio e recreio coberto. A madeira foi selecionada desde o início como seu principal material estrutural e de acabamentos, devido à mensagem pedagógica inerente ao seu baixo impacto na natureza, ao ambiente acolhedor e à rapidez de construção que vocaciona – tivemos apenas um ano para pensar e construir esta escola (ARX Portugal Arquitectos, 2024).

Este projeto, da autoria do Arquiteto Nuno Mateus, foi distinguido com uma Menção Honrosa do Prémio Valmor e Municipal de Arquitetura referente ao ano de 2019 (citação), não só pela evidente qualidade estética e arquitetónica, mas também pelas suas características de sustentabilidade, patenteada, principalmente, na escolha de um sistema estrutural de madeira.

4.2.1.1. FATORES DE PROJETO

Tendo em conta o âmbito deste trabalho, e de acordo com a metodologia indicada, assume especial interesse analisar as duas camadas construtivas mais impactantes (estrutura e envelope) e a contribuição da arquitetura para a circularidade do projeto.

a) Estrutura

O facto de a estrutura dos quatros pisos ter sido concebida e instalada com base num sistema prefabricado de madeira, garante, à partida, um elevado potencial de circularidade, tendo em conta as características intrínsecas do material e as ligações mecânicas entre os vários elementos, possibilitando a desconstrução seletiva (Ilustração 195).



Ilustração 195 – Estrutura principal e secundária do último piso. (Diário Imobiliário, 2019)

Contudo, a existência de uma estrutura complementar de betão armado, executada *in situ*, nas zonas de acessos (p.e., caixas de escada e de elevador) para além das fundações, do piso enterrado e da laje de soleira, vai em sentido contrário a esta tendência, transformando-a, de facto, numa estrutura híbrida (Ilustração 196; Ilustração 197).



Ilustração 196 – Laje de CLT a ser colocada na estrutura de suporte. (Ilustração nossa, 2018)



Ilustração 197 – Ligação entre a estrutura de madeira lamelada e a de betão armado. (Cortesia ARX Portugal Arquitectos, 2018)

b) Envelope

A partir da informação disponibilizada pelo gabinete, constatamos que as paredes exteriores e a cobertura são constituídas exteriormente por um revestimento de chapa de zinco (paredes e cobertura), sobre um suporte rígido OSB, isolado termicamente com placas de XPS e finalizadas pelo lado interior maioritariamente com tabicaria seca (placas de gesso-cartonado) ou alvenaria, conforme a função do espaço (Ilustração 198).



Ilustração 198 – Isolamento XPS na fachada e revestimento em gesso cartonado pelo interior. (Cortesia ARX Portugal Arquitectos, 2018)

Nos tetos dos vários pisos, o sistema de isolamento térmico e acústico pelo interior (lã mineral + placa de lã de madeira aglomerada com cimento branco) encontra-se à vista com o objetivo de otimizar o condicionamento acústico (absorção e tempo de reverberação). No caso do ginásio e espaços congéneres, o acabamento das paredes com madeira tem ainda simultaneamente uma função estética e de resistência mecânica (Ilustração 199).



Ilustração 199 – Revestimento com madeira nos espaços do último piso. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)

Assim, o sistema construtivo permite, na sua grande maioria, uma desconstrução seletiva da envolvente. No entanto, os materiais de origem mineral ou fóssil (p.e., placas de gesso cartonado e isolamentos sintéticos) não são propensos à reciclagem nem à reutilização, exceção feita aos elementos secundários de madeira ou metal, revestimento exterior, caixilharias e envidraçado (Ilustração 200).



Ilustração 200 – Revestimento metálico exterior, caixilharias e envidraçados em alçado. FG + SG – Fotografia de Arquitectura ([Adaptado a partir de:] ARX Portugal Arquitectos, 2024)

c) Arquitetura

Por se tratar de uma obra implantada em meio urbano, numa zona da cidade com fortes características, um dos principais desafios a superar terá sido a da integração harmoniosa com o ambiente construído existente, indo ao encontro dos objetivos propostos pelo promotor (Ilustração 201) (ARX Portugal Arquitectos, 2024).



Ilustração 201 – Integração do Edifício Norte com o ambiente construído existente. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)



Ilustração 202 – Alçados Nascente e Norte. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)

No entender do autor, o projeto de arquitetura, através do conceito e dos sistemas e materiais utilizados (Ilustração 202), potencia a adaptabilidade e flexibilidade dos espaços, assim como a reversibilidade e a desconstrução da estrutura e do envelope, indo ao encontro de alguns dos princípios da construção circular (Ilustração 203), tendo sido claramente disruptivo relativamente ao *business-as-usual*.



Ilustração 203 – O sistema construtivo possibilita a adaptabilidade, flexibilidade, reversibilidade e desconstrução. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)

4.2.1.2. POTENCIAL DE CIRCULARIDADE

Face ao acima exposto, pode-se elaborar uma avaliação qualitativa do potencial de circularidade do edifício, relacionado com: a) Materiais e sistemas utilizados; b) Flexibilidade e adaptabilidade dos espaços interiores; c) Desconstrução seletiva.

a) Materiais

O material utilizado na maioria da estrutura (madeira laminada e CLT) sendo um material renovável, derivado da bioeconomia, tem um alto potencial de circularidade, além de o sistema ser fabricado *off-site* e montado em obra por ligações mecânicas, com todas as vantagens inerentes: resíduos, rapidez, energia incorporada (Ilustração 204).



Ilustração 204 – A utilização da madeira como material estrutural e de acabamento. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)

Em contrapartida, a existência de partes importantes da estrutura (p.e. caixas de escada) projetadas e executadas em betão armado *in-situ* contraria este efeito ao nível de carbono incorporado e da desconstrução seletiva, suscetível de gerar reutilização.

O sistema utilizado nas paredes exteriores (revestimento metálico exterior + isolamento + revestimento de gesso ou madeira interior), caracteriza-se por uma relativamente fácil desconstrução futura, embora os materiais com maior potencial de reutilização e de

reciclagem sejam a chapa metálica, as caixilharias e os envidraçados, diminuindo em relação ao isolamento (que neste caso é sintético) e em relação às placas de gesso-cartonado, pelo lado interior.

b) Flexibilidade

A existência de uma estrutura de madeira de grande vão confere amplas de possibilidades de flexibilização e de adaptação dos espaços interiores, principalmente no ginásio do último piso (Ilustração 205), sem constrangimentos ou limitações causadas por pilares intermédios.

De igual modo, mas levando em consideração a existência de lajes nos pisos inferiores, é possível – considerando a grande capacidade de carga da madeira engenheirada – assumir uma malha estrutural de vãos amplos, diminuindo ao máximo qualquer conflito arquitetónico e permitindo a inserção de paredes divisórias de estrutura ligeira (de madeira ou de metal), passíveis de serem desmontadas e os espaços adaptados, sem qualquer consequência estrutural.



Ilustração 205 - A estrutura permite flexibilidade e adaptabilidade. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)

c) Desconstrução

O facto de o projeto de arquitetura prescrever, neste caso, sistemas prefabricados ou instalados em obra com fixações mecânicas, como são o caso da estrutura de madeira laminada, das lajes de CLT e do envelope (paredes exteriores e cobertura) é uma condição para o incremento do potencial de circularidade numa construção.

Contudo, tal pode ser contrariado por opções complementares não alinhadas com esse princípio, tais como divisórias interiores ou estruturas soldadas, betonadas ou com outro tipo de ligações químicas, como as caixas e as escadas de B.A. (Ilustração 206).



Ilustração 206 – Escada em betão armado. FG + SG – Fotografia de Arquitectura. (ARX Portugal Arquitectos, 2024)

4.2.1.3. ANÁLISE SWOT

Uma análise SWOT é uma técnica sobejamente conhecida e que constata os pontos fortes e fracos, bem como as oportunidades e ameaças relacionadas com uma pessoa, projeto ou organização.

Sendo este edifício, indubitavelmente, um exemplo de integração urbanística, as suas principais características de inovação respeitam ao sistema construtivo, nomeadamente à estrutura prefabricada de madeira lamelada (Glulam), às lajes de CLT e aos painéis de OSB, em alternativa aos convencionais sistemas estruturais de betão armado *in-situ*, com os panos preenchidos com alvenaria de tijolo.

A promoção de uma solução de madeira (material natural e renovável) para a estrutura, vai ao encontro dos valores e da missão da instituição, em rutura com as soluções convencionais, na sua grande maioria feitas à base de estruturas de betão armado executado em obra.

Tal opção contribuiu ativamente para a captura e sequestração de carbono, contrabalançando deste modo as emissões causadas pela estrutura de betão armado, e viabilizando uma futura desconstrução seletiva, numa aproximação à abordagem da construção por camadas.

De notar que, talvez por imposições legais, se tenha optado por uma estrutura elevada híbrida (madeira + betão armado), nomeadamente para ir ao encontro da regulamentação antissísmica e da resistência ao fogo, cuja real necessidade haveria de ser efetivamente analisada à luz dos conhecimentos disponíveis.

A eficiência energética é conseguida à custa, principalmente, de isolamentos sintéticos (XPS), de origem fóssil e de reduzido atraso térmico, com as inerentes consequências em termos ambientais e de energia operacional, não sendo, também por isso, considerado um edifício nZEB pelo facto de não gerar energia (via painel solar fotovoltaico), nem ser autossuficiente.

Também a questão da temática do passaporte de materiais não foi levada em linha de conta, pelo facto de, à data do início do projeto (2016) e do final da construção (2019), esta questão não estar ainda devidamente enquadrada e disseminada, pelo que não se distingue dos demais neste aspeto.

No caso concreto do Edifício Norte, os **Pontos Fortes** (*Strengths*) respeitam principalmente à estrutura prefabricada de madeira, à eficiência energética, à agradabilidade, estética e integração arquitetónica.

Por sua vez, os **Pontos Fracos** (*Weaknesses*) têm a ver com a estrutura de betão armado, a utilização de materiais de isolamento sintéticos e a inexistência de autogeração fotovoltaica (BAPV ou BIPV), assim como de modelos circulares tipo PaaS e/ou de passaporte de materiais.

As **Oportunidades** (*Opportunities*) prendem-se com a possibilidade futura de desconstrução seletiva do envelope e da estrutura de madeira, bem como a flexibilidade e adaptabilidade dos espaços, decorrentes da qualidade intrínseca da arquitetura.

As **Ameaças** (*Threats)* consistem basicamente no não cumprimento do preconizado na diretiva DEE, no que respeita ao conceito de edifício quase-nulo de energia (nZEB) e à dificuldade de, futuramente, o edifício não poder ser considerado como um banco de materiais, diminuindo o seu valor (Tabela 46).

Tabela 46 – Análise SWOT do Edifício Norte Redbridge School.

1. PONTOS FORTES a) Madeira estrutural prefabricada b) Estética e integração arquitetónica c) Eficiência energética d) Agradabilidade	**2. PONTOS FRACOS** a) Ausência de ACV e DAP`s b) Certificação de sustentabilidade (SASE) c) Certificação de circularidade (C2C) d) Estrutura de betão armado *in situ* e) Utilização de isolamentos sintéticos f) Requisitos nZEB g) *Product-as-a-Service* e) Passaporte de materiais
CASO 1	
3. OPORTUNIDADES a) Desconstrução seletiva b) Flexibilidade e adaptabilidade	**4. AMEAÇAS** a) Diretiva DEE b) Banco de materiais

4.2.2. CASO 2 – MUDA RESERVE (COMPORTA, PORTUGAL)

A Muda Reserve é um projeto imobiliário premiado e orientado para o segmento alto, na zona da Comporta (Grândola), contemplando um total de 175 residências (Ilustração 207), tendo na sua conceção a temática do desenvolvimento sustentável (Vanguard Properties, 2024).

Os edifícios, de várias tipologias, têm em comum o facto de serem construídos com uma forte orientação para a sustentabilidade, utilizando materiais e sistemas construtivos de elevado desempenho energético e carbónico, permitindo a sua classificação como NZEB (Net-Zero Energy Building) 21 e CO_2neutral.

O complexo integra uma comunidade energética constituída para o efeito, de modo a poder tirar partido da extensa área de painéis solares fotovoltaicos posicionados nas coberturas dos edifícios, assegurando que 90% da energia consumida seja proveniente da autogeração e de fontes renováveis (Vanguard Properties, 2024).

A análise relativa a este trabalho irá incidir sobre os aspetos construtivos do edificado, deixando de lado outras questões igualmente importantes, mas fora do âmbito, tais como as relacionadas com o planeamento urbanístico, a circularidade da água ou a gestão de fluxo de materiais do empreendimento.

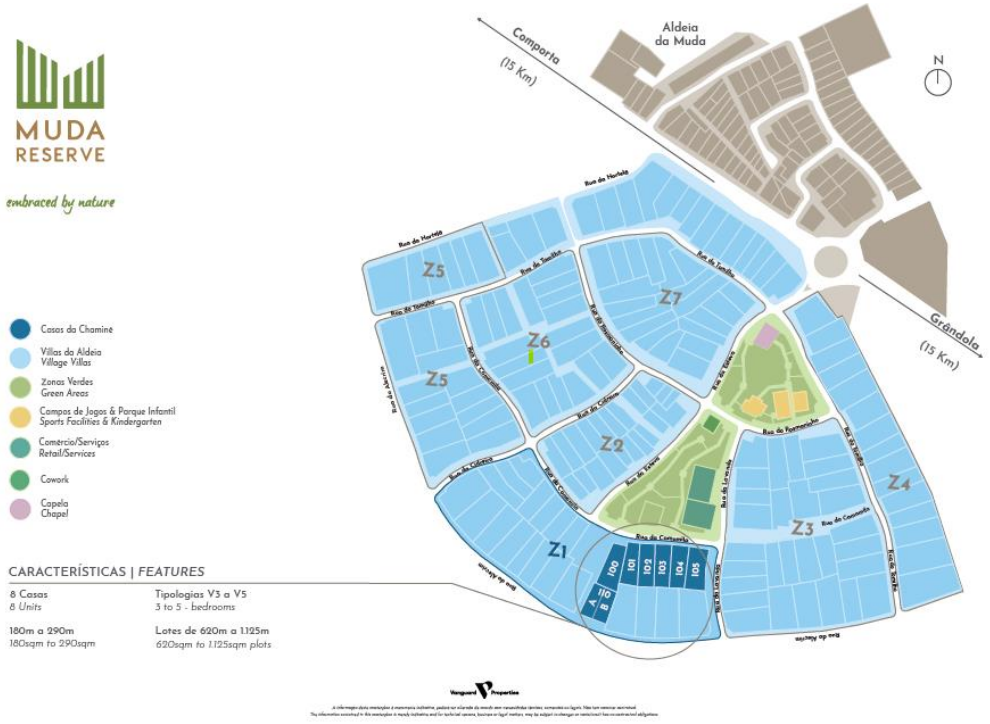


Ilustração 207 – *Masterplan* Casas da Chaminé. (Vanguard Properties, 2024)

4.2.2.1. FATORES DE PROJETO

a) Estrutura

Sendo o edificado constituído maioritariamente por edifícios residenciais unifamiliares de pequeno porte (até dois pisos de altura), permite que sejam projetados e montados a partir de uma solução construtiva de painéis autoportantes, com estrutura rígida de madeira de pinho de classe C24 (Ilustração 208).



Ilustração 208 – Painel autoportante de madeira (*woodframing*). (Kozowood Industries, 2024)

Em coerência com os princípios orientadores do projeto, as lajes do piso superior e do terraço foram projetadas em madeira de pinho engenheirada CLT 180-5, com 180 mm (40-30-40-30-40) de espessura, aplicadas em 5 camadas (Ilustração 209), evitando a utilização de betão armado, pré-esforçado, ou de cofragem metálica colaborante.

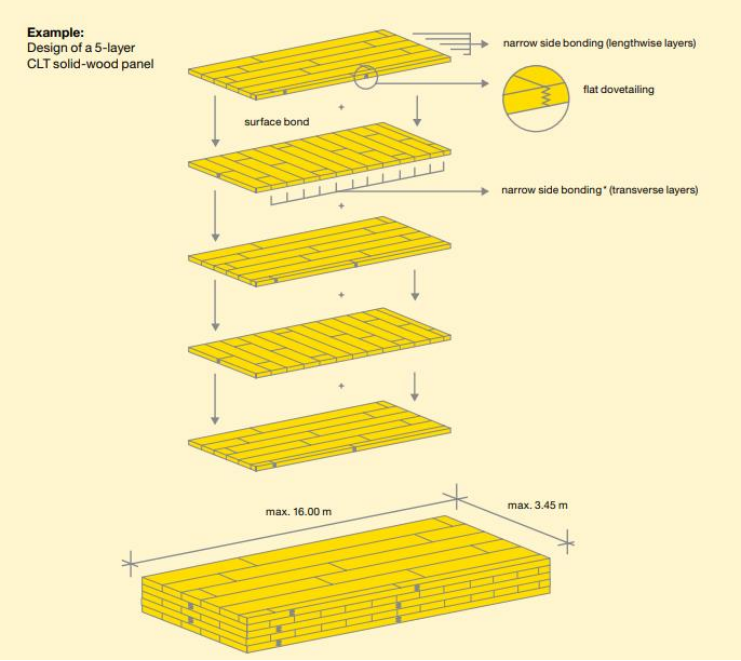


Ilustração 209 – Painel CLT de 5 camadas. ([Adaptado de:] Stora Enso Wood Products GmbH, 2017, p. 5)

Na mesma linha, as fundações, embora solidarizadas entre si por uma viga de fundação, são do tipo helicoidal, garantindo a resistência mecânica e estrutural por via do atrito gerado entre o parafuso de aço e o solo (Ilustração 210), dispensando, desta forma, fundações isoladas ou contínuas de betão armado ou simples.

Este sistema, pouco invasivo e especialmente adequado a terrenos arenosos, diminui, ou mesmo evita, escavações e transporte de terras a vazadouro, o que demonstra uma vez mais uma especial atenção à compatibilidade entre a eficácia do sistema construtivo e o ambiente.

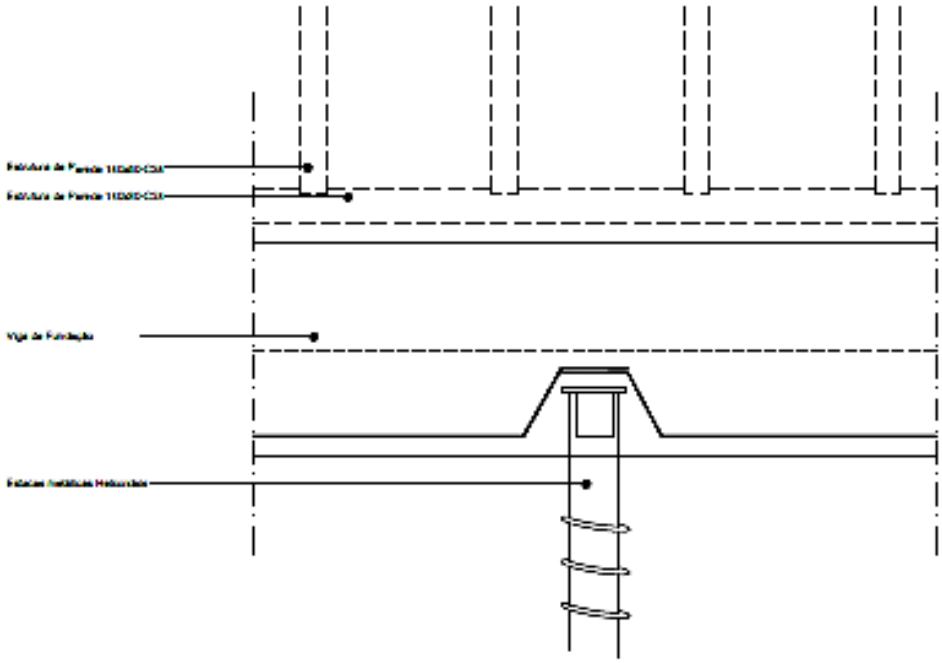


Ilustração 210 – Fundação helicoidal. (Gentilmente cedido por Projectus, 2024)

b) Envelope

Estes painéis, como já descrito anteriormente, têm uma estrutura resistente de madeira, sendo revestidos por ambas as faces por painéis rígidos de fibra de madeira (exterior) e OSB (interior) e com a cavidade preenchida com material isolante (Kōzōwood, 2024; Kozowood Industries, 2024).

Tanto as paredes, como a cobertura inclinada, são executadas a partir do sistema construtivo acima descrito, ou seja, painéis SIP justapostos e interligados por fixações mecânicas. No caso do isolamento, a opção final recaiu sobre fibra de madeira injetada na cavidade, com 140 mm de espessura.

A cobertura plana, sendo acessível, consiste numa laje estrutural de CLT, revestida com um sistema impermeabilizante de Policloreto de Vinilo **(**PVC), fixado mecanicamente à placa de suporte de OSB (Ilustração 211). As coberturas inclinadas, além de serem revestidas com telhas, servem de suporte aos painéis fotovoltaicos da comunidade energética.

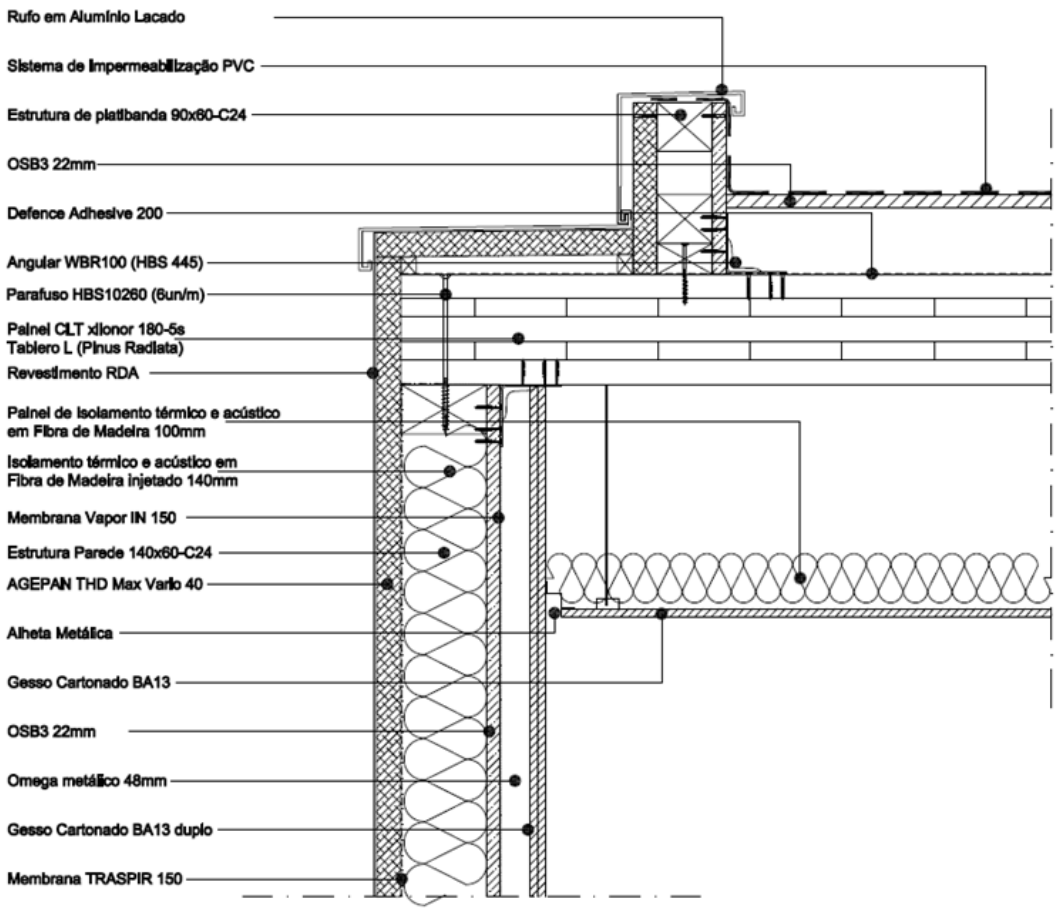


Ilustração 211 – Corte esquemático da parede exterior e da cobertura plana. (Gentilmente cedido por Projectus, 2024)

O sistema de revestimento das paredes em Reboco Delgado Armado (RDA), sendo aderido quimicamente, não irá permitir a sua eventual e posterior desmontagem do respetivo painel de suporte, indo ao revés do princípio das camadas construtivas e podendo inviabilizar a reutilização dos painéis.

Se o reboco também for de base cimentícia, irá provavelmente constituir uma barreira-vapor, impedindo a troca de ar e de humidade com o exterior permitida pelo painel rígido de lã de madeira (Ilustração 212). De igual modo, também a utilização de pinturas poliméricas vai nesse sentido, ao selar os poros do painel.



Ilustração 212 – *Render* das paredes exteriores revestidas com sistema RDA. (Vanguard Properties, 2024)

c) Arquitetura

O projeto de arquitetura da primeira fase, da autoria do *atelier* Saraiva + Associados (S+A), escolhido por melhor ir ao encontro do pretendido pelo promotor, não apontava, segundo informação recolhida, inicialmente para uma solução prefabricada ou modular, o que veio a ser tido posteriormente pelo promotor como uma condição, com vista a alcançar um imobiliário sustentável.

Sendo uma obra de arquitetura contemporânea (Ilustração 213), as alterações efetuadas com a introdução de um sistema construtivo prefabricado baseado em materiais renováveis (madeira estrutural, fibras de madeira e painel rígido de lã de madeira), em detrimento de um sistema convencional de betão armado e alvenaria, foram essenciais para se alcançar um projeto mais de acordo com a filosofia do empreendimento e as características do local, conforme documentado ao longo deste trabalho.



Ilustração 213 – *Render* das Casas da Chaminé. ([Adaptado a partir de:] Vanguard Properties, 2024)

A segunda fase, cujos edifícios serão produzidos pelo mesmo fabricante e baseados nos mesmos princípios de sustentabilidade, porém com uma abordagem estética diferente, tem a assinatura do gabinete Studio JV (Ilustração 214).



Ilustração 214 – *Render* do edifício de dois pisos da segunda fase do empreendimento Muda Resort. ([Adaptado a partir de:] (Vanguard Properties, 2024)

Também de realçar a colaboração do arquiteto Francis Kéré , galardoado com o prémio Pritzker 2022, através da conceção de uma capela (Ilustração 215) a ser doada à comunidade local, pela qualidade e notoriedade que aporta ao projeto (Vanguard Properties, 2024).



Ilustração 215 – *Render* da capela do Muda Resort. (Vanguard Properties, 2024)

4.2.2.2. POTENCIAL DE CIRCULARIDADE

É de supor que, pelas suas características intrínsecas e intencionalmente introduzidas na fase de projeto, estes edifícios terão um considerável potencial de circularidade ao utilizarem materiais renováveis, ao permitirem a flexibilidade e reversibilidade dos espaços, possibilitando tecnicamente a desconstrução seletiva, por via de uma conceção e de uma técnica construtiva adequada.

a) Materiais

De forma intencional, a madeira é o material dominante, refletindo a perspetiva do arquiteto e do promotor relativamente à relação entre o edificado e a sustentabilidade (Vanguard Properties, 2024).

A madeira está presente na estrutura autoportante da envolvente, nos painéis de revestimento exteriores e interiores, nos acabamentos, no isolamento térmico e acústico das paredes exteriores e interiores, assim como na estrutura e na laje do piso superior e da cobertura plana (Ilustração 216).

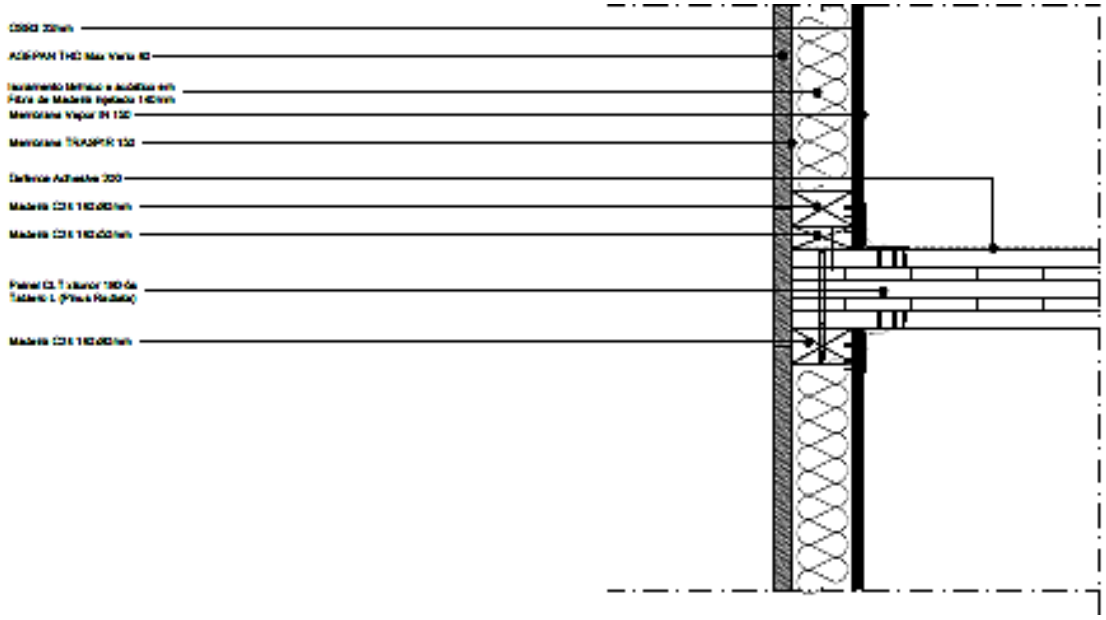


Ilustração 216 – Utilização da madeira nas várias componentes do edifício. (Gentilmente cedido por Projectus, 2024)

Para além de ser um elemento decisivo para alcançar o objetivo da neutralidade carbónica dos edifícios e do empreendimento (CO_2neutral), a utilização predominante de materiais renováveis (neste caso, a madeira e derivados) é também fundamental para a obtenção de um alto potencial de circularidade, tendo em conta as suas características, conforme já anteriormente desenvolvido.

b) Flexibilidade

O facto de os painéis SIP serem autoportantes, permite servir de base para o assentamento de lajes de CLT, sem a eventual necessidade de pilares ou vigas estruturais intermédias, permitindo a otimização dos espaços interiores, assim como a sua reconversão, sem necessidade de demolições e geração de resíduos, ou de obras de reforço estrutural (Ilustração 217; Ilustração 220).



Ilustração 217 - *Renders* da área social de um edifício do Muda Resort. ([Adaptado a partir de:] Vanguard Properties, 2024)



Ilustração 218 – Plantas do piso térreo e do piso superior de um edifício das Casas da Chaminé. ([Adaptado a partir de:] Vanguard Properties, 2024)

Tirando partido desta vantagem, também os elementos de suporte secundários (pilaretes) da laje do piso superior, estarão embebidos nas paredes divisórias, caso se justifique. Tratando-se de ligações aparafusadas e reversíveis, permite a fácil desmontagem das paredes e, inclusive, dos elementos estruturais secundários, permitindo aumentar ou eliminar o piso superior (Ilustração 219).

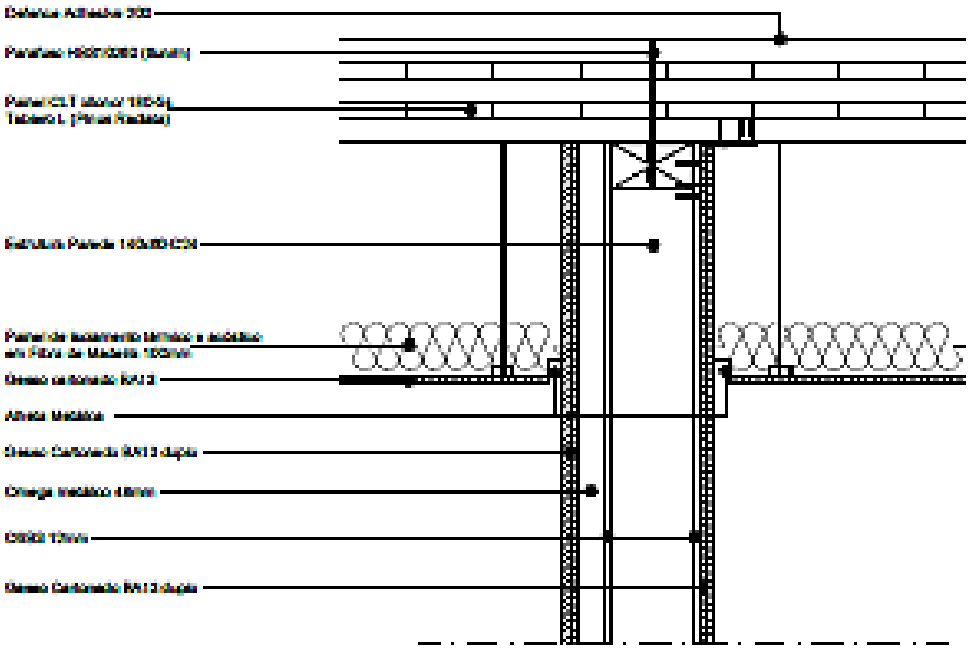


Ilustração 219 – Pormenor das ligações entre as paredes divisórias e a laje do piso superior. (Gentilmente cedido por Projectus, 2024)

c) Desconstrução

Considerando as opções tomadas relativamente à utilização de sistemas prefabricados, com as partes conectadas entre si por fixações mecânicas, leva a que a que a desconstrução seletiva possa ser quase total, incluindo as próprias fundações, numa aproximação clara ao modelo das seis camadas construtivas (Ilustração 220).



Ilustração 220 – Sistema prefabricado à base de conexões mecânicas. (Kōzōwood, 2024)

Essa aproximação abrange, como já referido, as fundações helicoidais (com exceção da viga de solidarização de betão e da cave), mas, principalmente, a estrutura e a envolvente, além dos revestimentos e divisórias interiores, o que constitui um alto potencial de desconstrução, alcançado a partir de uma conceção adequada.

4.2.2.3. ANÁLISE SWOT

A MUDA Reserve é um empreendimento imobiliário de excelência, orientado para o segmento alto, e que de forma explícita inscreve a sustentabilidade como um elemento diferenciador inscrito na sua matriz, o que só por si o torna digno de registo no setor da promoção imobiliária em Portugal.

Em consonância com esse princípio, os edifícios são concebidos de forma a potenciarem a circularidade e a descarbonização, em linha com o preconizado no NBE e na nova versão da diretiva EPBD (2025).

A utilização de materiais renováveis para a estrutura, isolamentos e placas de revestimento tornam os edifícios um reservatório de carbono (*carbon sink*), cujo impacte pode ser quantificado por uma ACV.

Por outro lado, a utilização de um sistema construtivo prefabricado, ligeiro e baseado em painéis estruturais adaptados ao caso particular, permite a sua rápida assemblagem e desconstrução, com o mínimo de resíduos e de carbono incorporado.

A possível e desejável certificação por um sistema de sustentabilidade de edifícios, (p.e., BREEAM) já realizada noutros empreendimentos do grupo, deverá refletir essa qualidade geral dos edifícios, cujo reconhecimento valorizará economicamente o edificado, e que deverá ser utilizado para fins promocionais (marketing sustentável).

A análise ao edifício da primeira fase do empreendimento MUDA Reserve, numa ótica SWOT, conduz aos seguintes apontamentos:

Os **Pontos Fortes** relacionam-se com a adoção de um sistema prefabricado de madeira que engloba a estrutura (painéis SIP e lajes superiores) e o envelope (paredes e cobertura), juntamente com a utilização de energia renovável fotovoltaica e a utilização de fundações helicoidais, em substituição de fundações de betão armado.

Os **Pontos Fracos** respeitam essencialmente à ausência de certificação ambiental ou de sustentabilidade por via de sistemas reconhecidos, referentes aos edifícios (SASE) ou à seleção de materiais de construção (DAP ou C2C) ou de passaporte de materiais.

As **Oportunidade**s vão no sentido do alinhamento do edificado com a nova diretiva energética (EPBD) e o roteiro energético para 2050 com vista à descarbonização (CO_2neutral), e a possibilidade de uma desconstrução seletiva, fácil e efetiva, no final do ciclo de vida, para a grande parte do sistema construtivo.

As **Ameaças** respeitam à eventual não consideração como banco de materiais (por atraso na transposição legislativa dos passaportes de materiais) e de não reconhecimento integral do marketing sustentável pela não existência de certificação de sustentabilidade por uma terceira parte (Tabela 47).

Tabela 47 – Análise SWOT dos edifícios MUDA Reserve.

1. PONTOS FORTES a) Sistema construtivo prefabricado com materiais renováveis b) Fundações helicoidais c) Neutralidade carbónica (CO2neutral) d) Eficiência energética (nZEB) e) Agradabilidade e qualidade arquitetónica	**2. PONTOS FRACOS** a) Ausência de ACV e DAP`s b) Certificação de sustentabilidade (SASE) c) Certificação de circularidade (C2C) d) *Product-as-a-Service* e) Passaporte de materiais
3. OPORTUNIDADES a) Edifícios como reservatório de carbono b) Alinhamento com NEB e DEE c) Desconstrução seletiva	**4. AMEAÇAS** a) Diretiva DEE b) Banco de materiais

CASO 2

4.2.3. CASO 3 – ROCKET & TIGERLI (ZURIQUE, SUÍÇA)

A torre Rocket, um dos quatro edifícios do complexo Rocket & Tigerli (Ilustração 221), será, com 100 metros de altura, o edifício residencial mais alto do mundo, integralmente construído com estrutura de madeira, sem núcleo de betão armado ou lajes de betão armado acima do nível zero (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024; Ahlmark, 2022, p. 3; Barandy, 2022; Parkes, 2022).

Tal será possível graças ao trabalho de investigação, que incluiu, entre outros, o Swiss Federal Institute of Technology of Zürich (ETH – Zürich) no desenvolvimento de uma solução estrutural exclusiva de madeira engenheirada, permitindo construir mais alto, mais leve e com menos carbono incorporado (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024; Barandy, 2022; Parkes, 2022).



Ilustração 221 – Complexo Rocket & Tigerli. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)

Apesar de projetado e a ser construído fora de Portugal, este caso poderá servir de exemplo para a arquitetura e a engenharia portuguesas, demonstrando, já no presente, o potencial deste tipo de sistemas construtivos.

4.2.3.1. FATORES DE PROJETO

a) Estrutura

Como já referido, esta estrutura é inovadora pois abdica da existência de uma estrutura nuclear de betão armado ou de aço estrutural, sendo constituída por vários tipos de madeira estrutural nos pilares e vigas (Glulam e CLT) e de um sistema compósito de lajes especialmente desenvolvido para esta finalidade (HVFD), numa construção de 32 pisos, com 100 metros de altura (Ilustração 222) (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024; Parkes, 2022) e uma superfície total de 34,500 m2 (Barandy, 2022).

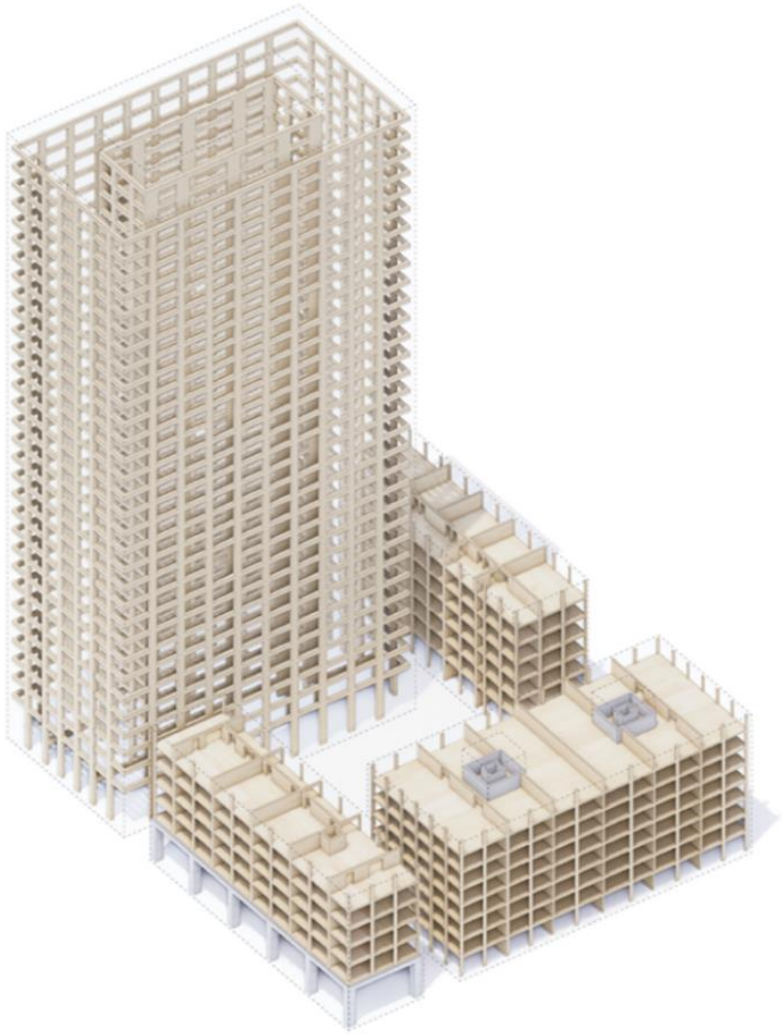


Ilustração 222 – Estrutura de madeira engenheirada do complexo Rocket & Tigerli. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)

b) Envelope

O revestimento exterior consta de uma fachada em terracota (Ilustração 223) definindo os vãos e respetivos parapeitos e remates, num sistema prefabricado e acoplado mecanicamente entre si e à estrutura principal (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024; Ahlmark, 2022, p. 8) sem rebocos ou pinturas, permitindo sua completa desconstrução futura, pelo que este elemento também assume um elevado potencial de circularidade.



Ilustração 223 – Fachada em sistema prefabricado de terracota. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)

No entanto, é de referir a grande ocupação da fachada por áreas envidraçadas potenciando a entrada de luz, o que apesar disso, e num país da Europa Central, com fortes necessidade de aquecimento durante largos meses, não obsta a que se alcance uma classe energética de topo (certificação 2000-Watt Society) (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024; Barandy, 2022).

Embora os isolamentos térmicos do envelope não sejam referidos, é de supor que tenham sido tomadas providências no sentido de irem ao encontro de uma solução sustentável, sendo que o fator predominante é a ampla área envidraçada (Ilustração 224).

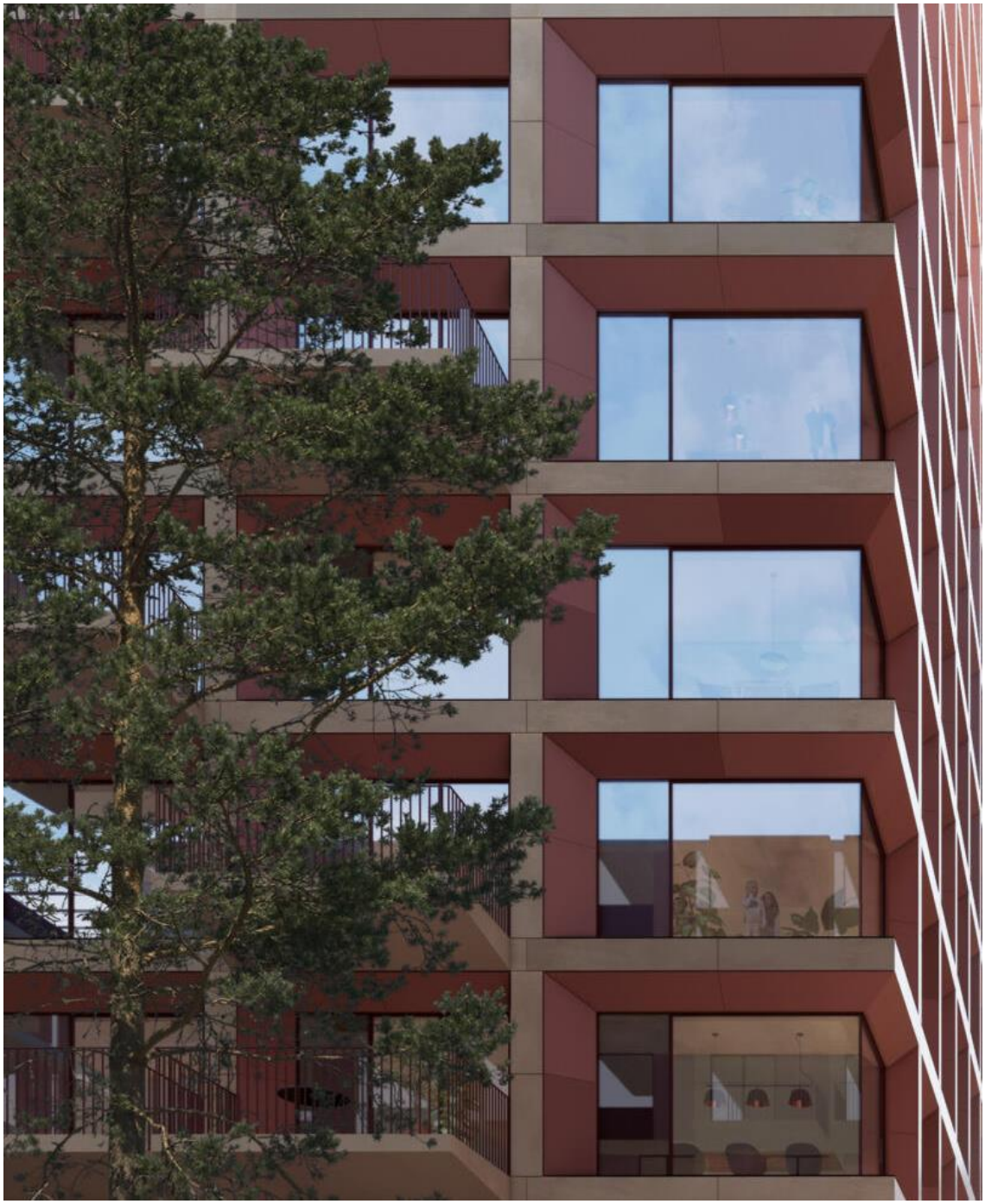


Ilustração 224 – Pormenor da fachada num edifício do complexo. ([Adaptado a partir de:] (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)

c) Arquitetura

Os quatro edifícios que compõem este edificado destinam-se a várias finalidades, concretamente, habitação, residência de estudantes, restauração, comercio e hotelaria. Um pátio comum de acesso possibilita a comunicação e a sinergia entre os diferentes edifícios e as áreas adjacentes (Ilustração 225), tornando-a uma zona dinâmica e revitalizada (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024; Ahlmark, 2022, pp. 6, 7).



Ilustração 225 – Pátio comum de acesso aos edifícios. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)

Integrada na história do local, as cores e o tipo de revestimento escolhidos tiveram em conta o seu passado industrial, onde se fabricavam e reparavam locomotivas e material circulante ferroviário, conferindo à atmosfera e aos edifícios um tom característico proveniente do carvão e do ferro (Ilustração 226), e que serviu de inspiração ao projeto de arquitetura (Ahlmark, 2022, pp. 5, 6; Barandy, 2022).



Ilustração 226 – Aspeto geral e tonalidade do conjunto. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)

Ao contrário de muitos outros, neste caso, o projeto de arquitetura feito em consonância com o promotor e as engenharias (projeto integrado), tem como objetivo a potenciação de soluções sustentáveis e circulares, o que se reflete não só nas opções tomadas nos materiais e sistemas construtivos, mas também no interiorismo, em que se explora o conforto e a estética da madeira como acabamento final, de modo a diminuir substancialmente o material de revestimento em paredes e pavimentos, e deste modo

diminuir o impacte da construção (Ahlmark, 2022, p. 8). A cobertura ajardinada está também preparada para a inserção de painéis fotovoltaicos (Parkes, 2022).

4.2.3.2. POTENCIAL DE CIRCULARIDADE

a) Materiais

Em todos os projetos, os materiais são predominantes em definição de todos os tipos de desempenho, incluindo o que respeita ao binómio sustentabilidade - circularidade.

O uso intensivo de madeira, no sistema estrutural "tube-in-tube", viabiliza técnica e economicamente a construção de um edifício de 100 metros de altura (32 pisos), em detrimento do aço e do betão, em conjunto com as lajes HVFD. Este sistema, de lajes compósitas planas de madeira HVFD (Holzverbundflachdecke), foi especialmente desenvolvida para este projeto, desempenhando um importante papel na estrutura e nos acabamentos interiores (Ilustração 227) (Implenia Holzbau, 2025).

Este tipo de laje prefabricada, deve também garantir a necessária resistência ao fogo, e ao isolamento ao ruido aéreo e de impacto, através de um sistema que conjuga uma camada de compressão, um material leve de enchimento e uma laje de madeira engenheirada na parte inferior, solidarizados por conectores verticais de aço, conferindo resistência ao corte e estabilidade dimensional (Ilustração 228) (Implenia Holzbau, 2025).

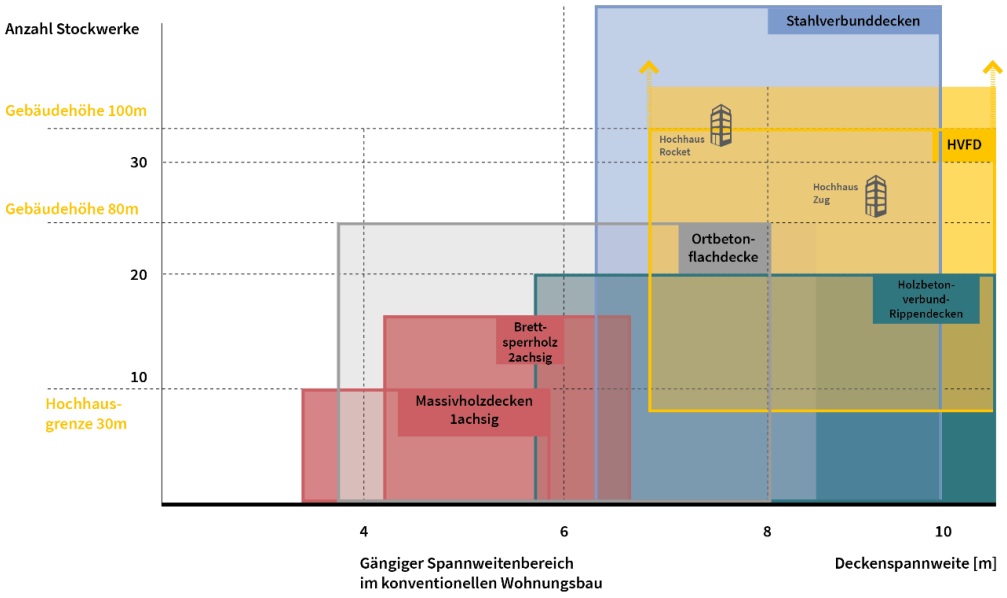


Ilustração 227 – Tipos de lajes de pavimento em função da altura do edifício e do vão. ([Adaptado a partir de:] Implenia Holzbau, 2025)



Ilustração 228 – Lajes HVFD: modelo, montagem de conectores e produto final. ([Adaptado a partir de:] Implenia Holzbau, 2025)

Esta solução, que demonstrou ser a mais sustentável, equacionando o impacte ambiental (ambiente), o preço (económico) e a satisfação dos requisitos regulamentares de segurança e conforto em vigor (social), tem a particularidade de a face inferior servir de acabamento dos tetos (Ilustração 228), numa opção tomada com vista à salvaguarda e à otimização dos recursos (Implenia, 2025).



Ilustração 229 – Tipos de acabamentos na face inferior das lajes HVFD. (Implenia Holzbau, 2025)

O sistema de terracota, escolhido para o revestimento das paredes exteriores, é uma opção arquitetónica, e que teve a ver com o local em que se insere, a sua história e materialidade. Trata-se de um material natural e sustentável, que aporta durabilidade, versatilidade e estética, podendo ser aplicado nas fachadas dos edifícios a partir de painéis prefabricados, de diversas formas, tamanhos e cores, combinando tradição e inovação (Lopresti, 2024)

Para além do baixo carbono incorporado, do contributo para a eficiência energética e da durabilidade, é de especial interesse realçar que os produtos de terracota são totalmente recicláveis ou reutilizáveis, sendo reconhecidos por alguns dos sistemas de certificação de sustentabilidade de edifícios com mais notoriedade (p.e., LEED e WELL), devido às suas qualidades intrínsecas (Lopresti, 2024).

b) Flexibilidade

O inovador sistema estrutural permite uma grande flexibilidade e adaptabilidade das plantas de arquitetura e do envelope, permitindo, inclusivamente, que essa possibilidade construtiva se possa plasmar na estética do edifício, interrompendo a monotonia da composição, ao intervalar espaços cheios e vazios nos alçados (Ilustração 230; Ilustração 231).

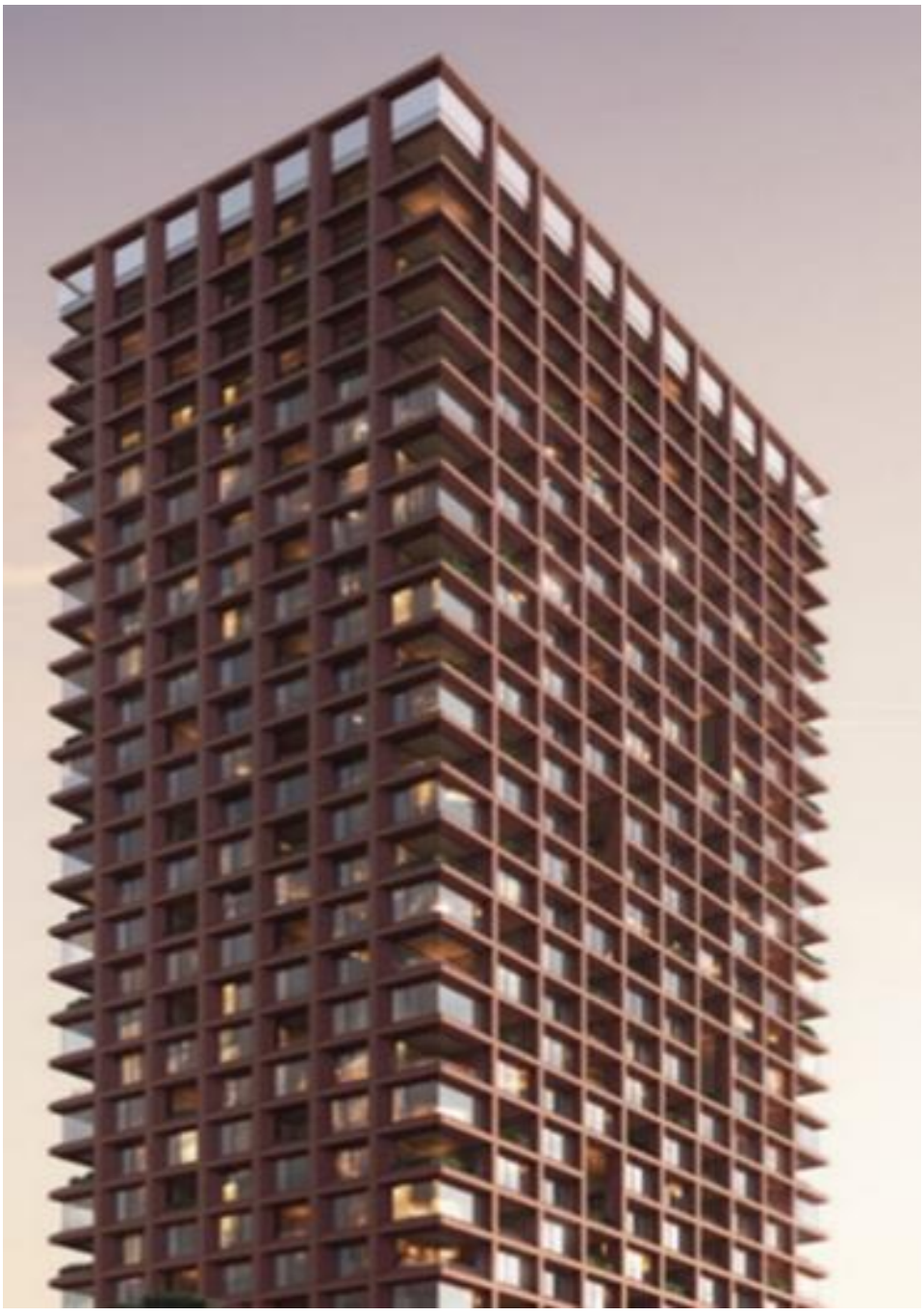


Ilustração 230 – Pormenor do *render* de dois alçados do edifício Rocket. ([Adaptado de:] Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)

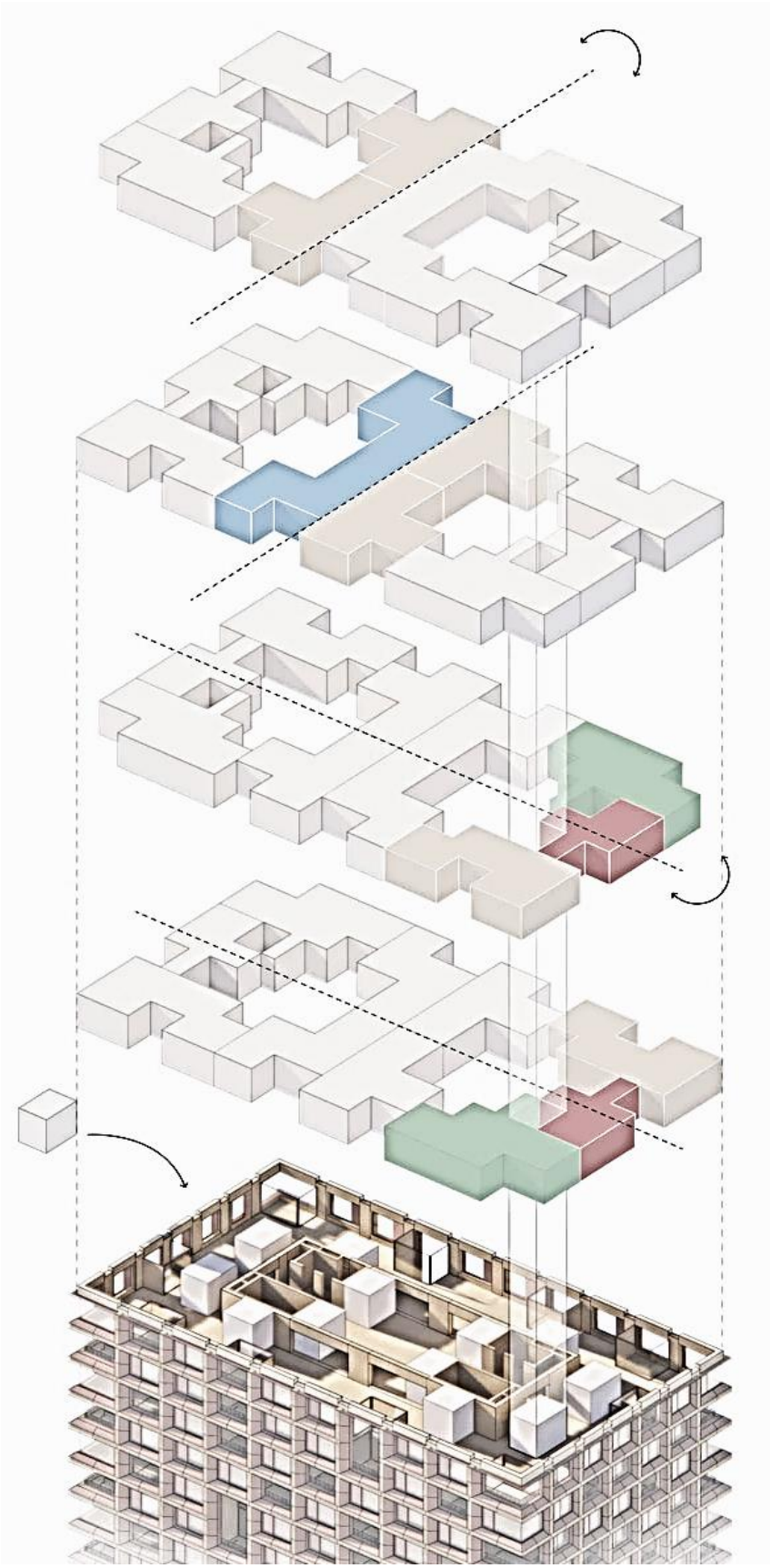


Ilustração 231 – Flexibilidade em ação: diferentes combinações de plantas arquitetónicas potencializada pela estrutura. (Implenia Holzbau, 2025)

De igual modo, os amplos espaços interiores, modernos e funcionais, permitem que eventuais alterações da planta possam ser feitas praticamente sem limitações, de forma reversível e adaptativa (Ilustração 232).



Ilustração 232 – *Render* do interior de um fogo residencial da torre Rocket. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)

c) Desconstrução

O edifício foi concebido de modo a minimizar os vários impactes, com destaque para o final do ciclo de vida (fases C1 – C4 e D), que contempla a reversibilidade dos processos e a desconstrução seletiva.

Todo o sistema construtivo acima do solo (estrutura principal e secundária, lajes HVFD, revestimento em terracota e caixilharias) é prefabricado e conectado por fixações mecânicas, tornado real a sua efetiva desconstrução no final do ciclo de vida (Ilustração 233).

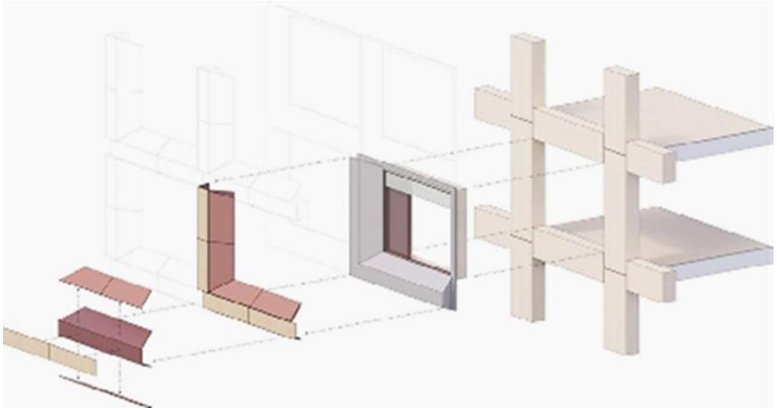


Ilustração 233 – Esquema do processo de construção/desconstrução dos elementos de terracota prefabricados. (Schmidt Hammer Lassen Architects, 2024)

Relativamente a um equivalente em betão armado ou aço estrutural, o sistema reticulado de madeira engenheirada e de lajes HVFD assumem um peso-próprio inferior, refletindo-se também nas fundações do edifício, aportando os respetivos benefícios ambientais (menos carbono) e económicos (menor quantidade de material) .

4.2.3.3. ANÁLISE SWOT

O objetivo de construir o mais alto edifício residencial do mundo vai ao encontro da vontade de contribuir para uma transição mais acelerada do setor para a sustentabilidade e a circularidade.

O local da construção é caracterizado por uma materialidade industrial que inspirou o material de revestimento das fachadas em tons de vermelho e amarelo terracota, as cores e texturas predominantes nos edifícios existentes.

A opção de parede baseada em amplos vãos envidraçados, permitindo abundante iluminação natural, tem a sua contrapartida no aumento das necessidades de aquecimento, arrefecimento e ventilação, satisfeitas parcialmente por via da autogeração fotovoltaica instalada nas coberturas planas, não sendo obstáculo para um elevado desempenho energético, devidamente comprovado.

Os **Pontos Fortes** respeitam, em primeiro lugar, à inovadora estrutura de madeira prefabricada, e às respetivas vantagens técnicas e ambientais em todas as fases do ciclo de vida, comparativamente a outras soluções estruturais.

No mesmo sentido, a fachada, que foi concebida de modo a tirar partido arquitetónico da estrutura, salienta o reticulado desta mediante a justaposição de um sistema de cerâmica terracota criando um efeito original, o que além de permitir futuramente a sua integral desmontagem ou desconstrução, elimina a necessidade de pinturas ou de revestimentos adicionais. A cobertura plana ajardinada está também preparada para a aplicação de painéis fotovoltaicos.

Também no interior se aproveita ao máximo a estrutura de madeira como acabamento final, de modo a diminuir substancialmente o material de revestimento em paredes e pavimentos e deste modo diminuir o impacte da construção.

Devido sua conceção orientada para a sustentabilidade, o edifício almeja poder vir a ser certificado com a categoria mais elevada (Platina) do sistema suíço Standard

Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS) e pelo sistema 2000-Watt Society, relativamente à eficiência energética.

Os **Pontos Fracos** na ótica da circularidade respeitarão, eventualmente, aqueles relacionados com a existência de DAPs dos materiais, produtos e sistemas de construção utilizados.

Contudo, e na mesma linha de pensamento, a utilização de uma ACV simplificada do edifício com vista à quantificação dos impactes ambientais relevantes, de modelos 4 circulares de negócio (PaaS) ou de passaporte de materiais não parece ter sido tida em conta.

As **Oportunidades** prendem-se com o reconhecimento do edifício como um significativo reservatório de carbono, com o máximo potencial de desconstrução seletiva abrangendo as duas camadas construtivas mais impactantes (estrutura e envelope) e com o valor patrimonial derivado da máxima classificação do sistema SNBS.

As **Ameaças** terão a ver com uma eventual não-harmonização dos sistemas suíços com a orientação e legislação europeia mais recente (p.e. nZEB, DEE, NBE), bem como a não capacitação de um futuro banco de materiais, por ausência de informação derivada dos passaportes de materiais (Tabela 48).

Tabela 48 – Análise SWOT do edifício Rocket (Rocket & Tigerli).

CASO 3	
1. PONTOS FORTES a) Sistema estrutural prefabricado e inovador em materiais renováveis (CLT) b) Fachada prefabricada modular c) Aproveitamento da estrutura como material de acabamento d) Eficiência energética (2000 GreenWatt) e) Agradabilidade e qualidade arquitetónica f) Certificação SNBS Platina	**2. PONTOS FRACOS** a) Ausência de ACV e DAP`s c) Certificação de circularidade (C2C) d) *Product-as-a-Service* e) Passaporte de materiais f) Foco na legislação helvética
3. OPORTUNIDADES a) Edifícios como reservatório de carbono b) Flexibilidade e adaptabilidade c) Desconstrução seletiva d) Revitalização local	**4. AMEAÇAS** a) Não conformidade com legislação da UE b) Banco de materiais

4.3. SÍNTESE



Ilustração 234 – *Renders* dos edifícios analisados dos três estudos de casos. (Ilustração nossa, 2025)

Da análise do estudo dos três casos, parece ao autor que:

1. O papel do promotor é essencial para a implementação de soluções inovadoras e circulares;

2. A adoção de novos sistemas construtivos mais sustentáveis e circulares não implica restrições arquitetónicas de nenhum tipo (Ilustração 234);

3. A prefabricação (construção *off-site*) é condição necessária para a circularidade da construção, concretamente no que respeita à reutilização das partes e componentes;

4. A utilização de materiais renováveis (*bio-based*) potencia a circularidade dos edifícios, possibilitando de modo efetivo a reciclagem e a compostagem dos diversos elementos;

5. Os materiais renováveis contribuem decisivamente para a circularidade e a descarbonização dos edifícios, através de baixo carbono incorporado, alto desempenho energético e sequestração de CO_2;

6. A circularidade de um edifício é predominantemente afetada pela adoção do modelo por camadas construtivas (*S-Layers*).

7. A circularidade de um edifício não é significadamente afetada pela maior ou menor quantidade de materiais reciclados, utilizados nas diversas camadas.

8. As métricas relacionadas com ACV, ou com o cálculo do carbono incorporado nos materiais constituintes dos edifícios do Caso 1 e do Caso 2 (nacionais), não foram tidas em conta pelos projetistas para a tomada de decisão.

9. A flexibilidade dos espaços interiores deve ser encarada como um fator decisivo para a extensão da vida útil dos edifícios e como parte integrante de uma estratégia de projeto circular.

10. A desconstrução seletiva é diretamente proporcional à quantidade de elementos prefabricados conectados por ligações mecânicas, principalmente na estrutura e no envelope, podendo também ser estendida a outras componentes dos edifícios, como fundações e acabamentos.

Como já mencionado, o estudo de casos não tem como objetivo a comparação entre eles, mas a construção de uma matriz onde se possa identificar, simplificadamente, o Grau de Circularidade (*Gc*) de um edifício, a partir de algumas premissas do projeto.

Como descrito ao longo deste capítulo, o *Gc* é função do Fator de Projeto (*Fp*) e do Potencial de Circularidade (*Pc*) (Equação 3; Tabela 49).

Equação 3 – Grau de circularidade de um edifício

$$Gc = f(Fp; Pc)$$

Tabela 49 – Matriz do Grau de Circularidade de um edifício

			MATRIZ GRAU DE CIRCULARIDADE		
FATORES DE PROJETO	ARQUITETURA	A	AM	AF	AD
	ENVELOPE	E	EM	EF	ED
	ESTRUTURA	S	SM	SF	SD
			M	F	D
			MATERIAIS	FLEXIBILIDADE	DESCONSTRUÇÃO
			POTENCIAL DE CIRCULARIDADE		

A variável *Fp* é função do tipo de estrutura utilizada (*S*), do envelope do edifício (*E*) e da prescrição oriunda do projeto de arquitetura (*A*) (Equação 4):

Equação 4 – Fatores de projeto

$$Fp = f(S, E, A)$$

Por sua vez; a variável *Pc* é função da tipologia dos materiais (*M*), da maior ou menor flexibilidade e adaptabilidade dos espaços (*F*) e da desconstrução seletiva (*D*) (Equação 5):

Equação 5 – Potencial de circularidade

$$Pc = f(M, F, D)$$

Com base nos resultados da análise bibliográfica efetuada neste projeto, propõe-se duas escalas: uma para classificação dos Fatores de Projeto de um edifício; e outra para classificação do Potencial de Circularidade de um edifício. Cada escala pode assumir valores de 1 a 5, sendo que 1 traduz o valor menos favorável e 5 o mais favorável (Tabela 50; Tabela 51).

Tabela 50 – Classificação dos Fatores de Projeto de um edifício

Classificação Fatores de Projeto			
Estrutura	Envelope	Arquitetura	Valor
In situ	Pano de alvenaria de tijolo ou parede de betão armado *in situ*	Estrutura e envelope *in situ*	1
Prefabricada parcialmente em betão armado ou aço estrutural	Pano de chapa metálica *in situ*	Estrutura e envelope parcialmente prefabricados	2
Prefabricada totalmente em betão armado ou aço estrutural	Paineis prefabricados de alvenaria, betão armado ou chapa metálica	Estrutura e envelope totalmente prefabricados	3
Prefabricada parcialmente com materiais biogénicos	Pano de alvenaria de materiais biogénicos ou naturais *in situ*	Estrutura e envelope parcialmente prefabricados com materiais biogénicos ou naturais	4
Prefabricada totalmente com materiais biogénicos	Paineis prefabricados de materiais biogénicos ou naturais	Estrutura e envelope totalmente prefabricados com materiais biogénicos ou naturais	5

Tabela 51 – Classificação do Potencial de Circularidade de um edifício

Classificação Potencial de Circularidade			
Materiais	Flexibilidade	Desconstrução	Valor
Predominantemente de base cimentícia e alvenaria húmida	Estrutura de vão curto e paredes divisórias em alvenaria de tijolo	Demolição total	1
Predominantemente de base metálica e alvenaria húmida	Estrutura de vão intermédio e paredes divisórias em alvenaria de tijolo	Descontrução parcial da estrutura	2
Predominantemente de base cimentícia e alvenaria seca	Estrutura de vão curto e paredes divisórias em alvenaria seca autoportante	Desconstrução parcial da estrutura e total do envelope	3
Predominantemente de base metálica e alvenaria seca	Estrutura de vão intermédio e paredes divisórias em alvenaria seca autoportante	Desconstrução total da estrutura e total do envelope	4
Predominantemente de base biogénica e natural	Estutura de vão largo e paredes divisórias em alvenaria seca autoportante	Desconstrução total da estrutura, do envelope e das paredes divisórias	5

As duas escalas foram aplicadas nos três casos para cada uma das variáveis em estudo (*S, E, A; M, F, D*). Deste modo, propõe-se refletir sobre as respetivas qualidades no sentido da circularidade dos edifícios: quanto maior o valor obtido na escala, maior o grau de circularidade ("quanto maior, melhor") (Tabela 52).

Tabela 52 – Classificação *Fp* e *Pc* do Caso 1 (k_1)

	Fatores de Projeto			Potencial de Circularidade		
	Estrutura	Envelope	Arquitetura	Materiais	Flexibilidade	Desconstrução
	S	F	A	M	F	D
C1	4	2	4	4	5	3

Seguidamente, pretende-se gerar a Matriz do Grau de Circularidade (M_{GC}), onde, para cada posição (*AM*, *RM*…*DS*), se calcula a média entre os respetivos valores, obtidos a partir de cada uma das variáveis (Tabela 53):

Tabela 53 – Matriz Grau de Circularidade do Caso 1 (K_1)

CASO 1			MATRIZ GRAU DE CIRCULARIDADE		
FATORES DE PROJETO	ARQUITETURA	A	4	4,5	3,5
	ENVELOPE	E	3	3,5	2,5
	ESTRUTURA	S	4	4,5	3,5
			M	F	D
			MATERIAIS	FLEXIBILIDADE	DESCONSTRUÇÃO
			POTENCIAL DE CIRCULARIDADE		

1,0 - 1,9: Circularidade mínima ou inexistente
2,0 - 2,9: Circularidade fraca
3,0 - 3,9: Circularidade média
4,0 - 4,9: Circularidade forte
5,0: Circularidade muito forte

O resultado plasmado nas nove combinações da matriz K_1, pode também ser visualizado de uma forma cromática, de modo a facilitar a sua leitura e de acordo com a respetiva legenda (Ilustração 235):

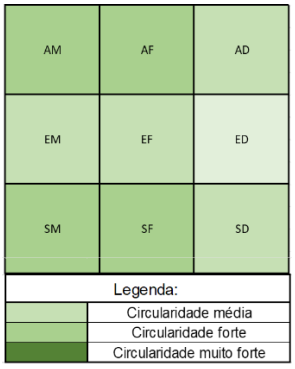


Ilustração 235 – Representação cromática das nove posições da Matriz Grau de Circularidade K_1. (Ilustração nossa, 2025)

Repetindo o processo, a classificação atribuída às variáveis de *Fp* e *Pc* do Caso 2 é a seguinte (Tabela 54):

Tabela 54 – Classificação *Fp* e *Pc* do Caso 2 (K_2)

	Fatores de Projeto			Potencial de Circularidade		
	Estrutura	Envelope	Arquitetura	Materiais	Flexibilidade	Desconstrução
	S	E	A	M	F	D
C2	5	5	4	5	4	5

Em consequência, obtém-se a respetiva Matriz do Grau de Circularidade (Tabela 55)…

Tabela 55 – Matriz Grau de Circularidade do Caso 2 (k_2)

CASO 2			MATRIZ GRAU DE CIRCULARIDADE		
FATORES DE PROJETO	ARQUITETURA	A	4,5	4	4,5
	ENVELOPE	E	5	4,5	5
	ESTRUTURA	S	5	4,5	5
			M	F	D
			MATERIAIS	FLEXIBILIDADE	DESCONSTRUÇÃO
			POTENCIAL DE CIRCULARIDADE		

1,0 - 1,9: Circularidade mínima ou inexistente
2,0 - 2,9: Circularidade fraca
3,0 - 3,9: Circularidade média
4,0 - 4,9: Circularidade forte
5.0: Circularidade muito forte

… e a representação cromática da M_{GC}

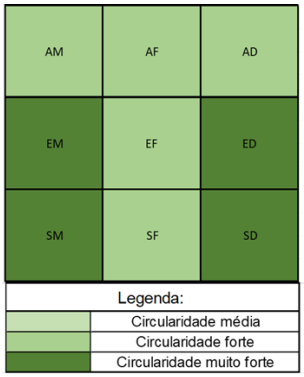


Ilustração 236 – Representação cromática das nove posições da Matriz Grau de Circularidade K_2. (Ilustração nossa, 2025)

Seguem-se os mesmos três passos do processo, iniciando-se com a atribuição da classificação aos Fatores de Projeto e ao Potencial de Circularidade do Caso 3 (Tabela 56):

Tabela 56 – Classificação *Fp* e *Pc* do Caso 3 (K_3)

	Fatores de Projeto			Potencial de Circularidade		
	Estrutura	Envelope	Arquitetura	Materiais	Flexibilidade	Desconstrução
	S	E	A	M	F	D
C3	5	5	5	5	5	5

Donde resulta a elaboração da matriz M_{GC} (Tabela 57)…

Tabela 57 – Matriz Grau de Circularidade do Caso 2 (K_3)

CASO 3			MATRIZ GRAU DE CIRCULARIDADE		
FATORES DE PROJETO	ARQUITETURA	A	5	5	5
	ENVELOPE	E	5	5	5
	ESTRUTURA	S	5	5	5
			M	F	D
			MATERIAIS	FLEXIBILIDADE	DESCONSTRUÇÃO
			POTENCIAL DE CIRCULARIDADE		

1,0 - 1,9: Circularidade mínima ou inexistente
2,0 - 2,9: Circularidade fraca
3,0 - 3,9: Circularidade média
4,0 - 4,9: Circularidade forte
5.0: Circularidade muito forte

…E , como última etapa, a correspondente matriz cromática (Ilustração 237):

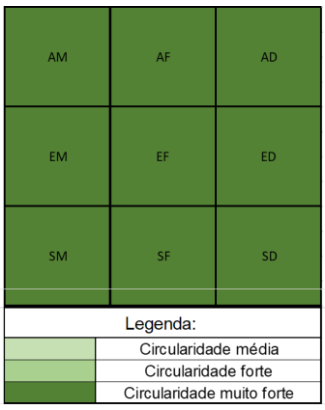


Ilustração 237 – Representação cromática das nove posições da Matriz Grau de Circularidade K_3. (Ilustração nossa, 2025)

Tabela 58 – Tabela sinóptica do valore das nove posições *Gc* das matrizes K_1, K_2 e K_3.

	Grau de Circularidade								
	AM	EM	SM	AF	EF	SF	AD	ED	SD
C1	4	3	4	4,5	3,5	4,5	3,5	2,5	3,5
C2	4,5	5	5	4	4,5	4,5	4,5	5	5
C3	5	5	5	5	5	5	5	5	5

1,0 - 1,9: Circularidade mínima ou inexistente
2,0 - 2,9: Circularidade fraca
3,0 - 3,9: Circularidade média
4,0 - 4,9: Circularidade forte
5.0: Circularidade muito forte

Em termos gerais, para a obtenção do valor final do Grau de Circularidade (Gc_k) de cada projeto a analisar, considera-se a média dos valores obtidos para cada matriz M_{GC}, em função do número de variáveis consideradas dos Fatores de Projeto (n) e do Potencial de Circularidade (m) (Equação 6):

Equação 6 – Equação do valor do Grau de Circularidade de um edifício com n x m variáveis

$$\mathrm{Gc}_k = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} xij}{n\,x\,m}$$

No caso concreto deste trabalho, o Grau de Circularidade de cada um dos casos, suscetível de seriar os projetos em termos de sua maior ou menor circularidade, é a média dos valores obtidos para cada uma das matrizes (K_1, K_2, K_3), com nove (3 x3) variáveis (Equação 7):

Equação 7 – Equação do valor do Grau de Circularidade de um edifício com 3 x 3 variáveis

$$\mathrm{Gc}_k = \frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{3}\sum_{\mathrm{j}=1}^{3} \mathrm{x_{ij}}}{9}$$

Os resultados correspondentes aos três casos de estudo são apresentados numericamente na tabela abaixo (Tabela 59) e representados de forma cromática na ilustração 238.

Tabela 59 – Valores do Grau de Circularidade (G_{ck}) dos três casos de estudo

	Grau de Circularidade	
	Valor	Classificação
C1	3,7	Circularidade média
C2	4, 7	Circularidade forte
C3	5	Circularidade muito forte

Do acima exposto, com base nas escalas de medição propostas, pode-se concluir que existem, em maior ou menor grau, princípios de construção circular nos três projetos, sendo o Caso 1 (Redbridge School) classificado como "circularidade média", o Caso 2 (MUDA Reserve) como "forte", e, por último, o Caso 3 (edifício Rocket) como "muito forte", o que vai ao encontro da perceção do autor.

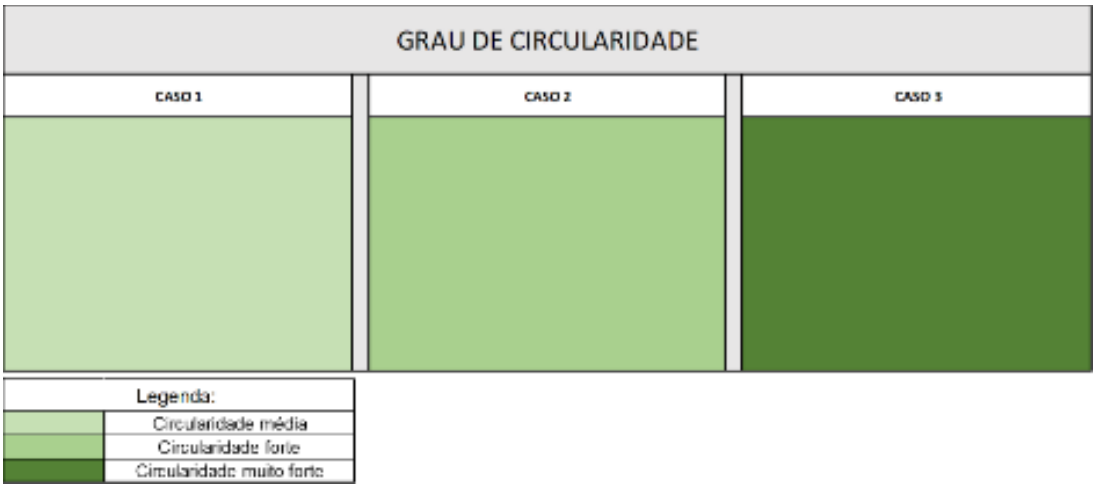


Ilustração 238 – Representação cromática dos valores médios das matrizes K_1, K_2 e K_3. (Ilustração nossa, 2025)

Este exercício não foi executado com a finalidade de elaborar uma seriação, visto que cada projeto foi desenvolvido em contextos e tempos distintos, mas sim como exemplos ilustrativos da transição para a construção circular, já em curso. Trata-se, simplesmente, de um exercício exploratório no sentido do eventual desenvolvimento de uma ferramenta de avaliação de circularidade de edifícios, à disposição de arquitetos e projetistas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONSIDERAÇÕES

Esta investigação resulta da oportunidade de poder contribuir para o necessário aprofundamento do conhecimento relacionado com a transição para a construção circular em Portugal, seguindo a estrutura conceptual delineada, baseada numa abordagem metodológica predominantemente qualitativa, e com a finalidade de dar respostas às perguntas de investigação colocadas anteriormente.

Desse modo, o autor considerou relevante as seguintes questões: considerando a atual situação do setor da construção no país, será viável uma transição no sentido da sustentabilidade e da circularidade, com vista a constituir uma alternativa válida em termos de materiais, produtos e sistemas construtivos, indo ao encontro das necessidades do país? E nesse caso, teremos um edificado substancialmente mais saudável e eficiente, em termos ambientais e energéticos, comparativamente ao convencional? E para esse objetivo, estarão os projetistas, nomeadamente os arquitetos, motivados e capacitados para promover e liderar essa transição no momento atual?

A transição para a construção circular é uma temática atual e incontornável, contudo ainda pouco desenvolvida no terreno, pelo que este trabalho pretende ser uma reflexão e um contributo nesse sentido. Para esse efeito recorreu-se a métodos como revisão bibliográfica (estado da arte), ensaios laboratoriais (parametrização) e estudo de casos (exemplificação), com a expectativa de obter resultados, em consonância com os objetivos propostos.

Nesta sequência, passam-se a descrever as principais considerações retiradas da investigação, segundo a estrutura orientadora da tese:

O desenvolvimento sustentável é um conceito que relaciona o impacto da atividade humana com os limites da biosfera no longo prazo, sendo o setor da construção um dos mais impactantes e cruciais para a sua prossecução. A construção sustentável, que visa harmonizar o capital natural com o ambiente construído, é um passo fundamental nessa direção.

O crescimento exponencial da população mundial e da economia é cada vez mais insustentável perante a evidência da finitude dos recursos naturais no médio e longo

prazo. “Estado estacionário” é a designação atribuída ao modelo económico e financeiro compatível com os ecossistemas e socialmente justo e equitativo, em alternativa à atual e convencional economia progressiva.

O estado estacionário encontra-se plasmado nos cinco axiomas da sustentabilidade (Heiberg, 2008), mais especificamente no axioma de Bartlett (o crescimento populacional e/ou o crescimento das taxas de consumo dos recursos não é sustentável), e no terceiro (para ser sustentável, o uso de recursos não renováveis deve seguir uma taxa que deverá ser inferior ou igual à taxa de reposição).

O conceito de sustentabilidade, assente nos seus três pilares (ambiental, social e económica), tem o objetivo de prosseguir e implementar o desenvolvimento sustentável, e inclui implicitamente o reconhecimento dos limites do planeta e a impossibilidade de expansão ilimitada da população e da economia.

A construção sustentável, deriva diretamente do conceito de desenvolvimento sustentável, onde além das três dimensões clássicas (*triple bottom line*) fará sentido acrescentar uma quarta (cultural), tendo em conta a preservação e transmissão do património edificado às gerações futuras.

O setor da construção, para além da sua importância económica, tem um impacte ambiental superior a qualquer outra atividade ou setor, sendo essencial para o cumprimento do Acordo de Paris, ou seja, para a descarbonização da economia mundial.

Assim, conceber e construir edifícios na base da eficiência carbónica e energética vai ao encontro do preconizado da Agenda 2030 e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Porém, tal só terá consequências efetivas se o setor reduzir para metade (50%) o carbono operacional e incorporado até 2030, tendo como meta a neutralidade carbónica em 2050.

Para atingir este desiderato, a nível mundial e nacional, é necessária uma abordagem integrada do setor AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção), de forma coordenada e eficaz indo ao encontro das novas tendências do mercado, como a sustentabilidade, a economia circular e a construção modular.

Sustentabilidade e economia circular são dois conceitos diretamente relacionados, tendo como objetivo a implementação do desenvolvimento sustentável, através da

ecoeficiência e promovendo a ecoinovação aplicada a produtos e serviços, no contexto dos ODS.

A economia circular é definida como um sistema industrial restaurativo e regenerativo, introduzindo uma distinção entre a tecnosfera e a biosfera, com o objetivo final de reverter a relação direta entre o crescimento económico, o bem estar social e o consumo de recursos naturais finitos.

Os fluxos tecnológicos, derivados da tecnosfera, deverão ser concebidos de modo a assegurarem ao máximo a recuperação do valor económico, dos materiais e da energia, e os biológicos, devolvidos à biosfera, de forma a regenerar o ecossistema e a fornecer a economia com materiais renováveis.

O facto de a população mundial poder vir a atingir a cifra de 9,7 mil milhões de habitantes até 2050, implicará forçosamente a uma pressão insustentável sobre os recursos naturais, o que será um importante fator para a imperiosa transição para a economia circular, onde os recursos naturais são aplicados aos ciclos técnicos.

Numa economia regenerativa, apenas deverá ser considerada a utilização de materiais renováveis (*bio-based*) no início do ciclo de vida, em alternativa aos de base fóssil e mineral, com a possibilidade de compostagem ou de recuperação de energia no final do ciclo, em lugar da linear deposição em aterro, ou (a nível intermédio) da reciclagem.

As energias renováveis são parte integrante e condição necessária à implementação da economia circular. Contudo, este setor também terá de obedecer aos princípios da economia circular, minimizando o significativo impacte ambiental resultante do fabrico dos equipamentos, pelo que os materiais renováveis também deverão ser utilizados para essa finalidade.

A cidade regenerativa (Ecopolis), além dos edifícios e infraestruturas, é dotada de um metabolismo circular que pressupõe a perfeita complementaridade entre os ciclos técnicos e biológicos, sendo alimentada exclusivamente por energias renováveis, constituindo um modelo de circularidade para os ajuntamentos urbanos.

Para este objetivo, a biomimética (a imitação da natureza, com vista à compatibilização do sistema técnico e produtivo com a biosfera) é um ativo no sentido da inovação sustentável, envolvendo o design e a biologia, com aplicações à arquitetura e à engenharia.

Enquanto conceito estruturante da economia circular, designa-se por bioeconomia ao conjunto de atividades económicas que utilizam matérias-primas provenientes da agricultura, silvicultura ou algacultura, potenciada pela biotecnologia com vista à obtenção de novos materiais, produtos ou serviços.

Entre os vários setores suscetíveis de aplicação, encontra-se o da construção, possibilitando a transição de um paradigma baseado em materiais de origem mineral para um outro predominantemente de biomateriais, possibilitando a valiosa sequestração de carbono pelos elementos construtivos.

Nesta linha, há a destacar a crescente divulgação e utilização de vários tipos de produtos na construção para efeitos estruturais, de revestimento ou de isolamento, obtidos a partir da silvicultura e da agricultura, valorizando dessa forma, o capital natural no contexto do desenvolvimento sustentável.

Do mesmo modo, é crucial que o edificado seja projetado e construído de forma ecoeficiente, ou seja, através de práticas e processos que conduzam à redução dos impactes ambientais em todo o ciclo de vida, traduzidas numa correlação negativa entre recursos naturais e bem-estar e, simultaneamente, tornando-se num fator positivo de combate às alterações climáticas antropogénicas.

Como pilar da economia circular, a ecologia industrial encara o sistema produtivo e económico concertado com o ecossistema em que se insere, e do qual, efetivamente, depende, sendo os efeitos das atividades humanas analisados através de um painel de ferramentas, entre as quais a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), ao nível empresarial.

O conceito de ecologia da construção, elaborado por Kibert *et. al.* (2000), deriva diretamente dos princípios da ecologia industrial, de modo a garantir que os edifícios sejam concebidos de uma forma mais sustentável e circular, tal como nos Princípios de Hannover (1992); um guia orientador para arquitetos e projetistas envolvidos no ambiente construído da Expo 2000, em Hannover (Alemanha).

A Indústria 4.0 ou “quarta revolução industrial” (2011), vai ao encontro da construção sustentável e circular através da utilização eficiente dos recursos naturais, de novas tecnologias digitais, de materiais e de processos, tornando viável a desmaterialização, a descarbonização e a redução de resíduos, tendo, entretanto (2021), evoluído para o

conceito de Indústria 5.0, caracterizada por, além do mais, ser sustentável, resiliente e centrada nas pessoas.

A implementação da i4.0 é feita a partir das Tecnologias de Largo Espectro (KETs), diretamente relacionadas com a implementação da economia circular, sendo de especial relevância para a arquitetura as tecnologias de “manufatura avançada” e de “materiais avançados e nanomateriais”, que abrangem a manufatura aditiva (3D) e os biomateriais.

A abordagem de ciclo de vida é fundamental para determinar o impacte ambiental de um edifício, contabilizando efetivamente todas as suas fases, desde a extração à desconstrução e deposição, sem a transposição das cargas ou os benefícios ambientais de uma fase para a outra.

Em contraste com o paradigma linear, onde existe um fluxo de materiais aberto (do berço-à-cova), na economia circular os materiais e produtos fecham os ciclos e mantêm valor ao longo do tempo, numa abordagem do berço-ao-berço (*cradle-to-cradle*), focada na ecoeficácia.

O modelo de conceção C2C (McDonough e Braungart) é focada na ecoeficácia e baseia-se em três princípios capitais: zero resíduos, energias renováveis e diversidade, prestando uma especial atenção à composição molecular dos materiais ,de modo a permitir uma reciclagem de qualidade e a contínua reutilização dos nutrientes técnicos e biológicos.

A metodologia ACV é utilizada para a determinação dos impactes ambientais de um material, produto ou serviço, ao longo de todas as etapas do ciclo de vida, sendo de realçar o seu papel para a descarbonização do edificado, nomeadamente através do indicador Potencial de Aquecimento Global (GPW), refletindo o carbono incorporado nas várias fases.

De notar que, de modo explícito, fica demonstrado por este indicador, que a utilização de sistemas prefabricados e/ou modulares contribui de modo significativo para a diminuição do carbono incorporado, não sendo função apenas do tipo de material (ecoeficiência), mas também do sistema construtivo (*ecodesign*).

Como se pode comprovar pelo indicador GPW, a madeira e todos os materiais de construção renováveis apresentam, não só, um forte potencial de redução do carbono

incorporado, como também têm a capacidade de remover carbono da atmosfera (carbono biogénico), indo ao encontro dos princípios da construção sustentável.

A arquitetura sustentável, que determina a existência da construção sustentável, situa-se na interseção da sustentabilidade, da ecologia e do desempenho, materializado em três componentes transversais: materiais e tecnologias, recursos e ambiente, de modo a construir edifícios de reduzido impacte, utilizando materiais e tecnologias sustentáveis, com vista à obtenção de edifícios de alto desempenho.

A construção regenerativa respeita a uma conceção ainda mais integrativa e holística, de modo a alcançar um impacte ambiental positivo e tratando o edificado como parte do ecossistema, contribuindo para produzir e partilhar água, oxigénio, energia e alimentos.

A construção circular resulta da aplicação dos princípios da economia circular ao setor da construção, almejando contribuir positivamente para a restauração e regeneração do sistema construído, mediante uma conceção que minimize os resíduos e a poluição, mantenha os materiais e produtos em circulação no máximo de tempo e valor e utilize energia e materiais renováveis, não tóxicos.

A adoção do modelo de construção em seis camadas (*S-layers* de Brand), compostas de diferentes materiais, funções e durabilidade, é essencial para a circularidade do edificado, possibilitando dessa forma a minimização de resíduos, a adaptabilidade e a fácil e exequível desconstrução, além da prévia necessária seleção criteriosa dos materiais, segundo os critérios adequados.

Os vários sistemas de certificação de sustentabilidade de edifícios têm vindo, nas suas últimas versões, ao encontro da economia circular, integrando conceitos e estratégias. De destacar o Circular Building Assessment, uma metodologia especialmente desenvolvida no contexto do BAMB, permitindo avaliar, entre outros parâmetros mais convencionais, o potencial de reutilização do edifício, em função da arquitetura e dos materiais utilizados, potenciando o projeto para a desconstrução e a utilização de passaportes de materiais, a partir da interação com a ferramenta BIM.

O Novo Bauhaus Europeu é um estímulo à adaptação e reabilitação do edificado, e à utilização de soluções baseadas na natureza, nomeadamente, materiais de construção renováveis, apontando para que a arquitetura circular e sustentável seja o novo normal,

com vista à descarbonização é à minimização da poluição e da delapidação dos recursos naturais por parte do setor da construção.

De igual modo, a nova Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD), realça o papel da neutralidade climática e a circularidade nos edifícios, integrando a quantificação obrigatória do GWP, a eliminação progressiva de combustíveis fósseis, a integração de energia solar e as soluções baseadas na natureza, com o objetivo de alcançar um parque imobiliário com emissões nulas até 2050.

Tal ideia também consta da Estratégia para a Sustentabilidade do Ambiente Construído, no âmbito do nPAEC, onde se sublinha que, para alcançar a neutralidade carbónica do setor, é não só necessário reduzir as emissões de carbono, mas, igualmente, sequestrá-las mediante a utilização de construções de madeira e de outros materiais de base biológica.

Já o Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal chama a atenção para a relevância dos projetistas, instituições de ensino superior, laboratórios e centros tecnológicos das áreas da arquitetura e construção (engenharia e materiais), na transição para a construção circular.

A arquitetura contemporânea é um movimento que se desenvolveu-se a partir do movimento modernista, num ambiente de forte desenvolvimento técnico, científico e industrial do seculo XIX., permitindo construir com sistemas reticulados e materiais tecnológicos como o aço, o betão armado ou o vidro, adaptados à sociedade moderna e cujos cinco princípios foram sumamente explicitados por Le Corbusier.

Neste contexto, merece especial destaque a arquitetura orgânica e a sua relação com a natureza, com a paisagem e com os materiais naturais, no sentido de uma integração harmoniosa com o ambiente, e exemplarmente materializada nos trabalhos de F.L.Wright e Alvar Aalto.

Embora difícil de caracterizar devido à sua heterogeneidade, podem-se identificar quatro características principais da arquitetura contemporânea, entre as quais a sustentabilidade, pela utilização de novos materiais e sistemas construtivos, pela adoção de medidas de eficiência energética e hídrica, pela integração de energias renováveis nos edifícios, bem como pelo recurso a sistemas de certificação, como forma de reconhecimento e valorização do imobiliário.

Os aspetos económicos são importantes e incontornáveis num projeto, e por isso, a arquitetura também deverá levar em consideração os respetivos custos económicos e os impactes ambientais e sociais, abarcando o conceito da "arquitetura socioeconómica", conjugando arquitetura e economia na perspetiva do desenvolvimento sustentável, promovendo simultaneamente os valores culturais e estilos vernaculares, em detrimento da globalização.

Para alcançar esse desiderato, a arquitetura terá de prosseguir critérios de ecoeficiência nas soluções preconizadas, e não apenas os relacionados com a estética ou a forma, assumindo o facto de o ambiente construído ser parte integrante do ecossistema, em linha com os princípios regenerativos da economia circular, tirando partido dos materiais renováveis e das soluções baseadas na natureza.

As necessidades de habitação de uma população mundial em crescimento exponencial, leva a que considere a escolha dos materiais de construção como um fator crítico no combate às alterações climáticas, tendo em conta as emissões e polução associadas, tornando a sustentabilidade um tema central e indissociável da arquitetura contemporânea.

Em consequência da Agenda 2030 e dos ODS, a construção circular emana como uma prioridade para a arquitetura com o objetivo de maximizar o valor ambiental, social e económico, a partir do projeto arquitetónico, com vista à diminuição da intensidade e quantidade (valor) do impacte ambiental dos edifícios.

De salientar, que a maioria dos impactes do setor se devem aos edifícios unifamiliares, seguidos dos multifamiliares e, a larga distância, dos edifícios em altura, o que pode contradizer as expetativas, sendo, no primeiro caso, desmedidos em relação à área útil habitável.

Uma das evidências relacionadas com este aspeto é a importância relativa do impacte ambiental das paredes exteriores dos edifícios unifamiliares, nas fases de construção e operacional, com vista a atender às necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, sendo influenciadas pelos materiais utilizados e pelo volume e geometria do edifício.

A relação da habitação com a saúde humana é um facto, sendo que a existência de conforto térmico e acústico e a qualidade do ar interior dependem diretamente de os

materiais utilizados estarem relacionados, também, com a saúde e a segurança dos utentes, averiguando da sua eventual toxidade, salubridade e características termohigrométricas.

O objetivo de conceber e realizar edifícios e urbanizações mais saudáveis é, embora pouco reconhecido, um dos principais objetivos da construção sustentável e circular. Estando baseado nos princípios holísticos da saúde planetária e nos ODS, o setor da construção pode, e deve, também ser um instrumento de saúde pública, ao promover ambientes saudáveis e descontaminados, no âmbito do desenvolvimento sustentável.

A tectónica reflete a importância dos materiais e das tecnologias de construção na materialização da arquitetura, o que, em termos de sustentabilidade, significa que devem ser considerados os de mínimo impacte ambiental e de riscos para a saúde humana, e em que tanto a energia como os próprios materiais provenham de fontes renováveis.

A mudança para materiais renováveis, de baixo carbono e alta circularidade, como alternativa aos materiais de origem mineral, constitui, a par da desconstrução seletiva, uma revolução na maneira de construir edifícios, infraestruturas e cidades, sendo um fator decisivo na descarbonização do setor.

A arquitetura é essencial para a prescrição sustentável de materiais e sistemas em sede de projeto, privilegiando a extensão da vida útil, a reabilitação e a desconstrução do edifício, em detrimento da obra nova e da demolição, implementando princípios e roteiros de conceção para a circularidade, baixo carbono e desconstrução.

Em sentido lato, o conceito de “baixo-carbono” abrange todo o carbono emitido ao longo das várias fases do ciclo de vida, e não, exclusivamente, ao operacional. O carbono incorporado, associado aos materiais e aos processos de construção, representa uma quarta parte das emissões totais, o que é significativo e reflete a energia envolvida.

Por esse motivo, a nova EPBD contempla a obrigatoriedade do cálculo do Potencial de Aquecimento Global (GPW), como métrica do carbono incorporado nos materiais de construção, recomendando a utilização de materiais renováveis, suscetíveis de sequestrar e armazenar carbono.

Uma chamada de atenção para a muito provável existência de ondas de calor, em consequência das alterações climáticas, e a necessária proteção térmica da envolvente,

salientando a inércia térmica (em contraponto à ligeireza dos atuais sistemas construtivos), a proteção solar e o arrefecimento passivo, como formas de manter o conforto e de combater a pobreza energética que atinge uma grande parte da população portuguesa e europeia.

De notar que a descarbonização e o desempenho energético de um edifício abrangem todos os componentes, tais como a estrutura, os isolamentos e os revestimentos para a energia incorporada, assim como os sistemas de aquecimento e arrefecimento e a utilização de energias renováveis, no aspeto da energia operacional., de modo a poder obter edifícios de energia quase-nula, ou mesmo, carbono positivo.

Tal só será possível com a redução do carbono incorporado e operacional, através de alterações mais ou menos profundas da conceção e construção dos edifícios, mas sobretudo devido à contabilização do carbono biogénico, sequestrado naturalmente ou pela via tecnológica pelo material, e que poderá ser de cultura de origem vegetal (p.e., madeira), de laboratório (p.e., micélio) ou mineral (p.e., biochar).

A utilização destes materiais, principalmente para aplicação em estruturas e isolamentos, é uma estratégia simples e viável e que impacta fortemente na sustentabilidade do edificado a reabilitar e a construir, constituindo, juntamente com a utilização de energias renováveis e das medidas de eficiência energética, a tríade da descarbonização do setor.

No paradigma atual, uma envolvente com elevada inércia térmica é sinónimo de uma fachada (e cobertura) pesada e espessa, executada a partir de materiais de origem mineral, como a alvenaria ou o betão. Porém, a inércia térmica de um material ou sistema construtivo é, não só, resultado da sua densidade (relacionada com o peso) e condutibilidade (traduzida em espessura), mas também do respetivo calor específico.

Esta grandeza física tem sido subvalorizada, ou mesmo ignorada, pelos fabricantes de materiais de construção e projetistas, sendo que é possível executar envolventes a partir de materiais renováveis (p.e., fibras de cânhamo), que reúnam as características de elevada inércia térmica, baixa densidade (peso) e elevado calor específico, adequados à prefabricação ligeira e alinhados com os princípios da economia circular.

Ao contrário dos materiais de isolamento convencionais, muitos deles de origem fóssil, é normal que os sistemas elaborados à base de materiais renováveis assumam valores

de atraso térmico elevados (igual ou superior a 12 horas), com todas as vantagens inerentes técnicas e económicas, reduzindo passivamente, e de modo substancial, as necessidades energéticas.

Devido às propriedades termohigrométricas dos materiais renováveis, é possível conceber sistemas construtivos de alto desempenho térmico e acústico, contribuindo para solucionar problemas recorrentes da construção em Portugal como condensações, humidades e qualidade do ar interior, que afetam decisivamente o bem-estar e a qualidade de vida dos utentes.

Os materiais renováveis (e outros a que aplicou o ecodesign) constituem uma alternativa circular que é económica, técnica e ambientalmente vantajosa, podendo ser aplicada a edifícios de todas as tipologias e dimensões (pequeno, médio e grande porte), e aos vários elementos construtivos, em sinergia com a prefabricação, a desconstrução seletiva e a reutilização.

Tendo em conta que, por parte dos arquitetos nacionais, ainda existe um patamar relativamente baixo de conhecimentos relacionados com circularidade, e que a taxa de circularidade da construção em Portugal se situa em 2,3%, muito abaixo da Espanha (10%) e da média europeia (12%), será legítimo apontar os projetistas de arquitetura (e de engenharia) como um alvo estratégico de capacitação para a construção circular.

Em termos gerais, pode-se reconhecer quatro grandes princípios ou tendências de projeto para a construção circular: construir eficientemente; construir com os materiais adequados; construir para o longo-prazo; reabilitar e renovar.

Para os implementar, a correta seleção de materiais é fundamental (o que constitui uma oportunidade para a arquitetura contemporânea), assim como o correto enquadramento da questão da adaptabilidade, durabilidade e reutilização, respeitantes à versatilidade e à conversibilidade dos espaços, à maximização da vida útil e à utilização de secundários, sendo para isso imperioso projetar de acordo com o princípio das camadas construtivas e com uma forte colaboração entre a arquitetura e a engenharia.

Tendo a arquitetura características fortemente interdisciplinares, esta deverá ser capaz de articular e coordenar a informação das várias áreas de conhecimento ou disciplinas, de forma a entregar um projeto de qualidade ou integrado, com uma equipa alargada de

projetistas e *stakeholders*, articulada pelo BIM, possibilitando a colaboração relevante e não-redundante.

Os edifícios devem ser considerados como um sistema composto por materiais, componentes e subsistemas que interagem com os fenómenos físicos externos, com a finalidade de atingir um nível adequado de desempenho ou de agradabilidade, considerando as interações entre os vários elementos constituintes, dos quais, os ocupantes são parte.

Envolvente, ocupantes, instalações, local e clima são os elementos primários constituintes de um sistema, sendo que aquele com maior relevância para a obtenção de um edifício de alto desempenho é a envolvente ou envelope, tendo em conta o seu papel no controlo passivo do ambiente interno, designadamente, os aspetos termohigrométricos e a qualidade do ar interior.

A circularidade de um sistema edificado só poderá ser assegurada pela desconstrução, projetando para a adaptação e a reversibilidade, potenciando a flexibilidade estrutural, espacial e material e, desse modo, promovendo a reutilização em lugar da remanufactura, reciclagem, ou mesmo, a compostagem.

Tão importante como o projeto de desconstrução e a construção em camadas é o interface entre elas, garantida pelas ligações mecânicas e reversíveis, em vez das químicas e permanentes, como no caso da construção convencional ou prefabricada, quando utilizam ligações cimentícias ou soldaduras, em lugar de ligações aparafusadas ou de encaixe.

Consequentemente, um edifício sustentável e circular é aquele que para além de ser eficiente, saudável, estético, durável, social e economicamente valorizado é também suscetível de ser facilmente desconstruído, no todo ou em parte, com o intuito de os seus componentes fornecerem um banco de materiais, a partir de um mercado de materiais secundários, suportados por passaportes digitais, BIM e outras tecnologias digitais (Blockchain e RFID).

Contudo, a abordagem de considerar os edifícios como um banco de materiais (BAMB) só poderá ser possível mediante a implementação de novos modelos de negócio, em contraste com os atuais modelos lineares, incluindo a logística reversa, a extensão da vida útil, produto-como-um-serviço (servitização), entre outras.

A implementação generalizada da logística reversa é indispensável para a recolha, conforme os casos, de materiais secundários recolhidos da desconstrução seletiva, para reutilização ou remanufactura, ou de resíduos provenientes da demolição para reciclagem ou utilização como matéria-prima para outras indústrias, num modelo de simbiose industrial.

Como documento orientador, o Plano de Ação para a Circularidade na Construção (PACC) contempla os vários aspetos relativos á conceção circular de projetos de edifícios em Portugal.

Como forma de ilustração e de validação, elencam-se três casos de estudo, considerados dos mais relevantes no momento da elaboração da tese: dois nacionais (Caso 1 e Caso 2) e um outro internacional (Caso 3).

O fator comum aos três casos é a estrutura de madeira (*bio-based*), quer seja na forma de estrutura reticulada (Caso 1 e Caso 3)) ou em painel com estrutura interior de madeira (Caso 2), sendo este o fator mais distintivo da circularidade.

Constata-se que o envelope, apesar da sua importância, nem sempre é objeto de atenção especial, no que respeita à seleção de isolamentos ou de revestimentos de materiais renováveis ou naturais circulares (Caso 1), embora com um grau de circularidade superior ao convencional.

Em qualquer dos casos, é reconhecido o potencial estrutural e ambiental da madeira para edifícios de pequeno (Caso 2), médio (Caso 1) e grande porte (Caso 3), em alternativa às tradicionais estruturas de betão ou de aço, baseada na prefabricação, de modo a possibilitar não só uma construção rápida e com o mínimo de resíduos, mas também a descarbonização, adaptação, flexibilidade e desconstrução seletiva.

Saliente-se que tanto a eficácia, como a eficiência da desconstrução são diretamente proporcionais à quantidade de componentes prefabricados ligados de forma reversível e mecânica, a qual também poderá ser alargada às fundações (Caso 2) e revestimentos (Caso 1 e 3), aplicando, empírica e parcialmente, o modelo de construção por camadas.

Essa característica, que contrasta fortemente com as ligações químicas da construção convencional, a qual constitui um obstáculo à desconstrução seletiva, tem grande influência no respetivo Potencial de Circularidade, assim como os materiais utilizados e

a flexibilidade dos espaços, os quais, juntamente com os Fatores de Projeto (estrutura, envelope e arquitetura) constituem a matriz de Grau de Circularidade.

A sua aplicação aos três casos, conforme explanado, levou à atribuição da classificação de circularidade média, forte e muito forte para os casos 1, 2 e 3, respetivamente. Constata-se também que a adoção de materiais, produtos e sistemas construtivos (mais) circulares não constituiu um obstáculo ou restrição do ponto de vista arquitetónico.

Sobressai ainda um outro elemento comum aos casos em estudo: o papel do promotor, fundamental e determinante para a implementação de soluções mais sustentáveis e circulares, assumindo os riscos económicos e técnicos inerentes à inovação, do qual é exemplo cabal um edifício de 100 metros de altura, executado integralmente com estrutura porticada de madeira (Caso 3).

5.2. CONCLUSÕES

Tendo em conta os resultados acima indicados, pode-se concluir que, apesar de ainda incipiente, nada obsta a que se possa desenvolver um mercado nacional de materiais e produtos de construção orientado para a construção sustentável e circular, a partir da procura gerada pelos projetos de arquitetura.

À semelhança de outros casos, o facto de Portugal estar integrado económica e socialmente na União Europeia, conduzirá inexoravelmente, e por força das tendências, da capacitação e da legislação, a um crescendo da adoção de soluções construtivas sustentáveis e circulares, e a uma cada vez maior taxa de penetração no mercado.

No entanto, o aumento da eventual demanda originada pelo incremento da prescrição pode esbarrar na incapacidade de resposta do mercado, sob a forma de regulamentos de construção obsoletos e do número reduzido de projetistas e de empresas com vocação e capacidade, pelo que se poderá ter de considerar a transferência de *know-how*, tal como está a suceder com algumas construtoras de referência.

Recentemente, têm vindo a público vários projetos de edifícios de habitação e hotelaria de média e grande dimensão, a serem executados com estrutura em madeira engenheirada e certificação de sustentabilidade. De igual modo, verifica-se a entrada

de novos fabricantes localizados em território nacional e a maior notoriedade de empresas já existentes, o que é um *proxy* da competitividade dos produtos.

Finalmente, a promoção imobiliária, em grande parte com ligações internacionais, tem sido, e será, com a sua resiliência e capacidade de iniciativa, um fator determinante para o lançamento e disseminação destas soluções, indo ao encontro das necessidades do mercado, de momento, ainda maioritariamente dirigido para o segmento alto.

Contudo, e tendo em linha de conta a oportunidade gerada pelos atuais problemas derivados da falta de habitação no país, é de prever que a construção prefabricada e modular venha a ter uma aceitação massiva por parte do poder político e do meio técnico nacional, podendo utilizar preferencialmente materiais renováveis e naturais com vista à transição para a construção circular, também para fins de habitação social de custos controlados e segmento médio.

Indubitavelmente, a construção sustentável e circular é, por definição, uma construção cujos elementos construtivos deverão ser inócuos e salubres, contemplando ainda outros aspetos tais como a arquitetura, a localização, o urbanismo, os materiais, os isolamentos e revestimentos, entre outros, abrangendo os vários aspetos físicos, mentais e sociais da saúde humana.

De igual modo, a eficiência energética, não apenas do ponto de vista operacional, mas numa abordagem ampla do ciclo de vida, é a característica com maior notoriedade e inerente à construção sustentável. A construção com materiais renováveis, ou com materiais naturais, é suscetível de conferir características de atraso térmico que, além do carbono biogénico ou industrialmente sequestrado, permite reduzir de modo muito significativo o consumo de energia relativa às necessidades de energia de aquecimento e arrefecimento.

Painéis prefabricados ou blocos de materiais *bio-based*, concebidos para efeito de envelope (paredes exteriores e coberturas) são já fabricados e disponíveis em Portugal, com especial interesse para o segmento baixo e médio-baixo, tendo em conta o seu potencial de poupança de consumo e sendo um trunfo no combate à pobreza energética.

Embora exista uma aceleração na disseminação em iniciativas de formação de vários níveis relativas a este tema, de índole académica, corporativa e profissional destinadas

aos projetistas e a outros agentes do setor AEC, existe, contudo, ainda um *delay* relativamente à realidade atual, conforme se pode confirmar pelos números reduzidos de projetos e obras com características fortes de circularidade, e pelo estudo exploratório mencionado neste trabalho.

Assim, quer através da experiência profissional e académica, quer por via da investigação e da rede de contactos com especialistas, o autor julga ser correto afirmar que existe um caminho a percorrer no sentido da formação para a transição para a construção circular em Portugal, e para ao qual este trabalho pretende ser um contributo.

5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Da presente investigação conclui-se da necessidade urgente de uma abordagem sustentável ao projeto de arquitetura, com especial destaque para o fim de ciclo de vida, cuja circularidade é função, principalmente, da capacidade de desconstrução do edifício, predominantemente dependente do sistema estrutural e da envolvente.

Por essa razão, a adoção de princípios conceptuais e a existência de um projeto de desconstrução deverá fazer parte integrante de um projeto integrado de arquitetura, do qual os materiais, produtos e sistemas construtivos a prescrever são da máxima importância, devendo ser escolhidos em função das suas características estéticas, técnicas, económicas, ambientais e de salubridade.

Para essa finalidade, é possível e deverá ser implementada a adoção generalizada da utilização de Declarações Ambientais de Produto (DAPs), como critério de seleção de materiais e produtos de construção, a par das suas fichas de desempenho. De igual modo, as certificações e declarações de saúde e de circularidade relacionadas com edifícios e produtos deverão ganhar, coerentemente, o seu lugar.

A obrigatoriedade do cálculo do carbono incorporado nos edifícios novos a partir de 2026, no espaço europeu, coloca na linha da frente o alargamento destas matérias ao âmbito normal dos projetos de arquitetura (e engenharia estrutural, térmica e acústica), pelo que se torna crucial e urgente a respetiva formação especializada aos técnicos do setor.

A disseminação e futura massificação, de materiais de construção de baixo carbono, com destaque para os materiais renováveis estruturais e de isolamento, configura a integração dos objetivos de sequestração e armazenamento de carbono nos projetos de arquitetura, através da prévia quantificação do carbono incorporado e do biogénico, pelo se faz urgente a divulgação de informação e de boas práticas no mercado nacional.

Nesse sentido, torna-se crucial a formação em construção sustentável e circular dos profissionais de arquitetura, sendo necessário um reforço destas matérias nos cursos profissionais e de formação levados a cabo pelas ordens profissionais, ou outras entidades credenciadas, e nos cursos superiores de base e/ou pós-graduações, pelas instituições de ensino superior.

Relativamente aos materiais renováveis ou naturais de elevado valor de atraso térmico, o autor considera importante que o Sistema de Certificação Energético de Edifícios (SCE), reconheça a sua especificidade e proceda, em tempo útil, às necessárias alterações, de modo que o Potencial de Aquecimento Global (GPW) e o atraso térmico sejam considerados na metodologia de cálculo dos certificados energéticos.

De igual modo, também se considera que, para incentivar, quantificar e valorizar a construção circular, é de extrema utilidade adotar ou desenvolver um sistema de avaliação de circularidade, baseado em métricas e em boas prática nacionais e internacionais, adaptado à realidade portuguesa, e a ser devidamente promovido junto de projetistas e construtores.

REFERÊNCIAS

A COLLABORATION OF LEADING FIGURES IN THE BUILT ENVIRONMENT - **Our Shared Understanding: a circular economy in the built environment** [Em linha]. Cambridge, UK : Apollo - University of Cambridge Repository, 2023 [Consult. 1 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.17863/CAM.96973>.

ABDELLATEF, Yaser *et al.* - Mechanical, thermal, and moisture buffering properties of novel insulating hemp-lime composite building materials. **Materials**. 13:21 (2020) 5000. ISSN 1996-1944.

ADAMS, Katherine Tebbatt *et al.* - Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers. Em **Proceedings of the Institution of Civil Engineers : Waste and Resource Managemen** [Em linha] [Consult. 19 mar. 2021]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.1680/jwarm.16.00011>.v. 170. p. 15–24.

ADENE – AGÊNCIA PARA A ENERGIA - **Nota Técnica NT-SCE-02** [Em linha]. Lisboa, Portugal : ADENE, 2022 Disponível em WWW:<URL:https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2022/08/NT_SCE_02_NZEB20_V1.pdf>.

ADENE – AGÊNCIA PARA A ENERGIA - **Descarbonização dos edifícios passa pela reabilitação e eficiência energética** [Em linha]. Lisboa, Portugal : ADENE, 2022 [Consult. 28 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.adene.pt/descarbonizacao-dos-edificios-passa-pela-reabilitacao-e-eficiencia-energetica/>.

ADENE – AGÊNCIA PARA A ENERGIA - **Legislação : legislação em vigor na área dos edifícios no âmbito da eficiência energética e do SCE** [Em linha]. Lisboa, Portugal : ADENE, 2024 [Consult. 7 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.sce.pt/legislacao/>.

AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE - **Acordo de Paris** [Em linha]. Amadora, Portugal : APA, 2021 [Consult. 14 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://apambiente.pt/clima/acordo-de-paris>.

AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE - **Plano Nacional para o Radão** [Em linha]. Amadora, Portugal : APA, 2021 [Consult. 25 jan. 2024]. Disponível em

WWW:<URL:https://www.apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/plano-nacional-para-o-radao>.

AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE - **Prevenção e remediação** [Em linha]. Amadora, Portugal : APA, 2021 [Consult. 25 jan. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/prevencao-e-remediacao>.

AHLMARK, Kristian - **Creating the world's tallest wooden structured building. Entrevistado por Skyla Baily** [Em linha]. Manchester, UK : AZoBuild, 2022 [Consult. 24 out. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8547>.

AKANBI, Lukman A. *et al.* - Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. **Resources, Conservation & Recycling**. 129:2018) 175–186. ISSN 0921-3449.

ALLEN, Joseph G. *et al.* - **Building evidence: The 9 foundations of a healthy building**Healthy buildings for health. [Em linha]. Boston, Massachusetts. : Harvard T.H. Chan School of Public Health, 2017 Disponível em WWW:<URL:https://9foundations.forhealth.org/wp-content/uploads/2020/02/9_Foundations_of_a_Healthy_Building_February_2017_R1.8.pdf>.

ALLEN, Joseph G. *et al.* - **Building: The nexus of Green Buildings, Global Health and the U.N. Sustainable Development Goals**Healthy builings for health. [Em linha]. Boston, Massachusetts : Harvard T.H. Chan School of Public Health, 2024 [Consult. 24 jan. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://sdgs.forhealth.org/>.

ALMENDRA, Ricardo Jorge Meireles - **A vulnerabilidade ao frio em Portugal: custos sociais e económicos do excesso de mortalidade e de morbilidade durante o inverno** [Em linha]. Coimbra, Portugal : Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra. Tese de Doutoramento em Geografia, 2019 [Consult. 5 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/87620>.

ALVAR AALTO FOUNDATION - **Alvar Aalto Design Seminar – BIOSYMBIOSIS; Top bio-based design and innovations 24.–25.5.2022 in Jyväskylä, Finland** [Em linha]. Helsinki, Finland : Alvar Aalto Foundation, 2022 [Consult. 31 out. 2023]. Disponível em

WWW:<URL:https://www.alvaraalto.fi/en/news/alvar-aalto-design-seminar-biosymbiosis-top-bio-based-design-and-innovations-24-25-5-2022-in-jyvaskyla-finland/>.

ALVAR AALTO FOUNDATION - **Villa Mairea** [Em linha]. Helsinki, Finland : Alvar Aalto Foundation, 2023 [Consult. 31 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.alvaraalto.fi/en/architecture/villa-mairea/>.

ALVES, Elia Elisa Cia; FERNANDES, Ivan Filipe De Almeida Lopes - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: uma transformação no debate científico do desenvolvimento? **Meridiano 47 - Boletim de Análise de Conjuntura em Relações Internacionais**. 21:2020) 1-1–17. ISSN 1518-1219.

AMADO, Miguel - Planear a cidade sustentável : descarbonizar a cidade actual para construir a cidade sustentável do futuro. **Revista Arquitectura Lusíada**. ICCSBE 2025 1ª Conferência Internacional sobre Ambiente Construído Sustentável e Circular:Número especial (2025) (2025) 17–22. ISSN 1647-9009.

AMADO, Miguel P. *et al.* - **Construção Sustentável: conceito e prática**. Casal de Cambra, Portugal : Caleidoscópio, 2015. ISBN 978-989-658-324-8.

AMADOR, João - **Mix e intensidade energética em Portugal: retratos com dados agregados e de empresa** [Em linha]. [S.l.] : Banco de Portugal, 2022 [Consult. 3 jul. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.bportugal.pt/paper/mix-e-intensidade-energetica-em-portugal-retratos-com-dados-agregados-e-de-empresa>.

AMARAL, Izabel - Quase tudo que você queria saber sobre tectônica, mas tinha vergonha de perguntar. **PosFAUUSP**. 16:26 (2009) 148–167. ISSN 2317-2762.

ANASTASIADES, K. *et al.* - Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 117:2020) 109522. ISSN 1364-0321.

ANDERSEN, C. E. *et al.* - Embodied GHG emissions of wooden buildings : challenges of biogenic carbon accounting in current LCA methods. **Frontiers in Built Environment**. [Em linha] 7:2021). [Consult. 24 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.729096>. ISSN 2297-3362.

ARCHDAILY - CCTV Headquarters / OMA. **ArchDaily**. [Em linha]2012). [Consult. 27 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archdaily.com/236175/cctv-headquarters-oma>. ISSN 0719-8884.

ARCHDAILY - Heydar Aliyev Center / Zaha Hadid Architects. [Em linha]2013). [Consult. 27 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archdaily.com/448774/heydar-aliyev-center-zaha-hadid-architects>. ISSN 0719-8884.

ARCHDAILY - Bosco Verticale / Boeri Studio. [Em linha]2015). [Consult. 7 jul. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archdaily.com/777498/bosco-verticale-stefano-boeri-architetti>. ISSN 0719-8884.

ARCHITECTS CLIMATE ACTION NETWORK - **Circular Economy in the Built Environment** [Em linha]. London, UK : ACAN, 2024 [Consult. 21 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architectscan.org/circular-economy-design-guide>.

ARCHITECTURE 2030 - **Architects to phase out carbon by 2050** [Em linha]. Santa Fe, NM : Architecture 2030, 2014 [Consult. 14 dez. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architecture2030.org/architects-to-phase-out-carbon-by-2050/>.

ARCHTOOLBOX - **Health Product Declarations (HPDs): A guide for architects** [Em linha]. Cambridge, Massachusetts : Archtoolbox, 2021 [Consult. 23 jan. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archtoolbox.com/health-product-declarations/>.

ARQUITECTURA VIVA - **Casa da Música, Oporto: OMA - Office for Metropolitan Architecture** [Em linha]. Madrid, España : AV - Arquitectura Viva, 2023 [Consult. 8 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://arquitecturaviva.com/works/casa-da-musica-10>.

ARUP; WBCSD - **Net zero buildings: Halving construction emissions today** [Em linha]. Geneva, Switzerland : World Business Council for Sustainable Development, 2023 [Consult. 23 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.arup.com/en/perspectives/publications/research/section/net-zero-buildings-halving-construction-emissions-today>.

ARX PORTUGAL ARQUITECTOS - **Redbridge School** [Em linha]. Lisboa, Portugal : ARX, 2024 [Consult. 4 out. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.arx.pt/projecto/redbridge/>.

ASHBY, Michael F. - **Materials and the environment: eco-informed material choice** [Em linha]. 2nd ed. ed. Oxford, UK : Butterworth-Heinemann, 2013 [Consult. 5 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://books.google.com/books/about/Materials_and_the_Environment.html?hl=pt-PT&id=8dfPnX_5M7QC>. ISBN 978-0-12-385971-6.

ATKINSON, Carol; YATES, Alan; WYATT, Martin - **Sustainability in the built environment: An introduction to its definition and measurement**. Watford, UK : IHS BRE Press, 2009

ATTMANN, Osman - **Green architecture: Advanced technolgies and materials** [Em linha]. 1ª ed. [S.l.] : McGraw Hill, 2009 [Consult. 30 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ia601305.us.archive.org/9/items/Green_Architecture_Advanced_Technolgies_and_Materials_GreenSource_Books_By_Osman/Green_Architecture_Advanced_Technolgies_and_Materials_GreenSource_Books_By_Osman_Attmann.pdf>. ISBN 978-0-07-162501-2.

AUGUSTO, Carlos Alberto De Oliveira - **A metodologia da avaliação do ciclo de vida na definição de critérios de sustentabilidade em edifícios**. Lisboa : Universidade Lusíada Editora, 2011. ISBN 978-989-640-086-6.

AUGUSTO, Carlos Oliveira - **Go with the flow: os fluxos de materiais e a economia circular** [Em linha]. Lisboa, Portugal : VER, 2016 [Consult. 26 abr. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ver.pt/go-with-the-flow-os-fluxos-de-materiais-e-a-economia-circular/>.

AUGUSTO, Carlos Oliveira - Proceedings of 6th global summit on Climate Change: Low-carbon buildings towards combating climate change and meeting the UN`s sustainable development goals. **Journal of Earth Science & Climate Change**. 9:2018) 22. ISSN 2157-7617.

AUGUSTO, Carlos Oliveira - Healthy building : a Circular Economy`s approach. Em **Proceedings (reviewed papers) of the IIIrd International Conference on Environmental Design,Mediterranean Design Association** [Em linha]. Milano, Italy :

De Lettera Publisher, 2019 Disponível em WWW:<URL:https://drive.google.com/file/d/1kSPPS7fwp_r-yvpBUg3zkHJ639Hl62wn/view?usp=sharing>. ISBN 978-88-5509-063-6. p. 519–526.

AUGUSTO, Carlos Oliveira; FERREIRA, Miguel - Os edifícios como determinantes da saúde humana. **Revista Arquitectura Lusíada**. ICCSBE 2025 1ª Conferência Internacional sobre Ambiente Construído Sustentável e Circular:Número especial (2025) (2025) 121–122. ISSN 1647-9009.

AUGUSTO, De Oliveira - Construção e saúde : aplicações de economia circular ao edifcado sustentável. **Hotelaria & Saúde**. 12 (2017) 40–43.

BALTROCCHI, Alberto Pietro Damiano *et al.* - Mechanisms of Diffusion of Radon in Buildings and Mitigation Techniques. **Sustainability**. 16:1 (2023) 324. ISSN 2071-1050.

BANIHASHEMI, Saeed *et al.* - Circular economy in construction: The digital transformation perspective. **Cleaner Engineering and Technology**. 18:2024) 100715. ISSN 2666-7908.

BAOHUA WEN *et al.* - The role and contribution of green buildings on sustainable development goals. **Building and Environment**. 185:2020) 107091. ISSN 0360-1323.

BARANDY, Kat - Schmidt Hammer Lassen will build the world's tallest timber tower in switzerland. **designboom**. [Em linha]2022). [Consult. 24 out. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.designboom.com/architecture/schmidt-hammer-lassen-tallest-timber-residential-skyscraper-switzerland-04-15-2022/>.

BARKHAUSEN, Robin *et al.* - Combinations of material flow analysis and life cycle assessment and their applicability to assess circular economy requirements in EU product regulations. A systematic literature review | Elsevier Enhanced Reader. 407:2023) 137017.

BAUWENS, Thomas - Are the circular economy and economic growth compatible? A case for post-growth circularity. **Resources, Conservation and Recycling**. 175:2021) 105852. ISSN 0921-3449.

BEHLING, Sophia; BEHLING, Stefan - **Sol Power.: La evolución de la arquitectura sostenible**. Barcelona, España : Editorial Gustavo Gili, 2002. ISBN 968-887-396-9.

BEHRENDT, Walter Curt - **Arquitectura moderna : su naturaleza, sus problemas y formas**. 1ª edición en español ed. Buenos Aires, Argentina : Ediciones Infinito, 1959

BENEVOLO, Leonardo - **O último capítulo da Arquitectura Moderna**. Lisboa, Portugal : Edições 70, 1997. ISBN 972-44-0559-1.

BENEVOLO, Leonardo - **Historia de la arquitectura moderna**. 8ª edición revisada y ampliada ed. Barcelona, España : Editorial Gustavo Gili, 1999

BESANA, Daniela; TIRELLI, Davide - Reuse and retrofitting strategies for a net zero carbon building in Milan : An analytic evaluation. **Sustainability**. 14:23 (2022) 16115. ISSN 2071-1050.

BEVAN, Rachel; WOOLEY, Tom - **Hemp lime construction : A guide to building with hemp lime composites** [Em linha]. Watford, UK : IHS BRE Press, 2008 [Consult. 15 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.brebookshop.com/samples/321427.pdf>. ISBN 978-1-84806-033-3.

BIJU, Arathi - **10 stunning examples of Biomimicry in Architecture** [Em linha]. [s.l.] : Rethinking The Future, 2022 [Consult. 17 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.re-thinkingthefuture.com/2020/06/04/a952-10-stunning-examples-of-biomimicry-in-architecture/>.

BIOHM LIMITED - **Mycelium tech** [Em linha]. London, UK : Biohm, 2016 [Consult. 5 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.biohm.co.uk/mycelium>.

BIRNER, Regina - Bioeconomy concepts. Em LEWANDOWSKI, IRIS (Ed.) - **Bioeconomy: shaping the transition to a sustaianble, biobased economy** [Em linha]. 1. ed. Cham, Switzerland : Springer Nature, 2018 [Consult. 22 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-68152-8_3>. ISBN 978-3-319-68151-1

BKET - BOOSTING KEY ENABLING TECHNOLOGIES - **bKET trends book** [Em linha]. Vila Nova de Famalicão, Portugal : CeNTI, 2024 [Consult. 13 set. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://bket.centi.pt//storage/files/3_CeNTI_Projeto_bKET-Manual_Tendencias_Web-bket_boosting_key_enabling_technologies.pdf>.

BLINKHOUSE - **Reabilitação de casas em LSF** [Em linha]. Lousada, Portugal : blink.house, 2022 [Consult. 28 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://blink.house/reabilitacao/>.

BLOK, Merlijn; SCHOUTEN, Nico; DASNOIS, Mathieu - **Materials passport for a circular economy** [Em linha]. Amsterdam, The Netherlands : Metabolic, 2020 [Consult. 10 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.metabolic.nl/news/circular-economy-materials-passports/>.

BONNEFOY, Xavier - Inadequate housing and health: an overview. **International Journal of Environment and Pollution**. 30:3/4 (2007) 411–429. ISSN 0957-4352, 1741-5101.

BOROWSKI, Piotr F.; PATUK, Iaroslav; BANDALA, Erick R. - Innovative industrial use of bamboo as key «green» material. **Sustainability**. 14:4 (2022) 1955. ISSN 2071-1050.

BOURBOIS, Julia - **Frank Gehry in 10 Designs (that you can visit)** [Em linha]. [S.l.] : DailyArt Magazine, 2023 [Consult. 26 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dailyartmagazine.com/frank-gehry-in-10-designs/>.

BOYD, Philippa; COONICK, Chris - **BIPV in Construction: the translation of products and systems into design and construction** [Em linha]. Bodelva : BRE National Solar Centre, 2018 [Consult. 16 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.bregroup.com/wp-content/uploads/2018/05/BRE-solar-brochure-BIPV-in-construction-A4-24pp.pdf>.

BRAGANÇA, Luís; MATEUS, Ricardo (EDS.) - **Avaliação do ciclo de vida dos edifícios - impacte ambiental de soluções construtivas**. 1ª ed. S.l. : edição dos autores, 2011. ISBN 978-989-96543-3-4.

BRANCO-TEIXEIRA (COORD.), Miguel *et al.* - **Manual de inovação e sustentabilidade : os desafios e as soluções na reabilitação urbana 4.0 - materiais, tecnologias, recursos humanos e segurança** [Em linha]. Porto, Portugal : Vida Económica - Editorial, SA, 2023 Disponível em WWW:<URL:https://hdl.handle.net/1822/88444>. ISBN 978-989-768-994-9.

BRANNEN, Paul - **Timber! How wood can help save the world from climate breakdown**. Newcastle upon Tyne, UK : Agenda Publishing, 2024. ISBN 978-1-78821-735-4.

BREQUE, Maija; DE NUL, Lars; PETRIDIS, Athanasios - **Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry** [Em linha]. First edition ed. Brussels, Belgium : European Commission, 2021 [Consult. 5 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/468a892a-5097-11eb-b59f-01aa75ed71a1/language-en>. ISBN 978-92-76-25308-2.

BRON, Adrien *et al.* - **Five ways to improve circularity in Construction** [Em linha]. Boston, Massachusetts : Bain & Company, 2022 [Consult. 3 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.bain.com/insights/five-ways-to-improve-circularity-in-construction/>.

BROPHY, Vivienne; LEWIS, J. Owen - **A green Vitruvius: principles and practice of sustainable architectural design**. 2nd ed ed. London Washington, DC : Earthscan, 2011. ISBN 978-1-84971-191-3.

BROWNELL, Blaine - Two natural rebar alternatives for concrete. **Architect Magazine**. [Em linha]2015). [Consult. 9 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architectmagazine.com/technology/two-natural-rebar-alternatives-for-concrete_o>.

BROWNELL, Blaine - Hemp : The next disruptor in construction after wood? **Architect Magazine:** [Em linha]2021). [Consult. 8 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architectmagazine.com/technology/hemp-the-next-disruptor-in-construction-after-wood_o>.

BROWNELL, Blaine - The carbon footprint of material obsolescence. [Em linha]2023). [Consult. 14 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architectmagazine.com/Design/the-carbon-footprint-of-material-obsolescence_o>.

BUCKLIN, Oliver *et al.* - Environmental impact of a mono-material timber building envelope with enhanced energy performance. **Sustainability**. 15:1 (2022) 556. ISSN 2071-1050.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT - **Circular Building Assessment Prototype. A BIM based solution for Resource Productivity: development, validation and trial** [Em linha]. Watford, UK : BRE, 2019 [Consult. 14 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://bregroup.com/buzz/circular-building-assessment-prototype/>.

BUILDINGS AS MATERIALS BANKS - **Circular Building Assessment Prototype** [Em linha]. Brussels, Belgium : BAMB, 2018 [Consult. 25 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.bamb2020.eu/post/cba-prototype/>.

BUILDINGS AS MATERIALS BANKS - **Circular Building Assessment: data management and decision making models background.** [Em linha]. Brussels, Belgium : BAMB, 2020 Disponível em WWW:<URL:https://www.bamb2020.eu/topics/data-decision/>.

CALLEGARI, Guido; MEROLLA, Eleonora; SIMEONE, Paolo - Photovoltaic breakthrough in architecture : integration and innovation best practice. Em ARBIZZANI, EUGENIO *et al.* (Eds.) - **Proceedings of International Conference on Technological Imagination in the Green and Digital Transition CONF.ITECH 2022**The Urban Book Series. [Em linha]. Rome, Italy : Springer, Cham, 2023 [Consult. 18 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-29515-7_29>. ISBN 978-3-031-29515-7. p. 321–333.

CAMPINO, Marta Susana Inglês - **Circularidade e inovação nos projetos de arquitetura do setor da construção em Portugal** [Em linha]. Lisboa, Portugal : Instituto Superior de Economia e Gestão. Dissertação de Mestrado em Economia e Gestão de Ciência, Tecnologia e Inovação, 2022 [Consult. 23 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/26572>.

CÂNHAMOR - **Cânhamor - Blocos de Cânhamo** [Em linha]. Colos, Portugal : Cânhamor, 2022 [Consult. 14 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://canhamorhemp.com/>.

CAPORAL, Francisco RobertoRoberto - Poderá a Agroecologia responder aos cinco axiomas da sustentabilidade? **Revista Brasileira de Agroecologia**. 11:4 (2016) 390–402. ISSN 1980-9735.

CARCASSI, Olga Beatrice *et al.* - Bio-based materials for the italian construction industry : buildings as carbon sponges. Em DELLA TORRE, STEFANO *et al.* (Eds.) - **Regeneration of the built Eenvironment from a Circular Economy perspective** [Em linha]. Cham, Switzerland : Springer International Publishing, 2020 [Consult. 22 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.1007/978-3-030-33256-3_23>. ISBN 978-3-030-33256-3. p. 237–247.

CARCASSI, Olga Beatrice *et al.* - Material diets for climate-neutral construction. **Environmental Science & Technology**. 56:8 (2022) 5213–5223. ISSN 1520-5851.

CARLIN, Luca - **Il Bosco Verticale: l'architettura sostenibile secondo Boeri** [Em linha]. [S.l.] : Architettura Ecosostenibile, 2016 [Consult. 7 jul. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/bosco-verticale-architettura-boeri-676>.

CARLSON, Cajsa - Tadao Ando designs concrete arts centre for Sharjah to be «round like the Earth». **Dezeen**. [Em linha]2023). [Consult. 14 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2023/11/10/tadao-ando-arts-centre-il-teatro-at-aljada-sharjah/>.

CARRA, Guglielmo; MAGDANI, Nitesh - **Circular business models for the built environment** [Em linha]. Cowes, UK : Ellen MacArthur Foundation, 2017 [Consult. 10 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/knowledge_-_circular_business-models-for_the_environment.pdf>.

CASCIONE, V. *et al.* - Comparing the carbon footprint of bio-based and conventional insulation materials. Em PAPADOUPLOS, CHRISTOPHER; HARRIES, KENT A. (Eds.) - **Proceedings of 18th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2022)** [Em linha]. [S.l.] : NOCMAT, 2022 [Consult. 2 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:10.5281/zenodo.6570379>. p. Session 1B, Part Paper 10.

CEA-LITEN - **Accelerating the partnership: ROCTOOL and CEA create the first bio-based and 100% recyclable photovoltaic panels** [Em linha]. Grenoble, France : CEA-Liten, 2021 [Consult. 16 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.cea.fr/cea-

tech/liten/english/Pages/Medias/News/PV-High-Efficiency/ROCTOOL-and-CEA-create-the-first-bio-based-and-100-recyclable-PV-panels.aspx>.

CECHIN, Andrei Domingues; VEIGA, José Eli Da - A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen. Em **Brazilian Journal of Political Economy** [Em linha] [Consult. 18 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.1590/S0101-31572010000300005>.v. 30. p. 438–454.

CHAREF, Rabia; EMMITT, Stephen - Uses of building information modelling for overcoming barriers to a circular economy. **Journal of Cleaner Production**. 285:2021) 124854. ISSN 0959-6526.

CHARLES, Starr - Henning Larsen unveils design for world's largest timber logistics centre. **Dezeen**. [Em linha]2023). [Consult. 14 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2023/10/30/mass-timber-logistics-centre-west-henning-larsen-flevopolder/>.

CHAUDHARI, Rakesh - **Modern vs Contemporary Architecture: The definite guide 2023** [Em linha]. Houston, Texas : Arch Visual Studio, 2023 [Consult. 6 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://archvisual.studio/modern-vs-contemporary-architecture/>.

CHESHIRE, David - **Building revolutions: Applying the circular economy to the built environment** [Em linha]. 1ª ed. Newcastle upon Tyne : RIBA Publishing, 2016 [Consult. 17 abr. 2020]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.4324/9780429346712>. ISBN 978-1-85946-645-2.

CHURKINA, Galina *et al.* - Buildings as a global carbon sink. **Nature Sustainability**. . ISSN 2398-9629. 3:4 (2020) 269–276. doi: https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4.

CIRCULAR CONSTRUCTION ECONOMY - **Transition Agenda Circulair Economy 2018: Building towards the Circular Economy in the Netherlands in 2050 together.** [Em linha]. The Hague, The Netherlands : Ministerie van Algemene Zaken, 2018 [Consult. 22 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://hollandcircularhotspot.nl/wp-content/uploads/2019/09/Circular-Construction-Economy.pdf>.

COELHO, Katya; SIMÕES, Nuno - **Determinção da resistência térmica e coeficiente de transmissão térmica de elementos construtivos : painéis pré-fabricados para paredes exteriores**. Coimbra, Portugal : itecons. Relatório (OEF089/23) solicitado por CITAD - Centro de Investigação em Território, Arquitetura e Design, 2023

COELHO, Katya; SIMÕES, Nuno - **Determinção da resistência térmica e coeficiente de transmissão térmica de elementos construtivos : painéis pré-fabricados para paredes exteriores**. Coimbra, Portugal : itecons. Relatório (OEF090/23) solicitado por CITAD - Centro de Investigação em Território, Arquitetura e Design, 2023

COELHO, Katya; SIMÕES, Nuno - **Determinação do atraso térmico : painéis pré-fabricados para paredes exteriores.** Coimbra, Portugal : Relatório de ensaio (OMH058/24) solicitado por CITAD - Centro de Investigação emTerritório Arquitetura e Design, 2024

COLLEGE VAN RIJKSADVISEURS - **Wat is biobased bouwen? - Projecten - College van Rijksadviseurs** [Em linha]. Den Haag, Nederland : Rijksoverheid, 2024 [Consult. 13 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.collegevanrijksadviseurs.nl/projecten/nieuwe-bouwcultuur/voorbeeldprojecten/wat-is-biobased-bouwen>.

COLLINS, Peter - **los ideales de la arquitectura moderna: su evolución (1750-1950)**GG reprints. . 5ª edición ed. Barcelona, España : Editorial Gustavo Gili, 1998. ISBN 84-252-1757-1.

COMISSÃO EUROPEIA - Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões: Pacto Ecológico Europeu. Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Serviço das Publicações da União Europeia, Bruxelas,Bruxelas, 11.12.2019 COM(2019) 640 final, 2019 [Consult. 1 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A52019DC0640>.

CONSELHO DAS FINANÇAS PÚBLICAS - **Glossário de termos das Finanças Públicas** [Em linha]. Versão 1.0 ed. Lisboa, Portugal : Conselho das Finanças Públicas, 2015 [Consult. 8 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.cfp.pt/pt/glossario/formacao-bruta-de-capital-fixo>.

COPELAND, Samuel; BILEC, Melissa - Buildings as material banks using RFID and building information modeling in a circular economy. **Procedia CIRP**. 90:2020) 143–147. ISSN 2212-8271.

CORTI, Paolo *et al.* - **Building Integrated Photovoltaics: A practical handbook for solar buildings' stakeholders** [Em linha]. Canobbio, Switzerland : SUPSI - Becquerel Institute, 2020 [Consult. 18 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://repository.supsi.ch/12186/>.

CRAVEIRO, F. *et al.* - Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. **Automation in Construction**. 103:2019) 251–267. ISSN 0926-5805.

CRAWFORD, Robert - **Life cycle assessment in the built environment** [Em linha]. London, UK : Spon Press, 2011 Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.4324/9780203868171>. ISBN 978-0-415-55795-5.

CRYE, John - **HempWood®** [Em linha]. Murray, Kentucky : Fibonacci, LLC, 2024 [Consult. 8 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://hempwood.com/>.

CZERWINSKA, Dominika - **Green building: Improving the lives of billions by helping to achieve the UN Sustainable Development Goals** [Em linha]. London, UK : World Green Building Council, 2023 [Consult. 16 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://worldgbc.org/article/green-building-improving-the-lives-of-billions-by-helping-to-achieve-the-un-sustainable-development-goals/>.

D'AGOSTINO, Delia; ZANGHERI, Paolo - **Development of the NZEBs concept in Member States : Towards nearly zero energy buildings in Europe.** [Em linha]. Luxembourg, Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2016 [Consult. 6 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d2a3f8db-c104-11e6-a6db-01aa75ed71a1/language-en>. ISBN 978-92-79-64015-5.

D'AMBROSIO, Valeria; LOSASSO, Mario; TERSIGNI, Enza - Towards the Energy Transition of the Building Stock with BIPV: Innovations, Gaps and Potential Steps for a Widespread Use of Multifunctional PV Components in the Building Envelope. **Sustainability**. 13:22 (2021) 12609. ISSN 2071-1050.

DANISH CLEANTECH HUB; STATE OF GREEN - **From a linear to a circular economy: Experiences from Denmark and New York on closing the loop through partnerships and circular business models** [Em linha]. Copenhagen : State of Green, 2018 [Consult. 10 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://stateofgreen.com/en/publications/from-a-linear-to-a-circular-economy/>.

DAVEY, Reginald - **Incorporating the Circular Economy Model in Architecture** [Em linha], atual. 24 nov. 2021. [Consult. 13 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8448>.

DE FUSCO, Renato - **Historia de la Arquitectura Contemporánea**. Segunda reimpresión ed. Madrid, España : Celeste Ediciones, 1996. ISBN 84-87553-18-4.

DEBACKER, Wim *et al.* - Circular economy and design for change within the built environment preparing the transition. Em DI MAIO, FRANCESCO *et al.* (Eds.) - **International HISER conference on advances in recycling and management of construction and demolition waste** [Em linha]. [S.l.] : Delft University of Technology, 2017 [Consult. 7 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2017/07/Circular-economy-and-design-for-change-within-the-built-environment_prep....pdf>. ISBN 978-94-6186-826-8. p. 114–117.

DELGADO, Juan Manuel Davila; OYEDELE, Lukumon O. - BIM data model requirements for asset monitoring and the circular economy. **Journal of Engineering, Design and Technology**. 18:5 (2020) 1269–1285. ISSN 1726-0531.

DEMIR, İsmail; DOĞAN, Cüneyt - Physical and Mechanical Properties of Hempcrete. **The Open Waste Management Journal**. 13:1 (2020) 26–34. ISSN 1876-4002.

DEPREEUW, Teun - Shells serve as floor insulation within pilot case ’t Centrum (Westerlo, Belgium). Entrevistado por Eric Boessenkool. Em **Interreg VB North Sea Region** [Em linha]. Viborg, DK : European Regional Development Fund, 2022 [Consult. 21 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://northsearegion.eu/procirc/news/shells-serve-as-floor-insulation-within-pilot-case-t-centrum-westerlo-belgium/>.

DETENTION ROOF - **Why a detention roof?** [Em linha]. [S.l.] : Detention Roof, 2024 [Consult. 31 mai. 2024]. Disponível em

WWW:<URL:https://www.detentionroof.com/detention-roof/why-a-detention-roof#links>.

DIÁRIO IMOBILIÁRIO - **Actualidade: Campo de Ourique tem o maior edifício em madeira do país** [Em linha]. Almada, Portugal : Diário Imobiliário, 2019 [Consult. 26 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://diarioimobiliario.pt/Actualidade/Campo-de-Ourique-tem-o-maior-edificio-em-madeira-do-pais>.

DIETERLE, Michael; SCHÄFER, Philipp; VIERE, Tobias - Life cycle gaps: Interpreting LCA results with a Circular Economy mindset. Em **Procedia CIRP: 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference** [Em linha] [Consult. 22 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.058>.v. 69. p. 764–768.

DIREÇÃO-GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA - **National plan for increasing the number of nearly zero-energy buildings in Portugal** [Em linha]. Lisboa, Portugal : DGEG, 2014 Disponível em WWW:<URL:https://build-up.ec.europa.eu/sites/default/files/content/Portugal%20Report%20PT.pdf>.

DIREÇÃO-GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA - **Desempenho energético de edifícios** [Em linha]. Lisboa, Portugal : DGEG, 2024 [Consult. 28 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/desempenho-energetico-de-edificios/>.

DNV - **Product Environmental Footprint (PEF): Measure and communicate the life cycle environmental performance of products** [Em linha]. Høvik, Norway : DNV AS, 2023 [Consult. 30 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dnv.com/services/product-environmental-footprint-pef--231997>.

DORMAKABA - **Sustainability-related Product Declarations and Certifications** [Em linha]. [S.l.] : dormakaba Group, 2024 [Consult. 23 jan. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dormakabagroup.com/en/sustainability/product-declarations>.

DU PISANI, Jacobus A. - Sustainable development : historical roots of the concept. **Environmental Sciences**. 3:2 (2007) 83–96. ISSN 1943-8168.

DURMISEVIC, Elma - **Circular Economy in Construction: design strategies for reversible building** [Em linha]. Brussels, Belgium : BAMB, 2019 [Consult. 8 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/05/Reversible-Building-Design-Strateges.pdf>. ISBN ISBN 978-90-821-698-4-3.

DYSON, Anna *et al.* - **Building materials and the climate : constructing a new future** [Em linha]. Paris, France : United Nations Environment Programme, 2023 [Consult. 18 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/43293>. ISBN 978-92-807-4064-6.

EBERHARDT, Leonora *et al.* - Environmental Design Guidelines for Circular Building Components: The Case of the Circular Building Structure. **Sustainability**. 13:10 (2021) 5621. ISSN 2071-1050.

EBERHARDT, Leonora Charlotte Malabi; BIRKVED, Morten; BIRGISDOTTIR, Harpa - Building design and construction strategies for a circular economy. **Architectural Engineering and Design Management**. 18:2 (2022) 93–113. ISSN 1745-2007.

EBERT, Thilo; ESSIG, Natalie; HAUSER, Gerd - **Green building certification systems: Assessing sustainability - International system comparison - Economic impact of certifications**. Munich, Germany : Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2011. ISBN 978-3-920034-54-6.

ECOSHELP - **Ecoshelp : the benefits of shells** [Em linha]. Antwerp, België : Ecoshelp, 2024 [Consult. 21 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ecoschelp.be/nl/toepassingen-in-de-bouw/schelpen-isolatie-op-volle-grond>.

ECOTIV - **Ecotiv : From soil to turn-key housing** [Em linha]. Desselgem, Belgium : Ecotiv Belgium Bvba, 2024 [Consult. 6 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ecotiv.com/>.

ECOVATIVE LLC - **Why Mycelium - Ecovative** [Em linha]. Green Island, New York : Ecovative, 2023 [Consult. 5 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ecovative.com/pages/why-mycelium>.

EDWARDS, Brian - **Green Architecture**Architectural Design. . London, UK : Willey-Academy, 2001. ISBN 0-471-49193-4.

EDWARDS, Brian - **Guía básica de la sostenibilidad**. 2ª ed. Barcelona, España : Editorial Gustavo Gili, 2008. ISBN 978-84-252-2208-5.

EHRENFELD, John; GERTLER, Nicholas - Industrial Ecology in practice: The evolution of interdependence at Kalundborg. **Journal of Industrial Ecology**. 1:1 (1997) 67–79. ISSN 1530-9290.

EHRENFELD, John R. - Eco-efficiency: Philosophy, Theory, and Tools. **Journal of Industrial Ecology**. 9:4 (2008) 6–8. ISSN 10881980.

EKOSEN - **IR paneli – vse kar morate vedeti o modernem in zdravem načinu ogrevanja** [Em linha]. Maribor, Slovenia : Ekosen, 2021 [Consult. 29 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://ekosen.eu/infrared-heating-panel-sunlife-art/>.

ELEFANTE, Carl - **The greenest building… is the one that is already built.** [Em linha]. Takoma Park, Maryland : Carl Elefante., 2024 Disponível em WWW:<URL:https://carlelefante.com/insights/the-greenest-building-is/>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION - **Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition** [Em linha]. Cowes, UK : Ellen MacArthur Foundation, 2013 [Consult. 7 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION - **Towards a circular economy : Business rationale for an accelerated transition** [Em linha]. Cowes, UK : Ellen MacArthur Foundation, 2015 [Consult. 7 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION - **Kit de ferramentas para construções circulares** [Em linha]. Cowes, UK : Ellen MacArthur Foundation, 2022 Disponível em WWW:<URL:https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/artigos/kit-ferramentas-edificios-circulares>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION - **The butterfly diagram: visualising the circular economy** [Em linha]. Cowes, UK : Ellen MacArthur Foundation, 2023 [Consult. 3 abr. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION - **Schools of thought that inspired the circular economy** [Em linha]. Cowes, UK : Ellen MacArthur Foundation, 2023 [Consult. 3 abr. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ellenmacarthurfoundation.org/schools-of-thought-that-inspired-the-circular-economy>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION - Life Cycle Assessment for the circular economy. Em **Circular economy key ideas** [Em linha]. Cowes, UK : Ellen MacArthur Foundation, 2023 Disponível em WWW:<URL:https://ellenmacarthurfoundation.org/life-cycle-assessment-for-the-circular-economy>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION; MATERIAL ECONOMICS - **Completing the picture: How the circular economy tackles climate change.** [Em linha]. V.3 ed. Cowes, UK : Ellen MacArthur Foundation, 2019 [Consult. 17 jun. 2020]. Disponível em WWW:<URL:https://ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture>.

EPEA GMBH - **Circular Economy** [Em linha]. Hamburg, Germany : EPEA, 2023 [Consult. 5 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://epea.com/en/about-us/circular-economy>.

ERANDOLE, Shraddha - **Globalization and architecture** [Em linha]. New Delhi, India : RTF - Rethinking The Future, 2020 [Consult. 17 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.re-thinkingthefuture.com/rtf-fresh-perspectives/a2228-globalization-and-architecture/>.

ERDEN - **ERDEN Wände** [Em linha]. Schlins, Austria : Lehm Ton Erde Baukunst., 2018 [Consult. 24 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.erden.at/ERDEN-Wande>.

ERDEN - **Warum mit Lehm bauen?** [Em linha]. Schlins, Austria : Lehm Ton Erde Baukunst., 2018 [Consult. 24 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.erden.at/Why-earth>.

ERHORN, Hans; ERHORN-KLUTTIG, Heike - **(CT 1) New buildings & NZEBs - 2018 : Status in February 2018** [Em linha]. [s.l.] : Concerted Action EPBD, 2018 Disponível em WWW:<URL:https://epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2019/06/CT1-Factsheet-National_applications_of_NZEB_definition.pdf>.

ERHORN-KLUTTIG, Heike; ERHORN, Hans - **National applications of the NZEB definition – The complete overview : Status February 2018** [Em linha]. [s.l.] : Concerted Action EPBD, 2018 Disponível em WWW:<URL:https://epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2019/06/CT1-Factsheet-National_applications_of_NZEB_definition.pdf>.

ESPAÇO DE ARQUITETURA - **Norman Foster vai liderar transformação da construção modular em Portugal** [Em linha]. Guimarães, Portugal : Espaço de Arquitetura, 2022 [Consult. 28 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://espacodearquitetura.com/noticias/norman-foster-vai-liderar-transformacao-da-construcao-modular-em-portugal/>.

ESSER, Anne *et al.* - **European Comission. Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU : final report : Country reports** [Em linha]. Luxembourg, Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2019 [Consult. 1 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://data.europa.eu/doi/10.2833/14675>. ISBN 978-92-76-14632-2.

EUROPEAN COMISSION. DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY - **Nearly zero-energy buildings : The EU has proposed to move from the current nearly zero-energy buildings to zero-emission buildings by 2030** [Em linha]. Brussels, Belgium : European Commission, 2024 [Consult. 1 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en>.

EUROPEAN COMMISSION - **Circular economy - principles for building design** [Em linha]. Brussels : European Commission, 2020 [Consult. 26 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ec.europa.eu/docsroom/documents/39984>.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY *et al.* - Circular economy in Europe: Developing the knowledge base. **EEA Report**. [Em linha]2 (2016). [Consult. 4 abr. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://data.europa.eu/doi/10.2800/51444>. ISSN 1977-8449.

EUROSTAT - **Material flow diagram - Circular economy - Eurostat** [Em linha]. Brussels, Belgium : European Union, 2023 [Consult. 24 abr. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/circular_economy/sankey.html?geos=EU27&year=2021&unit=THS_T&materials=TOTAL&highlight=&nodeDisagg=0101100100&flowDisagg=true&language=EN&material=TOTAL>.

EVANS, George - **The role of Architecture In promoting economic growth and development: Building for prosperity** [Em linha]. Willowbrook, Illinois : CAM - Commercial Architecture Magazine, 2023 [Consult. 16 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.commercialarchitecturemagazine.com/the-role-of-architecture-in-promoting-economic-growth-and-development/>.

EVANS, George - **The influence of Globalization on architectural styles: The changing face of Architecture** [Em linha]. Willowbrook, Illinois : CAM - Commercial Architecture Magazine, 2023 [Consult. 17 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.commercialarchitecturemagazine.com/the-influence-of-globalization-on-architectural-styles/>.

FAIRS, Marcus - Bamboo «will replace other materials» says Vo Trong Nghia. **Dezeen**. [Em linha]2014). [Consult. 11 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2014/07/16/vo-trong-nghia-interview-materials-architecture-bamboo/>.

FAIRS, Marcus - Leading architects are «turning the focus back on bamboo». **Dezeen**. [Em linha]2014). [Consult. 11 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2014/07/18/penda-chris-precht-interview-bamboo-architecture/>.

FAIRS, Marcus - Bamboo fibre is stronger and cheaper than steel says ETH professor. **Dezeen**. [Em linha]2015). [Consult. 9 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2015/11/04/bamboo-fibre-stronger-than-steel-dirk-hebel-world-architecture-festival-2015/>.

FAIRS, Marcus - Mycelium is «part of the solution» to carbon-negative buildings. **Dezeen**. [Em linha]2021). [Consult. 5 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2021/06/25/carbon-negative-buildings-mycelium-insulation-fire-proofing/>.

FELLER, Robyn M. - **Promoting sustainable design through life-cycle assessment applications** [Em linha]. [S.l.] : CE Center, 2017 [Consult. 16 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://continuingeducation.bnpmedia.com/courses/tally/promoting-sustainable-design-through-life-cycle-assessment-applications/2/>.

FERRAZ, Ignez - **Novos paradigmas da Arquitetura Contemporânea**Fórum da Construção. [Em linha]. São Paulo, Brasil : IBDA - Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura, 2010 [Consult. 7 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=6&Cod=671>.

FERREIRA, Diana - **Guggenheim Bilbao: porque vamos ao museu?** [Em linha]. Vendas Novas, Portugal : Citaliarestauro.com, 2022 [Consult. 24 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://citaliarestauro.com/museu-guggenheim-bilbao/>.

FERREIRA, Mafalda Fabiene Motta - **Poética tectônica como mediadora da arquitetura contemporânea em direção à sustentabilidade** [Em linha]. Rio de Janeiro, Brasil : Universidade Federal Fluminense. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, 2012 [Consult. 6 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:http://app.uff.br/riuff/handle/1/23972>.

FERREIRA, Miguel; COELHO, Manuel Joaquim Pinto - O radão nos edifícios: minimização da perigosidade. **A Obra Nasce**. 03 (2006) 70–91. ISSN 1645-8729.

FERREIRA, Miguel; SANTIAGO, Pedro - Sustentabilidade da envolvente térmica dos edifícios de habitação. **Revista Arquitectura Lusíada**. ICCSBE 2025 1ª Conferência Internacional sobre Ambiente Construído Sustentável e Circular:Número especial (2025) (2025) 85–86. ISSN 1647-9009.

FIGLIOLA, Angelo - Sostenibilità ambientale nell'era dell'antropocene: un nuovo paradigma tra ambiente, tecnica ed etica. **BDC - Bollettino Del Centro Calza Bini.Università degli Studi di Napoli Frederico II. The inclusive, resilient, safe and sustainable city: models, approaches, tools.** 16:1 (2016) 83–95. ISSN 2284-4732.

FILIPE, Cláudio Kuster - Os edifícios e a saúde humana : breves notas sobre alguns problemas de saúde relacionados com edifícios. **Revista Portuguesa de Saúde Pública**. 19:1 (2001) 29–40. ISSN 0870-9025.

FLORIAN, Maria-Cristina - 10 Start-ups creating innovative and sustainable building materials, from mycelium bricks to water purifying tiles. **ArchDaily**. [Em linha]2022). [Consult. 18 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archdaily.com/988017/mushroom-mycelium-bricks-and-water-purifying-tiles-10-innovative-and-sustainable-building-materials>. ISSN 0719-8884.

FONSECA, Paulo *et al.* - **Plano de Ação para a Circularidade na Construção** [Em linha]. Porto, Portugal : BUILT CoLAB, 2022 [Consult. 14 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://circularidade.builtcolab.pt/>. ISBN 978-989-33-4246-6.

FONSECA, Paulo *et al.* - **Relatório do estado atual da circularidade no setor da construção em Portugal** [Em linha]. Porto, Portugal : BUILT CoLAB, 2022 [Consult. 8 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://circularidade.builtcolab.pt/>. ISBN 978-989-33-4271-8.

FONSECA, Paulo *et al.* - **Plano de Ação para a Circularidade na Construção : sumário executivo**Circularidade na Construção. [Em linha]. Porto, Portugal : BUILT CoLAB, 2022 [Consult. 14 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://circularidade.builtcolab.pt/>.

FOSTER + PARTNERS - **Alif - The Mobility Pavilion, Expo 2020 Dubai** [Em linha]. London, UK : Foster + Partners, 2023 [Consult. 8 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.fosterandpartners.com/projects/alif-the-mobility-pavilion-expo-2020-dubai>.

FRAMPTON, Kenneth - **Historia crítica de la arquitectura moderna**. Sexta edición ampliada ed. Barcelona, España : Editorial Gustavo Gili, 1993. ISBN 84-252-1628-1.

FRAMPTON, Kenneth - Rappel à l`orde, the case for the tectonic. Em NESBITT, KATE (Ed.) - **Theorizing a new agenda for architecture : an anthology of architectural theory 1965-1995**. First edition ed. New York, New York : Princeton Architectural Press, 1996. ISBN 1-56898-054-X. p. 516–528.

FRAMPTON, Kenneth - **Introdução ao estudo da cultura tectónica**Cadernos de Arquitetura. . 1ª edição portuguesa (parcial) ed. Lisboa e Matosinhos, Portugal : Associação dos Arquitectos Portugueses e Contemporânea Editora, 1998. ISBN 972-8305-62-1.

FRAMPTON, Kenneth - **Estudios sobre cultura tectónica: poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX**Akal Arquitectura. . San Sebastián de los Reyes (Madrid), España : Ediciones Akal, 1999. ISBN 84-460-1187-5.

FRAMPTON, Kenneth - **História crítica da Arquitectura Moderna**. 1ª edição, 2ª tiragem ed. São Paulo, Brasil : Martins Fontes, 2000. ISBN 85-336-0750-4.

FRAMPTON, Kenneth - Typology and participation: the architecture of Álvaro Siza. **Artforum International Magazine**. [Em linha] 56:7 (2016). [Consult. 6 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.artforum.com/features/typology-and-participation-the-architecture-of-alvaro-siza-228011/>. ISSN 0004-3532.

FRANK LLOYD WRIGHT FOUNDATION - **Fallingwater** [Em linha]. Scottsdale, AZ : Frank Lloyd Wright Foundation, 2023 [Consult. 26 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://franklloydwright.org/site/fallingwater/>.

FREARSON, Amy - Buildings could «definitely» be made exclusively from plant-based products says biomaterials CEO. **Dezeen**. [Em linha]2021). [Consult. 22 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2021/10/22/biomaterials-biobased-creations-lucas-de-man-interview/>.

FREITAS, Maria Da Graça, coord. - **Plano Nacional de Saúde 2021-2030. Saúde Sustentável: de tod@s para tod@s** [Em linha]. Lisboa, Portugal : DGS, 2022 Disponível em WWW:<URL:https://pns.dgs.pt/files/2023/02/PNS2021-2030_Saude-da-Populacao-em-Portugal.pdf>.

FRIEDMAN, Ashley - **Contemporary Architecture Characteristics** [Em linha]. Santa Monica, CA : Hunker, 2023 [Consult. 9 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.hunker.com/12554122/contemporary-architecture-characteristics>.

GANS, Deborah - **Le Corbusier**. Barcelona, España : Editorial Gustavo Gili, 1988. ISBN 84-252-1373-8.

GARCIA, Ana Cristina *et al.* - Exposição residencial ao radão e cancro do pulmão em Portugal. **Revista Arquitectura Lusíada**. ICCSBE 2025 1ª Conferência Internacional sobre Ambiente Construído Sustentável e Circular:Número especial (2025) (2025) 117–119. ISSN 1647-9009.

GATTUPALLI, Ankitha - What is regenerative architecture? Limits of sustainable design, system thinking approach and the future. **ArchDaily**. [Em linha]2023). [Consult. 18 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archdaily.com/993206/what-is-regenerative-architecture-limits-of-sustainable-design-system-thinking-approach-and-the-future>. ISSN 0719-8884.

GEISSDOERFER, Martin *et al.* - Circular business models : A review. **Journal of Cleaner Production**. 277:2020) 123741. ISSN 09596526.

GELDERMANS, R. J. - Design for change and circularity – accommodating circular material & product flows in construction. Em **Energy Procedia: Proceedings of SBE16 Tallinn and Helsinki Conference.** [Em linha] [Consult. 24 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216307925>.v. 96. p. 301–311.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas - **O decrescimento: entropia, ecologia, economia.** Lisboa : Edições Piaget, 2008. ISBN 978-980-659-098-7.

GHISLENI, Camilla - Práticas projetuais: sobre a importância da relação entre arquitetura e engenharia. **ArchDaily Brasil**. [Em linha]2019). [Consult. 20 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archdaily.com.br/br/925611/praticas-projetuais-sobre-a-importancia-da-relacao-entre-arquitetura-e-engenharia>. ISSN 0719-8906.

GHISLENI, Camilla - O que é madeira engenheirada? **ArchDaily Brasil**. [Em linha]2023). [Consult. 25 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archdaily.com.br/br/1000425/o-que-e-madeira-engenheirada>. ISSN 0719-8906.

GIBSON, Liam - **Hempwood : Timber alternative made from hemp** [Em linha]. Newcastle, UK : Circular Material Library, 2023 [Consult. 8 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://circularmateriallibrary.org/material/hempwood/>.

GIDDINGS, Joe *et al.* - **The carbon footprint of construction** [Em linha]. London, UK : ACAN - Architects Climate Action Network, 2021 [Consult. 19 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architectscan.org/_files/ugd/b22203_c17af553402146638e9bc877101630f3.pdf?index=true>.

GIOVANNINI, Joseph - **Heydar Aliyev Cultural Center, designed by Zaha Hadid Architects** [Em linha]. Washington, D.C. : Architect Magazine, 2013 [Consult. 22 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architectmagazine.com/design/buildings/heydar-aliyev-cultural-center-designed-by-zaha-hadid-architects_o>.

GIRARDET, Herbert - **The metabolism of modern cities**Megamorphosis. [Em linha]. London, UK : Ecologist, 2023 [Consult. 11 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://theecologist.org/2023/feb/13/metabolism-modern-cities>.

GOLDMAN, Cedra; RIDER, Traci Rose - Health-promoting buildings: The future of deesign. Em **108th ACSA Annual Meeting Proceedings, Open** [Em linha]. Washington, D.C. : ACSA, 2020 [Consult. 17 jan. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.35483/ACSA.AM.108.64>. ISBN 978-1-944214-26-5. p. 460–467.

GOLEMAN, Daniel - **Eco Inteligência**. [s.l.] : Temas e Debates, 2009. ISBN 978-989-644-078-7.

GOLOVIANKO, Mariia *et al.* - Industry 4.0 vs. Industry 5.0: co-existence, transition, or a hybrid. **Procedia Computer Science**. 217:2023) 102–113. ISSN 1877-0509.

GOUBRAN, Sherif - On the role of Construction in achieving the SDGs. **Journal of Sustainability Research**. 1:2 (2019) e190020. ISSN 2632-6582.

GRIFFITHS, Alyn - Rem Koolhaas' CCTV Headquarters redefined the skyscraper. **Dezeen**. [Em linha]2022). [Consult. 28 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2022/05/12/cctv-headquarters-oma-deconstructivism/>.

GRINEVALD, Jacques; RENS, Ivo - Introdução à segunda edição (1995). Em GEORGESCU-ROEGEN, NICHOLAS (Ed.) - **O decrescimento: entropia, ecologia, economia.** Lisboa : Edições Piaget, 2008. ISBN 978-980-659-098-7. p. 13–30.

GRUPO CASAIS - **Projeto edifícios sustentáveis** [Em linha]. Braga, Portugal : Casais, 2024 [Consult. 28 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://edificiossustentaveis.casais.pt/>.

HABERT, Guillaume - Fast-Growing Bio-Based Materials Can Heal the World. **Buildings and Cities**. [Em linha]2021). [Consult. 7 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.3929/ethz-b-000511501>.

HAGHIGHI, Zoheir *et al.* - Architectural Photovoltaic Applications : lessons learnt and perceptions from architects. **Buildings**. 11:2 (2021) 62.

HAISMA, Reinout *et al.* - **Impact scan for timber construction in Europe** [Em linha]. Amsterdam, The Netherlands : Metabolic, 2023 [Consult. 17 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.metabolic.nl/publications/impact-scan-for-timber-construction-in-europe/>.

HALE, Jonathan - **Merleau-Ponty for architects**Thinkers for architects. . London, UK : Routledge, 2017. ISBN 978-1-315-64543-8.

HAMMON, Dawn - **HempWood offers a versatile, sustainable wood alternative** [Em linha]. El Segundo, CA : Inhabitat, 2021 [Consult. 8 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://inhabitat.com/hempwood-offers-a-sustainable-wood-alternative-with-endless-applications/>.

HANSEN, Rasmus Nøddegaard *et al.* - Enabling rapid prediction of quantities to accelerate LCA for decision support in the early building design. **Journal of Building Engineering**. . ISSN 2352-7102. 2023) 106974. doi: 10.1016/j.jobe.2023.106974.

HAORAN LEI *et al.* - An analytical review on application of life cycle assessment in circular economy for built environment. **Journal of Building Engineering**. 44:2021) 103374. ISSN 2352-7102.

HART, Tom; FIRTH, Robbie - **Circular biobased construction in the North East and Yorkshire** [Em linha]. V1.0.5 ed. London, UK : Material Cultures, 2021 [Consult. 14 abr. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://materialcultures.org/cb-construction/>.

HAYES, Mike *et al.* - **European Green Deal policy guide.** [Em linha]. London, UK : KPMG International, 2022 Disponível em WWW:<URL:https://kpmg.com/xx/en/home/insights/2021/11/european-green-deal-policy-guide.html>.

HEALTHY ARCHITECTURE & CITY, (TEP-965) - **Healthy Architecture** [Em linha]. Sevilla, España : HAC - Universidad de Sevilla, 2024 [Consult. 29 jan. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://grupo.us.es/hac/en/home/healthy-architecture/>.

HEGGER, Manfred *et al.* - **Energy manual: Sustainable architecture**. Detail ed. [S.l.] : Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2008 [Consult. 28 fev. 2023]. . ISBN 978-3-7643-8830-0.

HEINBERG, Richard - **MuseLetter #178: Five axioms of sustainability** [Em linha]. Corvallis, Oregon : Post Carbon Institute, 2007 [Consult. 24 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://richardheinberg.com/178-five-axioms-of-sustainability>.

HEINRICH, Matthias; LANG, Werner - **Materials Passports - best practice. Innovative solutions for a transition to a circular economy in the built environment** [Em linha]. München : Technische Universität München, 2019 [Consult. 7 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/02/BAMB_MaterialsPassports_BestPractice.pdf>. ISBN 978-3-941370-96-8.

HENDRICKS, Carolyn *et al.* - Material Flow Analysis: a tool to support environmental policy decision making. Case-studies on the city of Vienna and the Swiss lowlands. **Local Environment**. 5:3 (2000) 311–328.

HENRIQUES, Juan *et al.* - Industrial symbiosis : a sectoral analysis on enablers and barriers. **Sustainability**. 13:4 (2021) 1723. ISSN 2071-1050.

HERCZEG, Márton *et al.* - **Resource efficiency in the building sector: Final report** [Em linha]. Rotterdam : ECORYS, 2014 [Consult. 8 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/Resource%20efficiency%20in%20the%20building%20sector.pdf>.

HEVERAN, Chelsea M. *et al.* - Biomineralization and successive regeneration of engineered living building materials. **Matter**. 2:2 (2020) 481–494. ISSN 2590-2385.

HOHENADEL, Kristin - **What Is Contemporary Architecture?** [Em linha]. New York, NY : The Spruce, 2022 [Consult. 6 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.thespruce.com/what-is-contemporary-architecture-4769079>.

HOND, F. Den - Industrial ecology: a review. **Regional Environmental Change**. 1:2 (2000) 60–69.

HORVATH, Edward P. - Building-related illness and sick building syndrome: from the specific to the vague. **Cleveland Clinic Journal of Medicine**. 64:6 (1997) 303–309. ISSN 1939-2869 (on line).

HOUSE OF BAMBOO - From CLT to CLB : the pathway to sustainable construction has a new milestone. **Architecture & Design**. [Em linha]2023). [Consult. 21 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architectureanddesign.com.au/suppliers/house-of-bamboo/clt-to-clb-the-pathway-to-sustainable-buildings>.

HUANG, Monica - **Life Cycle Assessment of buildings: a practice guide** [Em linha]. 1.0 ed. wh : The Carbon Leadership Forum. Department of Architecture. University of Washington, 2018 [Consult. 16 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:http://hdl.handle.net/1773/41885>.

HUYNH, Tracy *et al.* - **Driving action on embodied carbon in buildings : Answers to current questions about embodied carbon and key actions to accelerate the decarbonization of building construction** [Em linha]. Boulder, CO : RMI, 2023 [Consult. 28 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://rmi.org/insight/driving-action-on-embodied-carbon-in-buildings/>.

HYSA, Eglantina *et al.* - Circular Economy innovation and Environmental Sustainability impact on economic growth: An integrated model for Sustainable Development. **Sustainability**. 12:12 (2020) 4831. ISSN 2071-1050.

IAPMEI - **Clusters de competitividade : pactos para a competitividade e internacionalização** [Em linha]. Lisboa : IAPMEI - Agência para a Competitividade e Inovação, IP, 2021 [Consult. 9 set. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.iapmei.pt/PRODUTOS-E-SERVICOS/Empreendedorismo-Inovacao/Eficiencia-Coletiva-e-Clusters/DOCS/Brochura-Clusters.aspx>.

IL BIOECONOMISTA, Il - **Roctool and CEA joined forces to create bio-based photovoltaic panels** [Em linha]. Milano, Italy : Il Bioeconomista, 2021 [Consult. 12 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ilbioeconomista.com/2021/11/04/roctool-and-cea-joined-forces-to-create-bio-based-photovoltaic-panels/>.

INSTITUTE FOR PROSPECTIVE TECNOLOGICAL STUDIES (JOINT RESEARCH CENTRE) (ED.) - **Environmental improvement potential of residential buildings (IMPRO-Building)**JRC Scientific and Technical Reports. [Em linha]. Luxembourg, Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2008 [Consult. 9 jan. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/85dcd023-6800-400a-bb6f-cbbdb3826f9b/language-en>. ISBN 978-92-79-09767-6.

INTERNATIONAL BAMBOO AND RATTAN ORGANIZATION - **Engineering the future : A new ISO standard on engineered bamboo** [Em linha]. Beijing, China : INBAR, 2024 [Consult. 9 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.inbar.int/engineering-the-future-a-new-iso-standard-on-engineered-bamboo/>.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT - **About : Our history** [Em linha]. [S.l.] : IIED, 2024 [Consult. 3 nov. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.iied.org/about>.

INTERNATIONAL LIVING FUTURE INSTITUTE - **Living Building ChallengeSM 4.0: a visionary path to a regenerative future** [Em linha]. Seattle, WA : ILFI, 2019 [Consult. 15 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://living-future.org/lbc/>.

INTERNATIONAL LIVING FUTURE INSTITUTE - **Living Building Challenge: What if every single act of design and construction made the world a better place?** [Em linha]. Portland, OR : ILFI, 2022 [Consult. 15 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://living-future.org/lbc/>.

INTERNATIONAL WELL BUILDING INSTITUTE - **WELL Standard** [Em linha]. New York, New York : WELL, 2024 [Consult. 24 jan. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/overview>.

JAMEI, Elmira; VRCELJ, Zora - Biomimicry and the built environment, learning from Nature's solutions. **Applied Sciences**. 11:16 (2021) 7514. ISSN 2076-3417.

JANKOVIC, Ljubomir - **Designing zero carbon buildings using dynamic simulation methods**. 1ª ed. Oxon, UK : Routledge, 2012. ISBN 978-1-84971-294-1.

JIHUI YUAN - Impact of Insulation Type and Thickness on the Dynamic Thermal Characteristics of an External Wall Structure. **Sustainability**. 10:8 (2018) 2835. ISSN 2071-1050.

JOHNSON, Anita - **What Is Building Economics in Architecture** [Em linha]. [S.l.] : Architecture, 2023 [Consult. 16 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architecturemaker.com/what-is-building-economics-in-architecture/>.

JONES, Barry - Integrated project delivery (IPD) for maximizing design and construction considerations regarding sustainability. **Procedia Engineering**. 95:2014) 528–538. ISSN 1877-7058.

JONKER, Jan; FABER, Niels; HAAKER, Timber - **Quick scan circular business models : Whitepaper**Circulaire Maakindustrie. . The Hague, The Netherlands : Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, 2022

JORGE, Luís - Edifícios construídos com painéis de madeira lamelada-colada cruzada (X-Lam). Em LOURENÇO, P. B. *et al.* (Eds.) - **Universidade do Minho - Seminário Casas de Madeira** [Em linha]. [S.l.] : Universidade do Minho, 2013 [Consult. 25 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://silo.tips/download/edificios-construidos-com-paineis-de-madeira-lamelada-colada-cruzada-x-lam>. p. 49–62.

JOSEPH, Paul; TRETSIAKOVA-MCNALLY, Svetlana - Sustainable non-metallic building materials. **Sustainability**. 2:2 (2010) 400–427. ISSN 2071-1050.

JUNGCLAUS, Matt *et al.* - **Reducing embodied carbon in buildings : low-cost, high-value opportunities** [Em linha]. Basalt, CO : RMI, 2021 [Consult. 16 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:http://www.rmi.org/insight/reducing-embodied-carbon-in-buildings.>.

KALUNDBORG SYMBIOSIS - **Kalundborg Symbiosis : 50 years of circular production** [Em linha]. kalund ed. Kalundborg, DK : Kalundborg Symbiosis, 2024 [Consult. 21 jul. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.symbiosis.dk/en/>.

KAPLIŃSKI, Oleg; BONENBERG, Wojciech - Architecture and engineering: The challenges—trends—achievements. **Buildings**. 10:10 (2020) 181. ISSN 2075-5309.

KESIK, Ted J. - **Building science concepts** [Em linha]. Washington, DC : WBDG, 2019 [Consult. 11 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.wbdg.org/resources/building-science-concepts>.

KIBERT, Charles - **Sustainable construction: Green building design and delivery**. 2nd. ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-11421-6.

KIBERT, Charles J.; SENDZIMIR, Jan; GUY, Brad - Construction ecology and metabolism: natural system analogues for a sustainable built environment. **Construction Management & Economics**. [Em linha]2010). [Consult. 30 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.1080/014461900446867>.

KONG, Jiashu *et al.* - Application of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) in Net-Zero Energy Buildings (NZEBs). **Energies (19961073)**. . ISSN 1996-1073. 16:17 (2023) 6401-6401–6425. doi: 10.3390/en16176401.

KÖNIG, Holger *et al.* - **A life cycle approach to buildings: Principles, calculations, design tools**. 1ª ed. Munich, Germany : Detail, 2010. ISBN 978-3-920034-45-4.

KOSTER, M. *et al.* - **White Paper: Five essentials for successful circular bio-based construction initiatives** [Em linha]. Lille, France : Circular Bio-based Construction Industry (CBCI)., 2020 [Consult. 26 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.interreg2seas.eu/en/download/file/fid/47439>.

KOUMARI, Luka - **Uncoverd 02 - Guggenheim Museum Bilbao (Frank Gehry)** [Em linha]. Istanbul, Turkey : PA - ParametricArchitecture, 2021 [Consult. 26 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://parametric-architecture.com/uncoverd-02-guggenheim-museum-bilbao-frank-gehry/>.

KŌZŌWOOD - **Construir com Kōzōwood** [Em linha]. Esposende, Portugal : Kōzōwood, 2024 [Consult. 4 out. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://kozowood.com/construir-com-kozowood>.

KOZOWOOD INDUSTRIES - **CLT et wood frame: découvrez les principales différences** [Em linha]. Esposende, Portugal : Kozowood Industries, 2024 [Consult. 18 out. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://kozowood.com/en/journal/clt-et-wood-frame-decouvrez-les-principales-differences>.

KRYGIEL, Eddy; NIES, Bradley - **Green BIM : successful sustainable design with Building Information Modeling** [Em linha]. Hoboken, NJ : Wiley, 2008 [Consult. 13 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1530-9290.2010.00270.x>. ISBN 978-0-470-23960-5.

KUBBINGA, Ben *et al.* - **A framework for Circular Buildings: indicators for possible inclusion in BREEAM** [Em linha]. Amsterdam, Netherlands : Circle Economy, 2018 [Consult. 10 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.circle-economy.com/resources/a-framework-for-circular-buildings>.

LAIBACH, Natalie; BÖRNER, Jan; BRÖRING, Stefanie - Exploring the future of the bioeconomy: An expert-based scoping study examining key enabling technology fields with potential to foster the transition toward a bio-based economy. **Technology in Society**. 58:2019) 101118. ISSN 0160-791X.

LANCKRIET, Victor - **Renewable energy and the circular economy** [Em linha]. [s.l.] : Medium, 2021 [Consult. 9 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://victorlanckriet.medium.com/renewable-energy-and-the-circular-economy-66a983577784>.

LANG, Christine - Bioeconomy - from the Cologne paper to concepts for a global strategy. **EFB Bioeconomy Journal**. 2:2022) 100038. ISSN 2667-0410.

LASKI, Jonathan; BURROWS, Victoria - **From thousands To billions: Coordinated action towards 100% net zero carbon buildings by 2050** [Em linha]. London, UK : The World Green Building Council, 2017 [Consult. 30 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://worldgbc.org/wp-content/uploads/2022/03/From-Thousands-To-Billions-WorldGBC-report_FINAL-issue-310517.compressed.pdf>.

LAUSSELET, Carine *et al.* - Methods to Account for Design for Disassembly: Status of the Building Sector. **Buildings**. 13:4 (2023) 1012. ISSN 2075-5309.

LAYLA, Nawrin *et al.* - Sustainable Construction - Case studies 1: Building and refurbishment. Em POLLOCK, ERIC (Ed.) - **Sustainable Cities II**. Helsinki, Finland : Metropolia University of Applied Sciences, 2019. ISBN 978-952-328-163-9

LE DEN, Xavier *et al.* - **Supporting the development of a roadmap for the reduction of whole life carbon of buildings : Final report** [Em linha]. Brussels, Belgium : Ramboll, 2023 [Consult. 18 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://7520151.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7520151/RMC/Content/Ramboll%2c%20BPIE%2c%20KU%20Leuven_Technical%20Report_July%202023.pdf>.

LEARN BIOMIMICRY - **The top 10 real world examples of Biomimicry in Architecture** [Em linha]. Cape Town, South Africa : Learn Biomimicry, 2023 [Consult. 17 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.learnbiomimicry.com/blog/top-10-biomimicry-examples-architecture>.

LEGGETT, Jeremy - **Renewable energy and the circular economy - transforming the world, together** [Em linha]. London, UK : Ecologist, 2017 [Consult. 10 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://theecologist.org/2017/feb/01/renewable-energy-and-circular-economy-transforming-world-together>.

LEHNI, Markus - **A eco-eficiência: criar mais valor com menos impacto.** [Em linha]. 2ª impressão ed. Lisboa : Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável, 2001 [Consult. 29 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2013/11/publ-2004-Eco-eficiencia.pdf>. ISBN 2-940240-17-5.

LEWANDOWSKI, Iris *et al.* - Introduction. Em **Bioeconomy: shaping the transition to a sustaianble, biobased economy** [Em linha]. 1. ed. Cham, Switzerland : Springer Nature, 2018 [Consult. 22 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.1007/978-3-319-68152-8>. ISBN 978-3-319-68151-1

LIDERA - **LiderA. Orientação e certificação da sustentabilidade: especificaçõeS (V.4).** [Em linha]. Lisboa, Portugal : LiderA4all, 2019 [Consult. 24 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.lidera4all.com/especificacoes-v-4>.

LIFSET, Reid; GRAEDEL, Thomas E. - Industrial ecology: goals and definitions. Em **A Handbook of Industrial Ecology** [Em linha]. [S.l.] : Edward Elgar Publishing, 2002 [Consult. 30 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.elgaronline.com/display/1840645067.00009.xml>. ISBN 978-1-84376-547-9

LINH LE, Dinh; SALOMONE, Roberta; NGUYEN, Quan T. - Circular bio-based building materials : A literature review of case studies and sustainability assessment methods. **Building and Environment**. 244:2023) 110774. ISSN 0360-1323.

LOONELA, Vivian; DEJOND, Célia - **New European Bauhaus** [Em linha]. Brussels, Belgium : European Union, 2021 [Consult. 4 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_4626>.

LOPES, Vanessa - **ADENE: pobreza e reabilitação energética** [Em linha]. Algés, Portugal : Edifícios e Energia, 2023 [Consult. 15 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://edificioseenergia.pt/empresas/adene-pobreza-e-reabilitacao-energetica-1503/>.

LORENTE, J. Pedro - Reviewing the “Bilbao effect” inside and beyond the Guggenheim: Its coming of age in sprawling cultural landscapes. **Curator: The Museum Journal**. 66:4 (2023) 533–713. ISSN 2151-6952.

LOTUS, Jean - Ex SpaceX engineers making hemp-based OSB, structural timber. **HempBuild Magazine**. [Em linha]2021). [Consult. 8 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.hempbuildmag.com/home/ex-spacex-engineers-making-hemp-based-osb-structural-timber>.

LOURENÇO, José Marco *et al.* - The Use of Key Enabling Technologies in the Nearly Zero Energy Buildings Monitoring, Control and Intelligent Management. **Energies**. . ISSN 1996-1073. 14:17 (2021) 5524. doi: 10.3390/en14175524.

LUBELL, Sam - **How Milan’s Bosco Verticale has changed the way designers think about sustainable design.** [Em linha]. New York, NY : AD PRO, 2020 [Consult. 7 jul. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architecturaldigest.com/story/how-milans-bosco-verticale-has-changed-the-way-designers-think-about-sustainable-design>.

LUKER, Sam - **BREEAM In-Use: Version 6 Update** [Em linha]. London, UK : Greengage ENV, 2020 [Consult. 22 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.greengage-env.com/breeam-in-use-version-6-update/>.

MA YIXIAO - **Analysis of the correlation between indoor and outdoor parameters in a hemp-lime constructed house** [Em linha]. Mol, Belgium : Flemish Institute for

Technological Research NV, 2016 [Consult. 19 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://hempinabox.be/nl/info/#certificaten>.

MAGWOOD, Chris; HUYNH, Tracy; OLGYAY, Victor - **The hidden climate impact of residential construction : zeroing in on embodied carbon emissions for low-rise residential buildings in the United States** [Em linha]. Basalt, CO : RMI, 2023 [Consult. 1 dez. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://rmi.org/insight/hidden-climate-impact-of-residential-construction/>.

MAIREA FOUNDATION - **Villa Mairea** [Em linha]. Noormarkku, Finland : Mairea Foundation, 2023 [Consult. 2 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://villamairea.fi/en/villa-mairea/>.

MARINA PARQUE DAS NAÇÕES - **Pavilhão de Portugal** [Em linha]. Lisboa : Marina Parque das Nações, 2021 [Consult. 25 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://marinaparquedasnacoes.pt/o-que-fazer/parque-das-nacoes/pavilhao-de-portugal/>.

MARQUES, Rita Neto - Pacto Ecológico Europeu: melhorar o bem-estar e a saúde dos cidadãos e das gerações futuras. **Lusíada News**. [Em linha]2023). [Consult. 1 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://news.ulusiada.pt/Home/Detalhe/Detalhes/ArtMID/5407/ArticleID/4968/preview/true>. ISSN 1646-141X.

MARQUES, Rita Neto - «Objetivo 55»: reduzir em 55% as emissões de gases com efeito de estufa na Europa até 2030. **Lusíada News**. [Em linha]2023). [Consult. 28 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://news.ulusiada.pt/Home/Detalhe/Detalhes/ArtMID/5407/ArticleID/5292/preview/true>. ISSN 1646-141X.

MARTEK, Igor *et al.* - The sustainability narrative in Contemporary Architecture: falling short of building a sustainable future. **Sustainability**. 10:4 (2018) 981. ISSN 2071-1050.

MASSELOT, Pierre *et al.* - Excess mortality attributed to heat and cold: a health impact assessment study in 854 cities in Europe. **The Lancet Planetary Health**. 7:4 (2023) e271–e281. ISSN 2542-5196.

MATEUS, Ricardo; BRAGANÇA, Luís - **Tecnologias construtivas para a sustentabilidade da Construção**Prometeu. . Porto, Portugal : Edições Ecopy, 2006. ISBN 978-989-95194-1-1.

MAXIMO, Yasmin Imparato *et al.* - Forest Bioeconomy in Brazil: Potential Innovative Products from the Forest Sector. **Land**. 11:2022) 1297. ISSN ISSN 2073-445X.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael - **The Hannover Principles: Design for Sustainability. Prepared for EXPO 2000 The World's Fair Hannover, Germany** [Em linha]. Charlottesville, VA : William McDonough & Partners, 1992 [Consult. 31 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://mcdonough.com/wp-content/uploads/2013/03/Hannover-Principles-1992.pdf>.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael - **Buildings Like Trees, Cities Like Forests**Catalog of the Future. [Em linha]. London, UK : Pearson Press, 2002 [Consult. 21 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://mcdonough.com/writings/buildings-like-trees-cities-like-forests/>.

MCMORROUGH, Julia - **Arquitetura : referências + boas práticas & especificações**. Lisboa, Portugal : Quimera Editores, 2014. ISBN 978-972-589-248-0.

MEIRELES, Inês *et al.* - Comparative environmental life cycle assessment of partition walls: Innovative prefabricated systems vs conventional construction. **Cleaner Environmental Systems**. 12:2024) 100179. ISSN 2666-7894.

MEIRELES, Inês *et al.* - Comparative environmental life cycle assessment of partition walls: Innovative prefabricated systems vs conventional construction. **Cleaner Environmental Systems**. [Em linha] 12:2024) 100179. [Consult. 31 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100179>. ISSN 2666-7894.

MELOTTO, Ariadne Medeiros *et al.* - A Sustentabilidade na obra Bosco Verticale de Stefano Boeri como novo paradigma da Arquitetura Contemporânea. **5º Simpósio de Sustentabilidade e Contemporaneidade nas Ciências Sociais**. [Em linha]2017). Disponível em WWW:<URL:https://www.fag.edu.br/upload/contemporaneidade/anais/594c079669be5.pdf>. ISSN 2318-0633.

METİN, Buket; İPEKÇ, Cahide Aydin - An approach for sustainable buildings: Architectural deconstruction design. Em **ARCHDESIGN '15 - II. Architectural Design Conference** [Em linha]. Istanbul, Turkey : Mimar Sinan Fine Arts University, 2015 [Consult. 16 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.researchgate.net/publication/279853225_An_Approach_for_Sustainable_Buildings_Architectural_Deconstruction_Design>. p. 519–527.

MINUNNO, Roberto *et al.* - Strategies for Applying the Circular Economy to Prefabricated Buildings. **Buildings**. 8:9 (2018) 125. ISSN 2075-5309.

MODVION - **Modvion - We build wind turbine towers. In wood** [Em linha]. Gothenburg, Sweden : Modvion, 2023 [Consult. 16 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://modvion.com/>.

MONTANER, Josep Maria - **Depois do movimento moderno: arquitetura da segunda metade do século XX**. Barcelona, España : Editorial Gustavo Gili, 2001. ISBN 84-252-1828-4.

MUTULI, Ian - **Contemporary Architecture; History, characteristics, and examples** [Em linha]. Berlin, Germany : Archute, 2023 [Consult. 6 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archute.com/contemporary-architecture/>.

NEMETSCHEK GROUP - **The Top 7 Trends for the AEC/O Industry in 2022** [Em linha]. Munich, Germany : Nemetschek Group, 2022 [Consult. 31 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://blog.nemetschek.com/en/topics-and-insights/the-top-7-trends-for-the-aeco-industry-in-2022>.

NGUYEN, Peter Q. *et al.* - Engineered living materials: prospects and challenges for using biological systems to direct the assembly of smart materials. **Advanced Materials**. 30:19 (2018) 1704847. ISSN 1521-4095.

NUNES, João - Biomimética: Biomimicry. Em AZVEDO, BÁRBARA GONÇALVES DE (Ed.) - **Energias renováveis: Renewable energies**. Porto, Portugal : Atelier Nunes e Pã, 2009. ISBN 978-989-96529-0-3. p. 46–50.

NUO ZHANG; QI HAN; de VRIES, Bauke - Building circularity assessment in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A new framework. **Sustainability**. 13:22 (2021) 12466. ISSN 2071-1050.

NUSSHOLZ, Julia *et al.* - From circular strategies to actions: 65 European circular building cases and their decarbonisation potential. **Resources, Conservation & Recycling Advances**. 17:2023) 200130. ISSN 2667-3789.

OBRAS360 - **XPS poliestireno extrudido isolamento finnfoam ETICS 300 paredes pontes térmicas rugoso sem pele** [Em linha]. Camarate, Lisboa : Sotecnisol, 2024 [Consult. 13 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.obras360.pt/0010020440ff-painel-isolamento-termico-em-poliestireno-extrudido-finnfoam-etics-300>.

OESTERREICH, Thuy Duong; TEUTEBERG, Frank - Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. **Computers in Industry**. 83:2016) 121–139. ISSN 0166-3615.

OLIVEIRA, C.; PINTO, A. Reaes - Características de sustentabilidade de materiais de construção renováveis. Em **Contribuições para a construção sustentável** [Em linha]. 1ª ed. Lisboa, Portugal : Universidade Lusíada Editora, 2018 Disponível em WWW:<URL:http://repositorio.ulusiada.pt/handle/11067/451>. ISBN 978-989-640-216-7

OLIVEIRA, Sonja *et al.* - Transcending disciplines in architecture, structural and building services engineering : a new multidisciplinary educational approach. **International Journal of Technology and Design Education**. 32:2 (2021) 1247–1265. ISSN 1573-1804.

OMA OFFICE WORK - **CCTV – Headquarters** [Em linha]. Rotterdam, The Netherlands : OMA, 2023 [Consult. 21 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.oma.com/projects/cctv-headquarters>.

ONE CLICK LCA - **Life cycle assessment for buildings : Why it matters and how to use it** [Em linha]. Helsinki, Finland : One Click LCA, 2021 [Consult. 1 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.oneclicklca.com/building-life-cycle-assessment-ebook/>.

ORDEM DOS ENGENHEIROS REGIÃO NORTE. DELEGAÇÃO VILA REAL - **Houve visita técnica ao Hotel Antas Garden** [Em linha]. Porto, Portugal : OERN, 2023 [Consult. 27 mai. 2024]. Disponível em

WWW:<URL:https://haengenharia.pt/noticias/houve-visita-tecnica-ao-hotel-antas-garden/>.

ORGANSCHI, Alan - Building a planetary solution : regenerative design and construction for the future of humam settlement. **Revista Arquitectura Lusíada**. ICCSBE 2025 1ª Conferência Internacional sobre Ambiente Construído Sustentável e Circular:Número especial (2025) (2025) 13–15. ISSN 1647-9009.

OWOO, Betty - ISM Architecten expands modernist house BEEV with rooftop volume. **Dezeen**. [Em linha]2023). [Consult. 14 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2023/11/10/beev-ism-architecten-modernist-house-belgium/>.

PAGNOTTA, Brian - Gallery of AD Classics: The Guggenheim Museum Bilbao / Gehry Partners. **ArchDaily**. [Em linha]2013). [Consult. 21 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archdaily.com/422470/ad-classics-the-guggenheim-museum-bilbao-frank-gehry>. ISSN 0719-8884.

PALAHÍ, Marc *et al.* - **Investing in Nature as the true engine of our economy: A 10-point Action Plan for a Circular Bioeconomy of Wellbeing.**Knowlwdge to Action 02. [Em linha]. Joensuu, Finland : European Forest Institute, 2020 [Consult. 22 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.36333/k2a02>. ISBN 978-952-5980-92-9.

PALLASMAA, Juhani - **Os olhos da pele. A arquitetura e os sentidos**. Porto Alegre, Brasil : Bookman, 2011. ISBN 978-85-7780-777-2.

PALMITESSA, Francesca - **Circular Economy and Tourism. The Ecobnb's Guide** [Em linha], atual. 27 nov. 2019. [Consult. 28 abr. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ecobnb.com/blog/2019/11/circular-economy-and-tourism-the-ecobnbs-guide/>.

PARKES, James - The Dezeen guide to biomaterials in architecture, design and interiors. **Dezeen**. [Em linha]2021). [Consult. 22 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2021/12/09/dezeen-guide-biomaterials-architecture-design-interiors/>.

PARKES, James - Schmidt Hammer Lassen unveils design for world's tallest timber building. **Dezeen**. [Em linha]2022). [Consult. 24 out. 2024]. Disponível em

WWW:<URL:https://www.dezeen.com/2022/04/14/tallest-timber-building-schmidt-hammer-lassen-winterthur/>.

PAVITHRAN, Rachana - **Economics and Sustainable Development: Overview of Economics in Sustainable Architecture** [Em linha]. New Delhi, India : RTF - Rethinking The Future, 2022 [Consult. 16 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.re-thinkingthefuture.com/sustainable-architecture/a9940-economics-and-sustainable-development/>.

PAVLOVA, Paulina - **The Regenerative Revolution: exploring the why and what of regenerative business and Its champions** [Em linha]. San Francisco, CA : Medium, 2023 [Consult. 19 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://medium.com/@teamyour2040/the-regenerative-revolution-exploring-the-why-and-what-of-regenerative-business-and-its-champions-f565881bffb>.

PAWLYN, Michael - **What is regenerative architecture?** [Em linha], atual. 13 set. 2019. [Consult. 20 abr. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ribaj.com/intelligence/climate-change-emergency-regenerative-design-michael-pawlyn>.

PEARCE, Mick - Innovation: Industry. Passively cooled building Inspired by termite mounds. Em **Asknature** [Em linha]. Missoula, MT : The Biomimicry Institute, 2021 [Consult. 19 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://asknature.org/innovation/passively-cooled-building-inspired-by-termite-mounds/>.

PEARLMUTTER, David *et al.* - Closing water cycles in the built environment through nature-based solutions: The contribution of vertical greening systems and green roofs. **Water**. 13:16 (2021) 2165. ISSN 2073-4441.

PELSMAKERS, Sofie- - **The environmental design pocketbook** [Em linha]. 2nd. ed. London, UK : RIBA Publishing, 2015 [Consult. 13 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.researchgate.net/publication/275339500_The_Environmental_Design_Pocketbook_Edition_2_2015>. ISBN 978-1-85946-548-6.

PENEDA, Constança - **Incentivar a sustentabilidade empresarial**Cadernos I.E.S.F. . Vila Nova de Gaia, Portugal : ADEACE, 2008. ISBN 978-989-95794-0-8.

PERKO, Howard A. - **Helical piles: A pratical guide to design and installation** [Em linha]. 1st. ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2009 [Consult. 14 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470549063>. ISBN 978-0-470-40479-9.

PERRIER, Nathalie *et al.* - Construction 4.0: a survey of research trends. **Journal of Information Technology in Construction**. 25:24 (2020) 416–437. ISSN 1874-4753.

PETERS, M. *et al.* - **Buildings as material banks and the need for innovative business models** [Em linha]. Brussels, Belgium : BAMB, 2017 Disponível em WWW:<URL:https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2017/11/BAMB_Business-Models_20171114_extract.pdf>.

PINHEIRO, Manuel Duarte - **Apresentação geral do LiderA : norma dos princípios programáticos (V4.00a).** [Em linha]. [S.l.] : LiderA4all, 2019 [Consult. 24 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.lidera4all.com/_files/ugd/a7dea0_6370843b36e14eb78e9b3347194d473f.pdf>.

PINTO, A. Reaes - A pré-fabricação na indústria da construção. Em **1º Congresso Nacional da Indústria da Pré-fabricação em Betão**. Lisboa, Portugal : Associação Nacional dos Industriais dos Produtos de Construção, 2000v. Volume I : comunicações ao Congresso.

PINTO, A. Reaes; INÁCIO, M. Marques - A evolução da construção no sentido da sustentabilidade : contribuição para uma estratégia nacional. Comunicação apresentada no Congresso Nacional da Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2001. Em PINTO, ALBERTO CRUZ REAES (Ed.) - **Contribuições para a construção sustentável** [Em linha]. 1ª ed. Lisboa : Universidade Lusíada Editora, 2018 [Consult. 13 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:http://koha.lis.ulusiada.pt/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=273781>. ISBN 978-989-640-216-7. p. 35–46.

PINTO, Alberto Cruz Reaes - **External walls rehabilitation of prefabricated buildings : residential units of Santo António dos Cavaleiros and Quinta do Morgado** [Em linha]. Lisboa, Portugal : Universidade Lusíada Editora, 2023 [Consult. 4 jun. 2024]. Disponível em

WWW:<URL:http://repositorio.ulusiada.pt/handle/11067/7264>. ISBN 978-989-640-269-3.

PINTO, Alberto Cruz Reaes; DIAS, Bruno Simões Duarte - **Módulo de parede exterior pré-fabricado : a contribuição dos materiais e das tecnologias para a construção sustentável** [Em linha]. 1ª ed. Lisboa, Portugal : Universidade Lusíada Editora, 2018 Disponível em WWW:<URL:http://koha.lis.ulusiada.pt/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=273071>. ISBN 978-989-640-204-4.

PINTO, Alberto Reaes - O desenho das envolventes exteriores verticais dos edifícios e a existência de falhas, num processo de degradação. Em **3º ENCORE - Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios. Actas.** 1ª edição ed. Lisboa, Portugal : LNEC, 2003. ISBN 972-49-1960-9v. 2. p. 1209–1217.

PINTO, Alberto Reaes - A pré-fabricação na indústria da construção : comunicação apresentada no 1º Congresso de Pré-fabricação em Betão, ANIPC 2000. Em **Contribuições para a construção sustentável**. 1ª ed. Lisboa, Portugal : Universidade Lusíada Editora, 2018. ISBN 978-989-640-216-7

PINTO, Alberto Reaes - Total Heavy Prefabrication: Santo António dos Cavaleiros (SAC) and Quinta do Morgado (QM). Overview of the building process, exterior panel pathologies and a study for their rehabilitation. **Cidades, Comunidades e Territórios**. 2022) 102–136. ISSN 2182-3030.

PINTO, Alberto Reaes - «O desenho [dos edifícios] cada vez tem mais carga de conhecimentos». Entrevistado por Sónia Sul. **Edifícios e Energia**. 149 (2023) 34–40.

PINTO, Alberto Reaes; URBANO, Marlene Canudo - Perspective chapter : prefabricated low-carbon panels for exterior walls. Em NOGUCHI, MASA (Ed.) - **Prefabricated construction for sustainability and masss customization**Civil Engineering. [Em linha]. London, United Kingdom : IntechOpen, 2024 [Consult. 1 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:10.5772/intechopen.114131>. ISBN 978-1-83769-252-1v. 6.

PLANELLES ARAGÓ, José *et al.* - Simbiosis industrial : conceptos, implicaciones y casos de estudio en la industria cerámica. **RETEMA, Revista Técnica de Medio Ambiente**. 232 (2021) 24–29. ISSN 1130-9881.

PLANTD - **Build the future: Carbon negative materials for every new home and building on earth.** [Em linha]. Oxford, North Carolina : Plantd, Inc., 2024 [Consult. 12 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.plantdmaterials.com/>.

PLATAFORMA FLORESTAS.PT - **O que são simbioses industriais e quais os seus benefícios?** [Em linha]. [S.l.] : Florestas.pt, 2023 [Consult. 21 jul. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://florestas.pt/saiba-mais/o-que-sao-simbioses-industriais-e-quais-os-seus-beneficios/>.

POGGI, Francesca; AMADO, Miguel P. - Sustentabilidade em edifícios de habitação: um novo sistema de certificação. Em **2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono**. Caparica, Portugal : Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa, 2012

POLYSOLAR - **Guide to BIPV: Building Integrated Photovoltaics** [Em linha]. Cambridge, UK : Polysolar Ltd, 2015 [Consult. 18 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.academia.edu/34433765/Guide_to_BIPV_Building_Integrated_Photovoltaics_Polysolar_Limited_2015>.

POMPONI, Francesco *et al.* - Buildings as a global carbon sink? A reality check on feasibility limits. **One Earth**. 3:2 (2020) 157–161. ISSN 2590-3330, 2590-3322.

POMPONI, Francesco; MONCASTER, Alice - Circular economy for the built environment: A research framework |. **Journal of Cleaner Production**. 143:2017) 710–718.

PORTEOUS, Colin - **The new eco-architecture: alternatives from the modern movement**. 1ª ed. London, UK : Spon Press, 2002. ISBN 0-415-25624-0.

PORTOGHESI, Paolo - **Depois da arquitetura moderna**Arte comunicação. . Lisboa, Portugal : Edições 70, 1985

PORTUGAL . MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO, Diário Da - Decreto-Lei n.º 118/2013. Em **Diário da República**1ª. [Em linha]. Lisboa, Portugal : INCM, 2013 [Consult. 5 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/118-2013-499237>. p. 4988–5005.

PORTUGAL. AMBIENTE E AÇÃO CLIMÁTICA - **Preparação do novo Plano de Ação para a Economia Circular : PAEC** [Em linha]. Lisboa, Portugal : eco.nomia, 2023 [Consult. 25 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://eco.nomia.pt/pt/recursos/noticias/preparacao-do-novo-plano-de-acao-para-a-economia-circular--paec>.

PORTUGAL. AMBIENTE E AÇÃO CLIMÁTICA. DIREÇÃO-GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA - Despacho n.º 6476-E/2021. Em **Diário da República**2ª. [Em linha]. Lisboa, Portugal : INCM, 2021 [Consult. 8 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/despacho/6476-e-2021-166302786>.v. PARTE C. p. 330-(30)-330-(32).

PORTUGAL. AMBIENTE E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA - Portaria n.º 98/2019. Em **Diário da República**1ª. [Em linha]. Lisboa, Portugal : INCM, 2019 [Consult. 1 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/98-2019-121854639>. p. 1816–1818.

PORTUGAL. DIREÇÃO-GERAL DAS ATIVIDADES ECONÓMICAS - **Economia Circular** [Em linha]. Lisboa, Portugal : DGAE, 2023 [Consult. 23 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.dgae.gov.pt/servicos/sustentabilidade-empresarial/economia-circular.aspx>.

PORTUGAL. GABINETE DO MINISTRO ADJUNTO E DA ECONOMIA - **Pactos sectoriais para a competitividade e internacionalização assinados entre o Governo e mais de 690 entidades : nota à comunicação social** [Em linha]. Lisboa, Portugal : [s.n.], 2019 [Consult. 24 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=%3d%3dBAAAAB%2bLCAAAAAAABAAzN7EwAAAf3pxeBAAAAA%3d%3d>.

PORTUGAL. GRUPO INTERMINISTERIAL ECONOMIA CIRCULAR - **Liderar a transição: Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal 2017-2020** [Em linha]. Lisboa, Portugal : eco.nomia, 2017 [Consult. 26 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://economiacircular.gov.pt/pt/economia-circular/principios>.

PORTUGAL. GRUPO INTERMINISTERIAL ECONOMIA CIRCULAR - **Liderar a transição: Plano de Ação para a economia circular em Portugal 2017-2020. Proposta de ação**. Lisboa? : [s.n.], 2017

PORTUGAL. MINISTÉRIO DA ECONOMIA; PLATAFORMA TECNOLÓGICA PORTUGUESA DA CONSTRUÇÃO - **Pacto Setorial para a Competitividade e Internacionalização : setor da Arquitetura, Engenharia e Construção : 26 de março de 2019** [Em linha]. Lisboa, Portugal : [s.n.], 2019 [Consult. 24 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.iapmei.pt/PRODUTOS-E-SERVICOS/Empreendedorismo-Inovacao/Eficiencia-Coletiva-e-Clusters/DOCS/Protocolo-Cluster-AEC.aspx>.

PORTUGAL. PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS - Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017: Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal. Em **Diário da República** 1ª. [Em linha]. Lisboa, Portugal : INCM, 2017 [Consult. 23 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://dre.pt/dre/detalhe/resolucao-conselho-ministros/190-a-2017-114337039>. p. 6584-(54)-6584-(73).

PORTUGAL. PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS - Decreto-Lei n.º 101-D/2020 , de 7 de dezembro : com as alterações introduzidas por Decreto-Lei n.º 102/2021. Em **Diário da República** 1ª. [Em linha]. Lisboa, Portugal : INCM, 2021 [Consult. 8 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/decreto-lei/2020-150571263-150661180>. p. 1–29.

PORTUGAL. PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS - Resolução do Conselho de Ministros n.º 150-A/2022: Plano Nacional para o Radão. Em **Diário da República** 1ª. [Em linha]. Lisboa, Portugal : INCM, 2022 [Consult. 30 jan. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/150-a-2022-205493469>. p. 171-(14)-6584-(91).

PRESERVATION GREEN LAB - **The greenest building: quantifying the environmental value of building reuse** [Em linha]. Washington, DC : National Trust for Historic Preservation, 2011 [Consult. 15 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.bostonpreservation.org/resource-item/greenest-building-quantifying-environmental-value-building-reuse>.

PW CONSULTING - **Architecture: AEC Industry 2022** [Em linha]. Hong Kong : PW Consulting, 2021 [Consult. 23 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://pmarketresearch.com/aec-industry-research-2021/>.

QUESADA-GARCÍA, Santiago; VALERO-FLORES, Pablo; LOZANO-GÓMEZ, María - Towards a healthy architecture: A new paradigm in the design and construction of buildings. **Buildings**. 13:8 (2023) 2001. ISSN 2075-5309.

RAMAHANDRY, Tiana *et al.* - **Key enabling technologies for Europe's technological sovereignty: Panel for the Future of Science and Technology** [Em linha]. Strasbourg, France : Scientific Foresight Unit (STOA). EPRS: European Parliamentary Research Service. European Parliament, 2021 [Consult. 5 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU(2021)697184>. ISBN 978-92-846-8666-7.

RAMOS, Carlos Matias; FIGUEIREDO, Elói - **Engenharia civil : uma perspetiva sobre a formação e a profissão** [Em linha]. 1ª edição ed. [S.l.] : Edições Universitárias Lusófonas, 2020 [Consult. 24 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ulusofona.pt/evento/engenharia-civil-formacao-profissao>. ISBN 978-989-757-133-6.

RANGEL, Bárbara *et al.* - Integrated design concept in civil engineering education. **International Journal of Engineering Education**. 32:3(A) (2016) 1279–1288. ISSN 0949-149X.

RANGEL, Bárbara; CARNEIRO, Vítor; ABRANTES, Vítor - Projeto integrado como estratégia de desenho fundamentada nas exigencias de desempenho do edifício. Em **Proceedings of the VII Elagec - II SeIN2co : nuevas tendencias en la construcción sostenible** [Em linha]. Bogotá, Colombia : Universidad de los Andes, 2016 Disponível em WWW:<URL:https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/86577/2/162748.pdf>. p. 1–9.

RANGEL, Juliana - **Certificação Cradle to Cradle para produtos sustentáveis** [Em linha]. Rio de Janeiro, Brasil : SustentArqui, 2020 [Consult. 4 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://sustentarqui.com.br/certificacao-cradle-to-cradle-para-produtos-sustentaveis/>.

REED, Bill - Shifting from 'sustainability' to regeneration. **Building Research & Information**. 35:6 (2007) 674–680. ISSN 1466-4321.

REILLY, A. *et al.* - The thermal diffusivity of hemplime, and a method of direct measurement. **Construction and Building Materials**. 212:2019) 707–715. ISSN 0950-0618.

REM EDITORIAL TEAM - **Wind: EU Invests in wood technology company Modvion** [Em linha]. Madrid, Spain : Renewable Energy Magazine, 2022 [Consult. 16 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.renewableenergymagazine.com/wind/eu-invests-in-wood-technology-company-modvion-20220128>.

RENZO PIANO BUILDING WORKSHOP - **Marunouchi Tokio Marine** [Em linha]. Paris, France : RPBW - Renzo Piano Building Workshop, 2023 [Consult. 9 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:http://www.rpbw.com/project/marunouchi-tokio-marine>.

REZEK, Thayane; SCHEER, Sérgio; TAVARES, Sérgio - Adoção de BIM para economia circular no setor da construção. Em **4º Congresso Português de Building Information Modelling vol. 1 - ptBIM** [Em linha]. [S.l.] : UMinho Editora, 2022 Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.53>.

RIBEIRO, David Correia - Avaliação da aplicabilidade do IPD em Portugal. 2012).

RICHARDS, J. M. - **Introducción a la Arquitectura Moderna**Biblioteca de Arquitectura. . 1ª edición en español ed. Buenos Aires, Argentina : Ediciones Infinito, 1959

RIOS, Fernanda Cruz; CHONG, Wai K.; GRAU, David - Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities. Em **Procedia Engineering: Design for disassembly and deconstruction - challenges and opportunities** [Em linha] [Consult. 17 abr. 2020]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.485>.v. 118. p. 1296–1304.

ROAF, Susan; HORSLEY, Andrew; GUPTA, Rajat - **Closing the loop: Benchmarks for sustainable buildings**. London, UK : RIBA Enterprises, 2004. ISBN 1-85946-118-2.

ROBERTSON-FALL, Tansy - **Renewable energy growth depends on a circular economy for batteries** [Em linha]. Oakland CA : GreenBiz, 2020 [Consult. 9 mai. 2023].

Disponível em WWW:<URL:https://www.greenbiz.com/article/renewable-energy-growth-depends-circular-economy-batteries>.

ROBERTSON-FALL, Tansy - **Why renewable energy infrastructure needs to be built for a circular economy** [Em linha]. Oakland CA : GreenBiz, 2022 Disponível em WWW:<URL:https://www.greenbiz.com/article/why-renewable-energy-infrastructure-needs-be-built-circular-economy>.

ROCHA, Douglas - **Análise das potencialidades de utilização da inércia higroscópica em edifícios** [Em linha]. Caparica, Portugal : Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Perfil de Construção, 2016 [Consult. 13 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://run.unl.pt/handle/10362/20374>.

RÖCK, Martin *et al.* - Embodied GHG emissions of buildings :The hidden challenge for effective climate change mitigation. **Applied Energy**. 258:2020) 114107. ISSN 0306-2619.

RODRIGUES, Valdemar J. - **Desenvolvimento Sustentável: Uma introdução crítica**. 1.ª ed. Parede, Portugal : Princípia, 2009. ISBN 978-989-8131-42-3.

ROSENBLOOM, Eva *et al.* - **Transforming existing buildings from climate liabilities to climate assets : low-embodied-carbon and carbon storing materials in building retrofits can reduce total building emissions.** [Em linha]. Boulder, CO : RMI, 2023 [Consult. 25 fev. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://rmi.org/insight/transforming-existing-buildings-from-climate-liabilities-to-climate-assets/>.

ROSENFIELD, Karissa - Tadao Ando to expand Pulitzer Arts Foundation in St. Louis. [Em linha]2014). [Consult. 7 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archdaily.com/509134/tadao-ando-to-expand-pulitzer-arts-foundation-in-st-louis>. ISSN 0719-8884.

RUTKOWSKI, Claire - **Six trends driving the Architecture, Engineering and Construction Industry** [Em linha]. Jersey City, NJ : Forbes, 2021 [Consult. 22 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2021/05/05/six-trends-driving-the-architecture-engineering-and-construction-industry/>.

SALIHBEGOVIC, Amira; SALIHBEGOVIC, Amra - Natural Materials in Contemporary Low-Tech Architecture. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. 960:4 (2020) 042012. ISSN 1757-899X.

SANDANAYAKE, Malindu *et al.* - Applications of solar panel waste in pavement construction: an overview. **Sustainability**. 14:22 (2022) 14823. ISSN 2071-1050.

SANTIAGO, Pedro - BIM e design generativo como vetores para a construção circular e a descarbonização do ambiente construído. **Revista Arquitectura Lusíada**. ICCSBE 2025 1ª Conferência Internacional sobre Ambiente Construído Sustentável e Circular:Número especial (2025) (2025) 83–84. ISSN 1647-9009.

SANTOS, Filipe Duarte - **Alterações globais: Os desafios e os riscos presentes e futuros**. 1ª ed. Lisboa, Portugal : Fundação Francisco Manuel dos Santos, 2012. ISBN 978-989-8424-55-6.

SATHEESAN, Arjun - **A crossover between economics and architecture** [Em linha]. New Delhi, India : RTF - Rethinking The Future, 2022 [Consult. 15 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.re-thinkingthefuture.com/architectural-community/a9384-a-crossover-between-economics-and-architecture/>.

SCANDINAVIANDESIGN.COM - **Alvar Aalto Design Seminar: Biosymbiosis; Top bio-based design and innovations 24–25/5 2022** [Em linha]. Malmö, Sweden : Scandinaviandesign.com, 2022 [Consult. 31 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.scandinaviandesign.com/alvar-aalto-design-seminar-biosymbiosis-top-bio-based-design-and-innovations-24-25-5-2022/>.

SCHICKEDANTZ, Roger - **Cradle To Cradle Design™ integration for building materials selection and optimization** [Em linha]. Charlottesville, VA : William McDonough + Partners, 2019 Disponível em WWW:<URL:https://mcdonoughpartners.com/wp-content/uploads/2020/06/C2C-Certified-Design-Integration-Brochure_190611.pdf>.

SCHMIDHEINY, Stephan; BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT - **Changing Course: a global business perspective on development and the environment**. Cambridge, Massachusetts : The MIT Press, 1992. ISBN 0-262-69153-1.

SCHMIDT HAMMER LASSEN ARCHITECTS - **Rocket&Tigerli** [Em linha]. Copenhagen, Denmark : SHT, 2024 [Consult. 8 out. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.shl.dk/work/rocket-tigerli>.

SCHUT, Evert; CRIELAARD, Machiel; MESMAN, Miranda - **Circular economy in the Dutch construction sector** [Em linha]. [S.l.] : Rijkswaterstaat - Ministry of Infrastucture and the Environment, 2015 [Consult. 13 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_148110_31/1/>.

SEMPERGREEN - **Detention roofs and retention roofs against flooding** [Em linha]. Odijk, The Netherlands : Sempergreen, 2021 [Consult. 31 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.sempergreen.com/en/about-us/news/detention-and-retention-roofs-against-flooding>.

SHAFTEL, Holly (ED.) - **Responding to climate change** [Em linha]. [S.l.] : Earth Science Communications Team. NASA's Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology, 2023 [Consult. 25 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://climate.nasa.gov/solutions/adaptation-mitigation>.

SHARMA, Bhavna; GATÓO, Ana; RAMAGE, Michael - Engineered bamboo for structural applications. **Construction and Building Materials**. 81:2015) 66–73. ISSN 0950-0618.

SHIGERU BAN ARCHITECTS - **Aspen Art Museum** [Em linha]. Tokyo, Japan : SBA - Shigeru Ban Architects, 2014 [Consult. 7 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://shigerubanarchitects.com/works/cultural/aspen-art-museum/>.

SHINE, Erin - Bamboo vs. steel : what to consider with each when building. **Building Renewable**. [Em linha]2024). [Consult. 9 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://buildingrenewable.com/bamboo-vs-steel-what-to-consider-in-building/>.

SILVA, Bruna; PROLA, Luís; SILVA, José G. - Green steel : o impacto na sustentabilidade da construção civil. **Revista Arquitectura Lusíada**. ICCSBE 2025 1ª Conferência Internacional sobre Ambiente Construído Sustentável e Circular:Número especial (2025) (2025) 29–30. ISSN 1647-9009.

SILVA, Nuno Miguel - **Maior edifício português em madeira construído em Lisboa** [Em linha], atual. 6 ago. 2019. [Consult. 26 mai. 2023]. Disponível em

WWW:<URL:https://jornaleconomico.pt/noticias/maior-edificio-portugues-em-madeira-vai-ser-construido-em-lisboa-475952/>.

SILVA, Vânia - **Simbiose industrial : mais colaboração, mais circularidade e menos resíduos** [Em linha]. Lisboa, Portugal : INEGI, 2024 [Consult. 19 jul. 2024]. Disponível em WWW:<URL:http://www.inegi.pt/pt/noticias/simbiose-industrial-mais-colaboracao-mais-circularidade-e-menos-residuos/>.

SIMÕES, Tânia *et al.* - Contributo de betões de cânhamo na regulação passiva da humidade no interior dos edifícios. Em **V Jornadas FICAL : Fórum Ibérico da Cal** [Em linha]. Lisboa, Portugal : LNEC, 2016 [Consult. 2 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://run.unl.pt/handle/10362/18282>. ISBN 978-972-49-2281-2. p. 307–316.

SIZA, Álvaro - **Imaginar a evidência**. Reimp. ed. Lisboa, Portugal : Edições 70, 2019. ISBN 978-972-44-1390-7.

SNELL, Clark; CALLAHAN, Tim - **Building green: a complete how-to guide to alternative building methods. Earth plaster, straw bale, cordwood, cob, living roofs.** 2nd ed. ed. New York, NY : Lark Books, 2009. ISBN 978-1-60059-534-9.

SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES - **Ensemble pour créer un cadre de vie durable : telle est la vision vers laquelle tendent tous les efforts de la SIA et de ses membres.** [Em linha]. Zurich , Suisse : SIA, 2024 [Consult. 26 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.sia.ch/fr/cms/organisation/a-propos>.

SOKOL, David; MAFI, Nick; MCLAUGHLIN, Katherine - **33 spectacular buildings designed by Frank Gehry** [Em linha]. New York, NY : Architectural Digest, 2023 [Consult. 7 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architecturaldigest.com/gallery/best-of-frank-gehry-slideshow>.

SOUZA, Eduardo - Materials innovations : What is Structural Engineered Bamboo (SEB)? **ArchDaily**. [Em linha]2023). [Consult. 18 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.archdaily.com/991835/materials-innovations-what-is-structural-engineered-bamboo-seb>. ISSN 0719-8884.

SPARROW, Alex - **Hempcrete buildings : thermal performance and costs** [Em linha]. Cromford, UK : UK Hempcrete, 2014 [Consult. 29 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ukhempcrete.com/hempcrete-buildings-thermal-performance-and-costs/>.

STAHEL, Walter R. - The circular economy. **Nature**. 531:7595 (2016) 435–438. ISSN 1476-4687.

STATE OF GREEN - **Circular economy: Denmark as a circular economy solution hub** [Em linha]. 1ª ed. Copenhagen : State of Green, 2016 [Consult. 20 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://economiacircular.gov.pt/contents/documentacao/10574-3787.pdf>.

STERLING, Theodor D.; COLLETT, Chris; RUMEL, Davi - A epidemiologia dos «edifícios doentes». **Revista de Saúde Pública**. 25:1 (1991) 56–63. ISSN 0034-8910.

STERN, Robert A. M. - The promise and threat of global architecture. **The Yale Review**. 99:4 (2011) 16–22. ISSN 1467-9736.

STORA ENSO WOOD PRODUCTS GMBH - **CLT by Stora Enso : technical brochure** [Em linha]. Donau, Austria : Stora Enso Wood Products GmbH, 2017 Disponível em WWW:<URL:https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-brochures/wood-products/clt-by-stora-enso-technical-brochure-en.pdf>.

SURANA, Prachi - **Characteristics of Contemporary Architecture** [Em linha]. New Delhi, India : Rethinking The Future, 2020 [Consult. 30 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.re-thinkingthefuture.com/architectural-styles/a2423-characteristics-of-contemporary-architecture/>.

SUSTAINABLE FACILITIES TOOL - **Life Cycle Assessment and Buildings** [Em linha]. Washington, DC : U.S. General Services Administration, 2023 [Consult. 8 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://sftool.gov/plan/403/life-cycle-assessment-buildings>.

SZACKA, Léa-Catherine; PATTEEUW, Véronique - **Critical Regionalism for our time** [Em linha]. London, UK : The Architectural Review, 2019 [Consult. 6 fev. 2024].

Disponível em WWW:<URL:https://www.architectural-review.com/essays/critical-regionalism-for-our-time>.

TAFURI, Manfredo; DAL CO, Francesco - **Architettura contemporanea**Storia dell´architettura. . Riedizione 1992 ed. Milano, Italy : Electa, 1992

TAÍNHA, Manuel - **Arquitectura em questão**. Lisboa : AEFA-UTL, 1994

TAVARES, Segadães António - **A forma da pala não é do Siza nem minha, é uma forma natural. Entrevistado por José Cabrita Saraiva**Sociedade. [Em linha]. Lisboa, Portugal : Sol, 2020 [Consult. 25 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://sol.sapo.pt/2020/11/11/a-forma-da-pala-nao-e-do-siza-nem-minha-e-uma-forma-natural/>.

TETRA TECH ES; CIRCULARITY EDGE - **Clean energy and the circular economy : opportunities for increasing the sustainability of renewable energy value chains. Prepared for Center for Environment, Energy, and Infrastructure, U.S. Agency for International Development** [Em linha]. Washington, D.C. : USAID, 2021 [Consult. 9 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.usaid.gov/energy/sure/circular-economy/opportunities-assessment>.

THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - **Integrated Project Delivery : A Guide** [Em linha]. version 1 ed. Washington, DC : AIA, 2007 [Consult. 23 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.aia.org/resource-center/integrated-project-delivery-guide>.

THE BIOMIMICRY INSTITUTE - **The Biomimicry Institute: nature-inspired innovation** [Em linha]. Missoula, MT : The Biomimicry Institute, 2023 [Consult. 19 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/>.

THE PURPLE-ROOF SYSTEM - **The purple-roof concept** [Em linha]. Culpeper, VA : Green Roof Specialty Products, 2019 [Consult. 29 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.purple-roof.com/>.

THUNG, Ivan *et al.* - **Towards a circular economy in the built environment : overcoming market, finance and ownership challenges** [Em linha]. Amsterdam, The Netherlands : Circular Buildings Coalition (CBC), 2023 [Consult. 22 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.circularbuildingscoalition.org/resources>.

THUNG, Ivan *et al.* - **Four circular building pathways towards 2050** [Em linha]. Amsterdam, The Netherlands : Circular Buildings Coalition (CBC), 2024 [Consult. 22 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.circularbuildingscoalition.org/resources>.

TIETZ, Jürgen - **História da Arquitectura Contemporânea**. edição portuguesa ed. S.l. : h.f. ullmann, 2008. ISBN 978-3-8331-4778-4.

TOKEDE, Olubukola O. *et al.* - Harmonising life cycle sustainability thinking in material substitution for buildings. **Resources, Conservation & Recycling**. 185:2022) 106468. ISSN 0921-3449.

TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said - **A sustentabilidade dos materiais de construção** [Em linha]. 1ª ed. Guimarães, Portugal : TecMinho, 2010 Disponível em WWW:<URL:https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/28852>. ISBN 978-972-8600-22-8.

UK GREEN BUILDING COUNCIL - **Circular economy guidance for construction clients: How to practically apply circular economy principles at the project brief stage** [Em linha]. London, UK : UKGBC, 2019 [Consult. 23 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ukgbc.org/ukgbc-work/circular-economy-guidance-for-construction-clients-how-to-practically-apply-circular-economy-principles-at-the-project-brief-stage/>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões. Fechar o ciclo – plano de ação da UE para a economia. Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Serviço das Publicações da União Europeia. Bruxelas, 2.12.2015 COM(2015) 614 final, 2015 [Consult. 25 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0007.02/DOC_1&format=PDF>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - Recomendação (UE) 2016/1318 da Comissão, de 29 de julho de 2016, relativa às orientações para a promoção de edifícios com necessidades quase nulas de energia e das melhores práticas para assegurar que, até 2020, todos os edifícios novos tenham necessidades quase nulas de energia, C/2016/4392. Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Jornal Oficial da

União Europeia, 2016 [Consult. 5 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f2a71495-5876-11e6-89bd-01aa75ed71a1/language-pt>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões : um novo Plano de Ação para a Economia Circular : para uma Europa mais limpa e competitiva. Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Serviço das Publicações da União Europeia. Bruxelas, 11.3.2020, COM(2020) 98 final, 2020 [Consult. 4 abr. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0098>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões: impulsionar uma Vaga de Renovação na Europa para tornar os edifícios mais ecológicos, criar emprego e melhorar as condições de vida. Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Serviço das Publicações da União Europeia. Bruxelas, 14.10.2020 COM(2020) 662 final, 2020 [Consult. 7 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0662>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - **Plano de Ação para a Economia Circular : para uma Europa mais limpa e competitiva** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Serviço das Publicações da União Europeia, 2020 [Consult. 25 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://data.europa.eu/doi/10.2779/848855>. ISBN 978-92-76-19085-1.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - Recomendação (UE) 2021/2279 da Comissão de 15 de dezembro de 2021 sobre a utilização dos métodos da pegada ambiental para a medição e comunicação do desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida de produtos e organizações. Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Jornal Oficial da União Europeia, 2021 [Consult. 30 jun. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021H2279>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - **Um Pacto Ecológico Europeu: ser o primeiro continente com impacto neutro no clioma** [Em linha]. Bruxelas, Bélgica : Direção-Geral da Comunicação, 2021 [Consult. 1 set. 2023]. Disponível em

WWW:<URL:https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - **Concretizar o Pacto Ecológico Europeu** [Em linha]. Bruxelas, Bélgica : Direção-Geral da Comunicação, 2021 [Consult. 1 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_pt>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões: novo Bauhaus europeu. Beleza, Sustentabilidade, Inclusividade. Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Serviço das Publicações da União Europeia. Bruxelas, 15.9.2021 COM(2021) 573 final, 2021 Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fdc74aae-1625-11ec-b4fe-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_1&format=PDF>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - O ecossistema político do Novo Bauhaus europeu. ANEXO da Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões. Novo Bauhaus europeu: Beleza, Sustentabilidade, Inclusividade. Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Serviço das Publicações da União Europeia, Bruxelas,Bruxelas, 15.9.2021 COM(2021) 573 final. ANNEX 3, 2021 Disponível em WWW:<URL:https://new-european-bauhaus.europa.eu/system/files/2021-09/COM%282021%29_573_1_PT_annex.PDF>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - Relatório sobre a fase de conceção conjunta. ANEXO da Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões. Novo Bauhaus europeu: Beleza, Sustentabilidade, Inclusividade. Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Serviço das Publicações da União Europeia, Bruxelas,Bruxelas, 15.9.2021 COM(2021) 573 final. ANNEX 1, 2021 Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fdc74aae-1625-11ec-b4fe-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_2&format=PDF>.

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO - **Energia e Pacto Ecológico: transição para as energias limpas** [Em linha]. Bruxelas, Bélgica : Direção-Geral da Comunicação, 2022 [Consult. 19 set. 2023]. Disponível em

WWW:<URL:https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal_pt>.

UNIÃO EUROPEIA. CONSELHO - **Conselho aprova conclusões sobre uma vaga de renovação na UE** [Em linha]. Brussels, Belgium : Press office - General Secretariat of the Council, 2021 [Consult. 7 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.consilium.europa.eu/pt/press/press-releases/2021/06/11/council-approves-conclusions-on-an-eu-renovation-wave/>.

UNIÃO EUROPEIA. PARLAMENTO EUROPEU - Textos aprovados. P9_TA(2023)0068. Desempenho energético dos edifícios (reformulação). Alterações aprovadas pelo Parlamento Europeu, em 14 de março de 2023, sobre a proposta de diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação) (COM(2021)0802 – C9-0469/2021 – 2021/0426(COD)). Em **EUR-Lex** [Em linha]. Estrasburgo, França : Parlamento Europeu, 2023 [Consult. 22 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0068_PT.html>.

UNIÃO EUROPEIA. PARLAMENTO EUROPEU - C/2023/418. P9_TA(2023)0068. Desempenho energético dos edifícios (reformulação). Alterações aprovadas pelo Parlamento Europeu, em 14 de março de 2023, sobre a proposta de diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação) (COM(2021)0802 – C9-0469/2021 – 2021/0426(COD)). Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Jornal Oficial da União Europeia, 2023 [Consult. 22 set. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://data.europa.eu/eli/C/2023/418/oj>.

UNIÃO EUROPEIA. PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO - Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Jornal Oficial da União Europeia, 2010 [Consult. 5 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031>.

UNIÃO EUROPEIA. PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO - Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). Alterada por Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018 e Regulamento (UE) 2018/1999 do Parlamento Europeu e do Conselho de 11 de dezembro de 2018. Em **EUR-Lex** [Em linha].

Luxemburgo, Luxemburgo : Jornal Oficial da União Europeia, 2021 [Consult. 5 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02010L0031-20210101>.

UNIÃO EUROPEIA. PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO - Diretiva (UE) 2023/1791 do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à eficiência energética e que altera o Regulamento (UE) 2023/955 (reformulação). Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxemburgo, Luxemburgo : Jornal Oficial da União Europeia, 2023 Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2023_231_R_0001>.

UNIÃO EUROPEIA. PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO - DIRETIVA (UE) 2024/1275 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 24 de abril de 2024 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). Em **EUR-Lex** [Em linha]. Luxembourg, Luxembourg : Jornal Oficial da União Europeia, 2024 Disponível em WWW:<URL:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401275>.

UNITED NATIONS. GENERAL ASSEMBLY - **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development** [Em linha]. New York, NY : UN. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, 2015 [Consult. 10 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.

UNITED NATIONS GLOBAL COMPACT - **A global compact for Sustainable Development – business and the SDGs: Acting responsibly and finding opportunities** [Em linha]. New York, NY : United Nations, 2015 [Consult. 14 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://d306pr3pise04h.cloudfront.net/docs/issues_doc%2Fdevelopment%2FGCforSDbrochure.pdf>.

VAIDYA, Saurabh; AMBAD, Prashant; BHOSLE, Santosh - Industry 4.0: A glimpse. **Procedia Manufacturing**. 20:2018) 233–238. ISSN 2351-9789.

VALLE, Guilherme Zachalkiewicz Do - **Influência das coberturas verdes no sistema público de drenagem de águas pluviais de um loteamento urbano** [Em linha].

Bragança, Portugal : Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politénico de Bragança. Relatório Final para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Construção no âmbito da Dupla Diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Curitiba, 2022 [Consult. 3 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/25760>.

VANGUARD PROPERTIES - **Muda reserve : Nature made** [Em linha]. Lisboa, Portugal : Vanguard Properties, 2024 [Consult. 4 out. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.vangproperties.com/en/comporta-portugal-real-estate/muda-reserve/>.

VANGUARD PROPERTIES - **Vanguard Properties doa capela projetada por Francis Kéré à comunidade da Muda. Press release** [Em linha]. Lisboa, Portugal : Vanguard Properties, 2024 [Consult. 22 out. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.vanguardeagle.com/pt/media/press-releases/vanguard-properties-doa-capela-projetada-por-francis-kere-a-comunidade-da-muda/>.

VARTAN, Starre - **What Is Cradle to Cradle? Principles, Design, and Certification** [Em linha]. New York, N : Treehugger, 2021 [Consult. 4 mai. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.treehugger.com/what-is-cradle-to-cradle-5191335>.

VELENTURF, Anne P. M. *et al.* - Circular economy and the matter of integrated resources. **Science of The Total Environment**. 689:2019) 963–969. ISSN 0048-9697.

VERKERK, P. J. *et al.* - **The role of forest products in the global bioeconomy-Enabling substitution by wood-based products and contributing to the Sustainable Development Goals.** [Em linha]. Rome : FAO on behalf of the Advisory Committee on Sustainable Forest-based Industries (ACSFI), 2021 [Consult. 26 jan. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://doi.org/10.4060/cb7274en>. ISBN 978-92-5-135151-2.

VON MOOS, Stanislaus - **Le Corbusier: Elements of a synthesis**. Revised and expanded ed. Rotterdam, The Netherlands : 010 Publishers, 2009. ISBN 978-90-6450-642-0.

VOS, Gerard; OOSTRA, Mieke; OPPEN, Cecile Van - **Circular buildings: Strategies and case studies** [Em linha]. Utrecht, The Netherlands : Circular Construction Economy,

2020 Disponível em WWW:<URL:https://circulairebouweconomie.nl/wp-content/uploads/2022/01/Circular-Buildings-Strategies-and-case-studies-2021.pdf>.

VYAS, Kashyap - Bamboo as a replacement to steel : Is bamboo stronger than steel? **Interesting Engineering**. [Em linha]2020). [Consult. 9 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://interestingengineering.com/innovation/bamboo-as-a-replacement-to-steel>.

WAGLE, Khushita - **Elements of Contemporary Architecture** [Em linha]. New Delhi, India : Rethinking The Future, 2020 [Consult. 9 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.re-thinkingthefuture.com/rtf-fresh-perspectives/a538-elements-of-contemporary-architecture/>.

WARD, Zoe - **World's largest wooden hybrid building to be built in Marunouchi** [Em linha]. Tokyo, Japan : Japan Property Central, 2022 [Consult. 9 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://japanpropertycentral.com/2022/08/worlds-largest-wooden-hybrid-building-to-be-built-in-marunouchi/>.

WEIR, Madeline; REMPHER, Audrey; ESAU, Rebecca - **Embodied carbon 101: Building materials. How to address the emissions hidden in concrete, steel, insulation, and other building materials.** [Em linha]. Basalt, CO : RMI, 2023 [Consult. 28 mar. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://rmi.org/embodied-carbon-101/>.

WEISHAN, Ray - **Distinctive elements of Contemporary Architecture** [Em linha]. San Diego, CA : EcoMinded Solutions, 2023 [Consult. 9 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ecomindedsolutions.com/blog/distinctive-elements-contemporary-architecture/>.

WILLIAM MCDONOUGH + PARTNERS - **Toward a CRADLE TO CRADLE® future beyond sustainability: design for abundance** [Em linha]. Charlottesville, VA : William McDonough + Partners, 2020 Disponível em WWW:<URL:https://mcdonoughpartners.com/wp-content/uploads/2020/06/Commercial-Office-Projects_WMP_200630.pdf>.

WILLIAM MCDONOUGH + PARTNERS - **Design approach** [Em linha]. Charlottesville, VA : William McDonough + Partners, 2023 Disponível em WWW:<URL:https://mcdonoughpartners.com/cradle-to-cradle-design/>.

WIMMER, Robert *et al.* - LIFE cycle habitation - designing green buildings. **Energy Procedia**. 96:2016) 323–332. ISSN 1876-6102.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT - **Report of the World Commission on Environment and Development : Our common future** [Em linha]. New York, NY : United Nations, 1987 [Consult. 23 fev. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>.

WORLD GREEN BUILDING COUNCIL - **Sustainable Building Certifications** [Em linha]. London, UK : WorldGBC, 2023 [Consult. 10 ago. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://worldgbc.org/sustainable-building-certifications/>.

WUNI, Ibrahim Yahaya - Burden of proof beyond the triple bottom line: Mapping the benefits of circular construction. **Sustainable Production and Consumption**. 34:2022) 528–540. ISSN 2352-5509.

XUN XU *et al.* - Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. **Journal of Manufacturing Systems**. 61:2021) 530–535. ISSN 0278-6125.

YARMOSHENKO, Ilia V. *et al.* - MODELING and justification of indoor radon prevention and remediation measures in multi-storey apartment buildings. **Results in Engineering**. 16:2022) 100754. ISSN 2590-1230.

YEANG - **Proyetar com la naturaleza: bases ecológicas para el proyeto arquitectónico.** 1ª ed. Barcelona : Editorial Gustavo Gili, 2007. ISBN 978-84-252-1763-0.

YIFEI YU *et al.* - Towards Circular Economy through Industrial Symbiosis in the Dutch construction industry: A case of recycled concrete aggregates. **Journal of cleaner production**. 293:2021) 126083. ISSN 0959-6526.

YOUNGER, Margalit *et al.* - The Built Environment, Climate Change, and Health: opportunities for co-benefits. **American Journal of Preventive Medicine**. 35:5 (2008) 517–526. ISSN 0749-3797.

ZAHA HADID ARCHITECTS - **Changsha Meixihu International Culture & Arts Centre** [Em linha]. London, UK : Zaha Hadid Architects, 2023 [Consult. 8 nov. 2023]. Disponível

em WWW:<URL:https://www.zaha-hadid.com/architecture/changsha-meixihu-international-culture-art-centre/>.

ZAHA HADID ARCHITECTS - **Heydar Aliyev Centre – Zaha Hadid Architects** [Em linha]. London, UK : Zaha Hadid Architects, 2023 [Consult. 21 nov. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliyev-centre/>.

ZAHAN, Anca-Elena; KATSAROU, Sofia; JULIEN, A. - Environmental benefits of using cross-laminated timber with hempcrete insulation in buildings. Em ELSHARKAWY, HEBA; ZAHIRI, SAHAR; CLOUGH, JACK (Eds.) - **International Conference for Sustainable Design of the Built Environment (SDBE 2018) : Proceedings** [Em linha]. London, UK : SDBE 2018, 2018 [Consult. 2 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://repository.uel.ac.uk/item/84709>. ISBN 978-1-9997971-9-5. p. 96–107.

ZAIRUL, Mohd - The recent trends on prefabricated buildings with circular economy (CE) approach. **Cleaner Engineering and Technology**. 4:2021) 100239. ISSN 2666-7908.

ZAKRISSON, Anna - **What is green roof stormwater detention?** [Em linha]. Culpeper, VA : Green Roof Specialty Products, 2022 Disponível em WWW:<URL:https://www.purple-roof.com/post/what-is-stormwater-detention>.

ZAKRISSON, Anna; UPPALA, Ella - **Roof-to-ground: green roof detention treatment train** [Em linha]. Culpeper, VA : Green Roof Specialty Products, 2022 [Consult. 29 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.purple-roof.com/post/green-roof-detention-treatment-train>.

ZARGAR, Shiva *et al.* - The application of industrial ecology methods to understand the environmental and economic implications of the forest product industries. **Current Forestry Reports**. 8:4 (2022) 346–361. ISSN 2198-6436.

ZEVI, Bruno - **Historia de la Arquitectura Moderna**. Buenos Aires, Argentina : Emecé Editores, 1954

ZEVI, Bruno - **Saber ver la Arquitectura: ensayo sobre la interpretación espacial de la arquitectura**. Segunda edición ed. Buenos Aires, Argentina : Editorial Poseidon, 1955