

Universidade do Minho
Escola de Arquitetura

Ana Catarina da Mota Barbosa

**A Pré-fabricação como Método Construtivo
para uma Arquitetura Circular**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Arquitetura
Construção e Tecnologia

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Paulo Jorge Sousa Cruz
Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo

Declaração

Nome. Ana Catarina da Mota Barbosa

Endereço eletrónico. anamota_1997@hotmail.com

Telefone. 934 932 177

Título da dissertação. A Pré-Fabricação como Método Construtivo para uma Arquitetura Circular

Equipa de orientação.

Professor Doutor Paulo Jorge Sousa Cruz

Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo

Ano de conclusão. 2023

Mestrado Integrado em Arquitetura

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

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



Atribuição – Não Comercial
CC BY-NC

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

Universidade do Minho, 31 de Janeiro de 2023

Assinatura.

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, 31 de Janeiro de 2023

Assinatura.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ana Barbosa', written in a cursive style.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, à minha equipa de orientação, o Professor Bruno Figueiredo e o Professor Paulo Cruz, pelo apoio e incentivo prestado durante todo o processo de desenvolvimento do trabalho. A partilha de conhecimento e experiência foi sempre muito valiosa.

Ao Eng. José Aidos Rocha e à equipa Exactusensu, pelo acolhimento e pelos anos de experiência, tendo me proporcionado o amadurecimento profissional.

À minha mãe, que sempre acreditou em mim e me apoiou em todos os momentos. À minha família.

Ao Pedro Miguel, por acompanhar-me e apoiar-me na jornada da vida, por ser a minha fonte de apoio e motivação nos momentos mais frágeis. Por tudo.

A todos,

Obrigada.

Resumo

O setor da construção é atualmente responsável por cerca de 40% das emissões globais de gases de efeito de estufa (GHG), que têm consequentemente um agravamento no Aquecimento Global. No contexto português, a grande maioria dos edifícios é construída segundo métodos que recorrem a componentes individuais e produção *onsite* (no estaleiro), que resultam em edifícios que, após o fim do seu ciclo de vida, são demolidos e os escombros reencaminhados para o aterro. Este tipo de construção tem sido considerada pouco sustentável, uma vez que recorre a sistemas construtivos e materiais que não permitem a sua circularidade e reuso, dado a serem praticamente impossíveis de separar uma vez integrados na construção. É urgente a integração do pensamento e princípios arquitetónicos que fomentem a circularidade desde a fase mais precoce de conceção do projeto, em específico pelo desenvolvimento de sistemas de projeto para montagem e desmontagem de componentes e materiais, que, no final da vida útil dos edifícios, facilitarão a sua circularidade, servindo de futura matéria-prima ou de componentes para outras construções. A utilização de métodos pré-fabricados, pode ser uma solução mais sustentável relativamente às práticas convencionais. Através da investigação científica sobre diferentes abordagens de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), pretende-se criar linhas orientadoras para a sensibilização dos arquitetos na escolha de soluções construtivas com princípios de circularidade.

Circularidade, Pré-Fabricação, Avaliação do Ciclo de Vida nos Edifícios,
DFAD

Abstract

The construction sector is currently responsible for around 40% of global greenhouse gas (GHG) emissions, which have consequently increased Global Warming (GW). In the Portuguese context, the majority of buildings are built according to methods that use individual components and onsite production, which result in buildings that, after the end of their life cycle, are demolished and sent to the landfill. This type of construction has been considered unsustainable, since it uses construction systems and materials that do not allow its circularity and reuse, as they are practically impossible to separate once integrated into the construction. It's urgent to integrate architectural thinking and principles that encourage circularity from the earliest design phase of the project, specifically through the development of project systems for assembly and disassembly of components and materials, which, at the end of the useful life of buildings, will enable its circularity, serving as future raw material or components for other constructions. The use of prefabricated methods can be a more sustainable solution compared to conventional practices. Through scientific research on different approaches to Life Cycle Assessment (LCA), it is intended to create guidelines to make architects aware of the choice of constructive solutions with principles of circularity.

Circularity, Prefabrication, Life Cycle Assessment in Buildings, DFAD

Índice

1. INTRODUÇÃO

- 1.2. Objetivos
- 1.3. Estrutura

2. CONTEXTO

- 2.1. Situação Global
- 2.2. Consequências Globais
- 2.3. Consequências da Construção
- 2.4. A Construção em Portugal

3. CIRCULARIDADE

- 3.1. Economia Circular
 - Princípios de Circularidade
- 3.2. DFAD
 - As Camadas dos Edifícios
 - Convencional vs DFAD
 - Boas Práticas no DFAD

4. PRÉ-FABRICAÇÃO

- 4.1. Evolução
- 4.2. Estado da Arte
- 4.3. Níveis de Pré-fabricação
 - 4.3.1. Sistema Linear
 - 4.3.2. Sistema Painei
 - 4.3.3. Sistema Modular
 - 4.3.4. Híbrido

5. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NOS EDIFÍCIOS (LCA)

- 5.1. Introdução
 - Origem
 - LCA nos Edifícios
 - LCA em Edifícios Pré-fabricados
- 5.2. Tipos de LCA
 - LCC
 - SLCA
 - LCIA
 - LCSA
- 5.3. Categorias de Impacte Ambiental
- 5.4. Fases do Ciclo De Vida
 - Fase de Produção
 - Fase de Construção
 - Fase de Utilização da Construção
 - Fase da Utilização Operacional
 - Fase de Fim de Vida
 - Benefícios
- 5.5. Normalização
- 5.6. Fases da LCA
 - Objetivo e Âmbito
 - Inventários do Ciclo de Vida
 - Declaração Ambiental de Produtos
 - Avaliação dos Impactes
 - Interpretação dos Resultados
- 5.7. Ferramentas de LCA

6. CONCLUSÃO

7. BIBLIOGRAFIA

Índice de tabelas e figuras

Figura 1.1. Estrutura do trabalho.

Figura 2.1. Página Inicial do Jornal da *Union Internationale des Architectes*, Edição Inglesa de Junho/Julho 1993. Fonte: https://www.uia-architectes.org/wp-content/uploads/2022/01/DeclarationChicagoJuin1993_english.pdf

Figura 2.2. Fotografia de um incêndio em Ourém, distrito de Santarém, Portugal, 12 de julho de 2022. Autor: Rodrigo Antunes, 2022. Fonte: Reuters. <https://www.reuters.com/world/europe/iberian-peninsula-swelters-heatwave-wildfire-risk-grows-2022-07-12/>

Figura 2.3. *Models of Doom* (Assche, 2019)

Figura 2.4. Concentração de CO₂ na atmosfera e temperatura da Antártida. (Agência Europeia Ambiente, 2009)

Figura 2.5. Emissões Anuais de CO₂ Globalmente em 2022, por setor. (IEA, 2022)

Figura 2.6. Extração Global de Matérias Primas em Biliões de Toneladas (Gt) (Veldhoven et al. 2022)

Figura 2.7. Geração de resíduos em 2021 por atividades económicas em Portugal. (INE)

Figura 3.1. Hospital Triemli, (1964) Zurique: Os elementos do edifício pré-fabricado foram considerados para implementação noutros edifícios. (Devènes J. et al.)

Figura 3.2. Diagrama da diferenciação do ciclo biológico e do ciclo técnico (Heisel et al., 2022).

Figura 3.3. Níveis de Reuso e Reciclagem. (Crowther, 2018)

Figura 3.4. Diagrama das diferentes camadas nos edifícios. Reinterpretação do original por Stewart Brand, 1995.

Figura 3.5. Separação das diferentes camadas nos edifícios.

Figura 3.6. Diferença entre o sistema construtivo convencional e o sistema construtivo focado na circularidade, com facilidade na montagem e desmontagem (DFAD).

Figura 3.7. Diagrama de estratégias a seguir ao considerar o DFAD.

Figura 3.8. Protótipo para um novo elemento estrutural de aço, VIA University College, Jimmi Jensen e Milad Ahmad Tokhi, 2015. (Merrild & et al. 2016).

Figura 3.9. As ligações são feitas por um mandril com duas fendas, duas anilhas e dois contrapinos, que podem ser desmontados. (Merrild & et al. 2016).

Figura 3.10. Elementos utilizados na ligação da estrutura em betão. (Merrild & et al. 2016).

Figura 3.11. Protótipo para uma ligação mecânica em elementos estruturais de betão. Martin Ravnsbæk e Hans Nicolai Søndergaard, VIA University College, 2015. (Merrild & et al. 2016).

Figura 3.12. Protótipo para um painel de madeira estrutural, VIA university college, Tinus Bengt Petersen e Ingri Bollingmo Løvslogen, 2015. (Merrild & et al. 2016).

Figura 3.13. Elementos de ligação nos painéis de madeira. (Merrild & et al. 2016).

Figura 4.1. Construção do edifício modular B2, SHoP Architects, Nova Iorque, 2016.

Figura 4.2. Cronologia de sistemas pré-fabricados (1).

Figura 4.3. Cronologia de sistemas pré-fabricados (2).

Figura 4.4. Sistematização dos princípios de sistemas pré-fabricados a-peças, b-painéis, c—módulos (Staib, 2008).

Figura 4.5. Sistemas pré-fabricados (Smith, R. 2010)

Figura 4.6. Tipos de sistemas de edifícios industrializados (Smith, R. 2017)

Figura 4.7. Tipos de sistemas em edifícios pré-fabricados (Knaack et al, 2012)

Figura 4.8. Categorias de sistemas pré-fabricados, dispostos por nível de pré-fabricação.

Figura 4.9. Sistema construtivo do edifício Tamedia Head Office, Shigeru Ban Architects, 2013, Zurique, Suíça. (Green & Taggart, 2020)

Figura 4.10. Comportamento estrutural do sistema linear: com elementos de união rígidos, painéis de contraventamento, tirantes diagonais e núcleos. (Staib e Rosenthal, 2008)

Figura 4.11. Edifício Woodcube, Architekturagentur Stuttgart, 2013, Alemanha. (Green & Taggart, 2020)

Figura 4.12. Treet Apartment Building, Artec Arkitekter, Bergen, Noruega, 2015.

Figura 4.13. Treet Apartment Building fases de construção. (Green & Taggart, 2020)

Figura 4.14. Hoho Wien, RLP Rudiger Lainer, 2019. (Green & Taggart, 2020)

Figura 4.15. Edifício LCT One (2012), Cree Buildings, Áustria.

Figura 4.16. Edifício Hotel B&B Guimarães (2022), Grupo Casais, Portugal.

Figura 5.1. Torre em demolição no bairro do Aleixo, Porto (Jornal de Notícias, 2019)

Figura 5.2. Diagrama das diferentes etapas na conceção de edifícios.

Figura 5.3. Axonometria de três diferentes tipologias pré-fabricadas: sistema com elementos de madeira, sistema com elementos de betão e sistema com elementos de aço, (Pons 2014).

Figura 5.4. Diagrama do Inventário do Ciclo de Vida de edifícios modulares.

Figura 5.5. Diagrama de distinção entre os diversos tipos de avaliação de ciclo de vida.

Figura 5.6. Exemplo de categoria *endpoint* e *midpoint*., de acordo com a ISO 14044: 2006.

Figura 5.7. Diagrama das diferentes fases do ciclo de vida.

Figura 5.8. Fases da LCIA, segundo a EN 14040, 2006.

Figura 5.9. Declaração Ambiental de um produto Viroc: dados sobre potenciais impactes ambientais do produto por 1m³ de painel. (Daphabitat)

Tabela 4.1. Características dos sistemas pré-fabricados.

Tabela 4.2. Características dos sistemas em painel.

Tabela 4.3. Características dos sistemas modulares.

Tabela 5.1. Normas Europeias e Internacionais relacionadas com a Avaliação do Ciclo de Vida e a Sustentabilidade das Construções.

Tabela 5.2. Lista de softwares de LCA.

Glossário

ADP. Depleção de recursos abióticos *Abiotic resources depletion*

AP. Potencial de acidificação *Acidification potential*

CLT. Madeira Laminada Cruzada *Cross Laminated Timber*

DFAD. Design para montagem e desmontagem *Design for assembly and disassembly*

EIA. Avaliação dos Impactes Ambientais *Environmental impact assessment*

EN. Norma europeia *European standard*

ENR. Energia não-renovável incorporada *Non renewable incorporated energy*

EP. Potencial de eutrofização *Eutrophication potential*

EPD. Declaração ambiental de produto *Environmental product declaration*

FFDP. Potencial de esgotamento dos recursos energéticos *Fossil fuel depletion potential*

GHG. Gases de efeito-de-estufa *Greenhouse Gases*

GWP. Potencial de aquecimento global *Global Warming Potential*

ISO. Organização internacional para a normalização *International Organization for Standardization*

LCA. Avaliação do ciclo de vida *Life-cycle assessment*

LCC. Custo do ciclo de vida *Life-cycle cost*

LCEA. Avaliação da energia do ciclo de vida *Life-cycle energy assessment*

LCI. Inventário do ciclo de vida *Life-cycle inventory*

LCIA. Avaliação dos impactes do ciclo de vida *Life-cycle impact assessment*

LCSA. Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida *Life-cycle sustainability assessment*

ODP. Potencial de destruição da camada de ozono *Depletion potential of the stratospheric ozone*

POCP. Potencial de oxidação fotoquímica *Photochemical oxidation potential*

1. Introdução

O presente capítulo tem como objetivo expor a estrutura do trabalho, as motivações que estão na origem desta investigação, bem como os objetivos a realizar.

As decisões tomadas pelos arquitetos têm impacto para o nosso planeta? A escolha de um simples material, ou de um sistema construtivo, contribui para o agravamento do Aquecimento Global?

Sendo o setor da construção responsável por cerca de 40% das emissões globais de CO₂, de que modo se poderá regredir este problema? O presente trabalho infere a catalogação dos diferentes princípios de pré-fabricação na construção, com enquadramento na cultura arquitetónica contemporânea, relacionando-os com princípios de reversibilidade e circularidade, bem como a análise dos pros e contras da construção *onsite vs offsite*, abordando a análise da LCA, num contexto construtivo, como método de avaliação de impactes ambientais. De forma a classificar a sustentabilidade destes sistemas, o desenvolvimento de metodologias para a avaliação do Ciclo de Vida dos Edifícios é imprescindível para a implementação de boas práticas na escolha de materiais e sistemas na construção.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo central estudar o modo como princípios arquitetônicos e sistemas construtivos que recorrem à pré-fabricação poderão auxiliar ao cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pelas Nações Unidas, para 2030, em particular, contribuir para a adoção de princípios de circularidade na fase de projeto e construção dos edifícios, o mapeamento cronológico dos sistemas pré-fabricados, para auxiliar a uma análise da evolução dos princípios de pré-fabricação e das diferentes sistematizações contemporâneas e o levantamento dos benefícios adjacentes aos métodos *offsite* para a contribuição da construção circular na aferição do método LCA no contexto construtivo, fomentando a criação de linhas orientadoras para a compreensão e implementação da LCA nos edifícios.

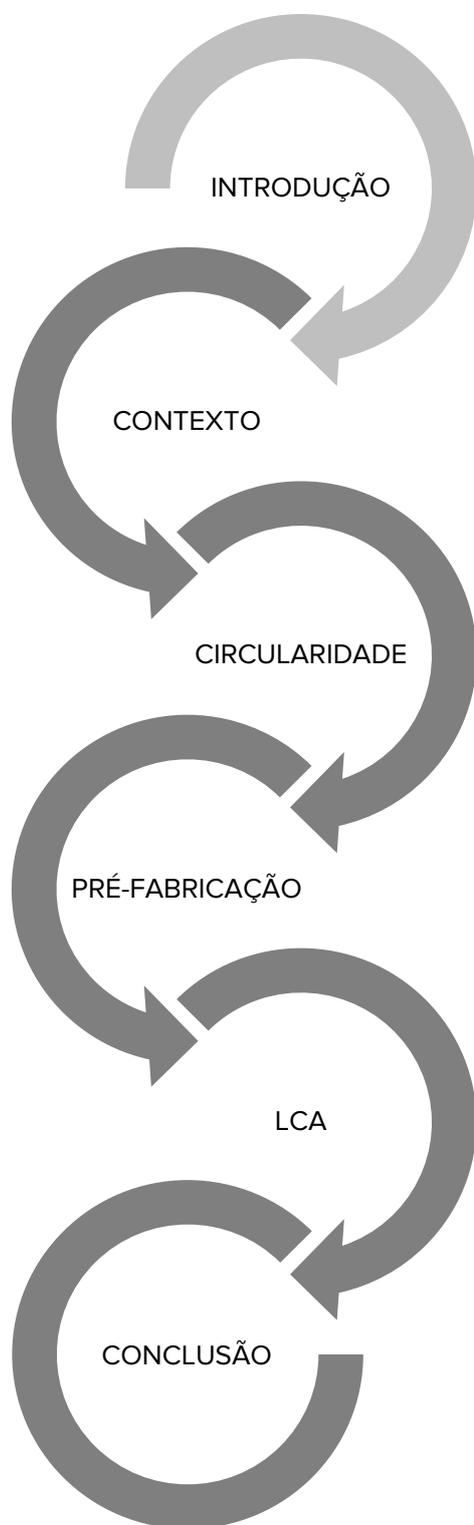


Figura 1.1. Estrutura do trabalho.

1.2. Estrutura

A estrutura do trabalho (**figura 1.1.**), organiza-se em seis capítulos, dos quais:

O capítulo 1. *Introdução*, trata, de uma forma breve, os temas centrais da presente dissertação, bem como os objetivos inerentes no trabalho de investigação.

O capítulo 2. *Contexto*, reforça os motivos que estão na origem da investigação, através da análise de informações atuais sobre o estado global do nosso planeta até às estatísticas mais locais.

O capítulo 3. *Circularidade* aborda o tema da construção circular, através da demonstração de alguns projetos que exemplificam boas práticas na construção circular, com o objetivo de tentar focar na implementação de princípios de reversibilidade e circularidade nos edifícios.

O capítulo 4. *Pré-fabricação*, centra-se na pré-fabricação da arquitetura e construção e no seu desenvolvimento ao longo do tempo, através de uma análise cronológica e na revisão da literatura relativa a sistemas construtivos pré-fabricados contemporâneos e posteriormente abordando uma análise qualitativa entre sistemas.

O capítulo 5. *Avaliação do Ciclo de Vida*, retrata a metodologia LCA no contexto da arquitetura e construção, através da criação de linhas orientadoras na abordagem da LCA nos edifícios e explicando as diferenças na abordagem da LCA em sistemas construtivos pré-fabricados.

O capítulo final expõe o percurso da investigação e os seus resultados, bem como os obstáculos e os futuros desenvolvimentos.

NEWSLETTER

ENGLISH EDITION - JUNE / JULY 1993

Union Internationale des Architectes
International Union of Architects

51, rue Raynouard
75016 Paris
Tél. : (1) 45 24 36 88
Fax : (1) 45 24 02 78
Télex : 643 674



The UIA is a non government-
tal international organiza-
tion representing architects
of the following countries:

- Algeria
 - Argentina
 - Australia
 - Austria
 - Bahrain
 - Belgium
 - Brazil
 - Bulgaria
 - Canada
 - Cameroun
 - Central America
(Costa Rica, Guatemala, Hon-
duras, Nicaragua, El Salvador)
 - China
 - China, People's Republic of
 - CIS
 - Colombia
 - Cuba
 - Cyprus
 - Czechoslovakia
 - Ecuador
 - Egypt
 - France
 - Gabon
 - Germany
 - Greece
 - Hong Kong
 - Hungary
 - India
 - Indonesia
 - Ireland
 - Israel
 - Italy
 - Ivory Coast
 - Jamaica
 - Japan
 - Kenya
 - Lebanon
 - Luxembourg
 - Mexico
 - Malaysia
 - Malta
 - Mauritius
 - Mexico
 - Mongolia
 - Morocco
 - Nepal
 - Nig
 - Non-represented countries
(Denmark, Finland, Iceland,
Norway, Sweden)
 - P.D.R. of Korea
 - Pakistan
 - Paraguay
 - Peru
 - Philippines
 - Poland
 - Portugal
 - Puerto Rico
 - Republic of Korea
 - Romania
 - Senegal
 - Singapore
 - Spain
 - Switzerland
 - Syria
 - Tanzania
 - Thailand
 - Turkey
 - Uganda
 - United Kingdom
 - United States
 - Uruguay
 - Vietnam, D.R.
 - Yugoslavia
 - Zambia
 - Zimbabwe
- Temporary members:**
Bahamas
Fiji
Sri Lanka
- Members of the Bureau:**
Olufemi Majekodunmi
President
Rod Mackey
Outgoing President
His Excellency
Secretary General
Padraig Murray
Treasurer
Donald A. Hackett
1st Vice President
Gérard Benoit
2nd Vice President
Vassily Soudas
Vice President
Koh Leang Chia
Vice President
Taufik El Euch
Vice President

DECLARATION OF INTERDEPENDENCE FOR A SUSTAINABLE FUTURE U.I.A. - A.I.A Chicago, 18-21 June 1993

After the Assembly and Congress in Chicago, a Declaration on behalf of the architects of the world was adopted. We publish the text in extenso.

IN RECOGNITION THAT :

. A sustainable society restores, preserves and enhances nature and culture for the benefit of all life, present and future ; a diverse and healthy environment is intrinsically valuable and essential to a healthy society ; today's society is seriously degrading the environment and is not sustainable ;

. We are ecologically interdependent with the whole natural environment ; we are socially, culturally and economically interdependent with all of humanity ; sustainability, in the context of this interdependence requires partnership, equity and balance among all parties ;

. Buildings and the built

environment play a major role in the human impact on the natural environment and on the quality of life ; sustainable design integrates consideration of resource and energy efficiency, healthy buildings and materials, ecologically and socially sensitive land-use and an aesthetic sensitivity that inspires, affirms and ennobles ; sustainable design can significantly reduce adverse human impacts on the natural environment while simultaneously improving quality of life and economic well-being ;

As members of the world's architectural and building-design professions, individually and through our professional organizations, we

COMMIT OURSELVES TO ;

. Place environmental and social sustainability at the core of our practices and professional responsibilities ;

. Develop and continually improve practices, procedures, products, curricula, services and standards that will enable the implementation of sustainable design ;

. Educate our fellow professionals, the building industry, clients, students and the general public about the critical importance and substantial opportunities of sustainable design ;

. Establish policies, regulations and practices in government and business that ensure sustainable design becomes normal practice ;

. Bring all existing and future elements of the built environment - in their design, production, use and eventual reuse - up to sustainable design standards.

Application methods and appendices attached to this Declaration are available on request from the General Secretariat of the UIA.

Olufemi Majekodunmi
President of the UIA

Susan A. Maxman
President of the AIA

1

2. Contexto

Figura 2.1. Página Inicial do Jornal da *Union Internationale des Architectes*, Edição Inglesa de Junho/Julho 1993.

Uma sociedade sustentável restaura, preserva e potencia a natureza e a cultura em benefício de toda a vida, presente e futuro; um ambiente diversificado e saudável é intrinsecamente valioso e essencial para uma sociedade saudável; a sociedade de hoje está a degradar seriamente o ambiente e não é sustentável. (UIA 1993)



Figura 2.2. Fotografia de um incêndio florestal em Santarém, Autor: Rodrigo Antunes, 2022.

2.1. Situação Global

De acordo com o *Global Status Report for Buildings and Construction 2022*, os avisos sobre as consequências das mudanças climáticas não são mais avisos: são a realidade. Em 2022, as ondas de calor em todo o mundo, tiveram como consequência incêndios de proporções anormais, destruindo habitats naturais, casas e vidas. As secas estão a ameaçar a segurança alimentar de milhões de pessoas. As Nações Unidas alertaram que se não forem reduzidas as emissões, como reiterou o Acordo de Paris¹, a situação global tenderá a agravar-se. Descarbonizar o setor da construção do edificado até 2050 é fundamental para alcançar esses cortes de emissões - e reverter a crise de mudanças climáticas, a perda de natureza e biodiversidade, o aumento da poluição e produção de resíduos. Mas de que forma podemos contornar a situação? Através da indústria da construção: existe a oportunidade de repensar o uso de materiais de construção, de forma a controlar a excessiva extração de matérias primas, e evitar o uso de materiais poluentes, como o betão e o aço, sendo estes os principais a contribuir para as emissões de gases de efeito-estufa.

¹ O Acordo de Paris, assinado em 2015, expõem um conjunto de objetivos de Desenvolvimento Sustentável, apelando à ação de todos os países para promover a sustentabilidade e combater as mudanças climáticas, nos quais Portugal é um dos 196 que assinou o acordo.

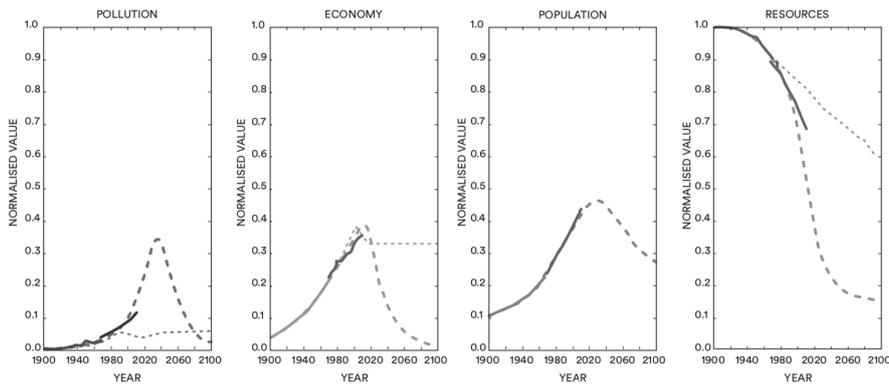


Figura 2.3. Models of Doom, (Assche, 2019)

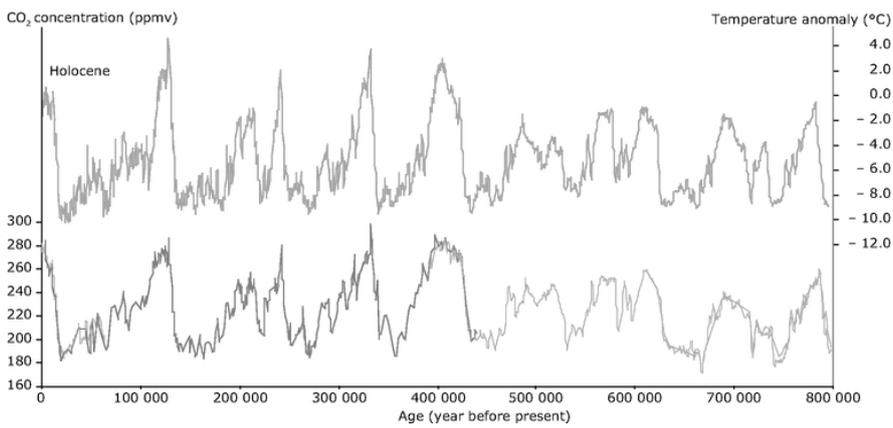


Figura 2.4. Concentração de CO₂ na atmosfera e temperatura da Antártida. (Agência Europeia do Ambiente, 2009)

2.2. Consequências globais

De modo a compreender o estado atual do nosso planeta, o Clube de Roma² encomendou um estudo em 1970 denominado “*Limites para o Crescimento*” (Meadows et al., 1972). Este estudo foi liderado por 16 investigadores do MIT, que desenvolveram um modelo informático com base nas estatísticas mundiais sobre industrialização, população, alimentos, matérias-primas e poluição ambiental, resultando num programa denominado *World3*, que se destinava a fornecer informações sobre o comportamento da nossa terra como ecossistema fechado. Este programa descreve o nosso ecossistema até o ano de 2100, dependendo do modo como a humanidade lidaria com a poluição e o uso de matérias-primas. Uma das coisas que o programa demonstrou, foi a influência decisiva do comportamento da humanidade no modo como a Terra se comportaria. Representando os resultados deste estudo para o público, foi lançada numa publicação, que foi novamente atualizada trinta anos depois, reforçando os argumentos do estudo inicial e a importância de atuar contra a poluição.

A **figura 2.3.**, expõe os resultados anteriormente auferidos, sendo possível verificar, de um modo global, o aumento exponencial da poluição, bem como da economia e da população, até ao ponto em que estes colapsam, acompanhando-se do decréscimo constante dos recursos: a linha contínua descreve o estado do mundo com o uso dos dados disponíveis, a traço interrompido corresponde um dos cenários em que a humanidade não toma nenhuma ação contra a poluição e o uso de combustíveis fósseis. Num cenário em que a humanidade age, é possível verificar uma melhoria significativa, evitando o colapso do nosso planeta.

A poluição, derivada das variadas atividades do Homem, aponta consequências impactantes no nosso ecossistema, tal como a oscilação da temperatura terrestre. A **figura 2.4.**, publicada em 2009, pela Agência

² O Clube de Roma, fundado em 1968, tinha o objetivo de estudar o comportamento dos sistemas complexos sociais. O grupo foi liderado por Aurelio Peccei e Alexander King, incluindo altos executivos, políticos, cientistas e economistas.

Europeia do Ambiente, que demonstra a relação entre a quantidade de CO₂ na atmosfera e a temperatura na Antártida. É possível verificar que o dióxido de carbono tem oscilado em paralelo com a temperatura ao longo de centenas de milhares de anos, significando que este está diretamente relacionado com o que conhecemos hoje por efeito de estufa.

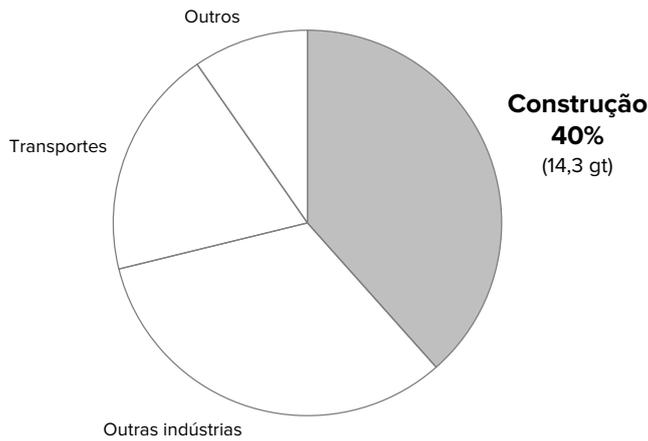


Figura 2.5. Emissões Anuais de CO₂ Globalmente em 2022, por setor. (IEA, 2022)

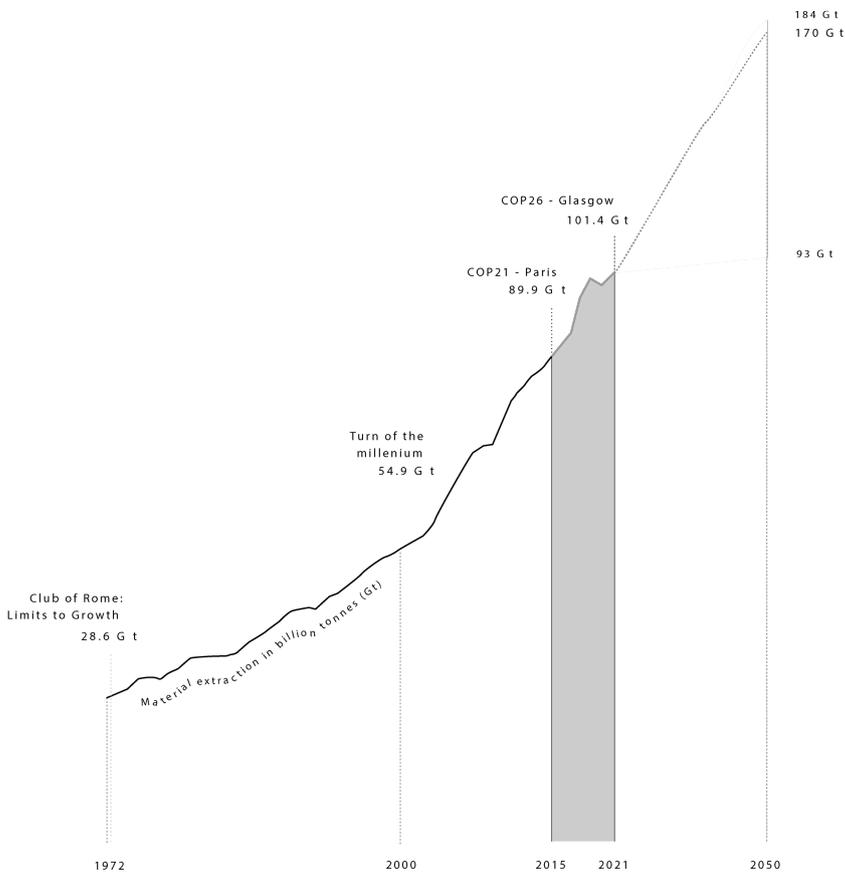


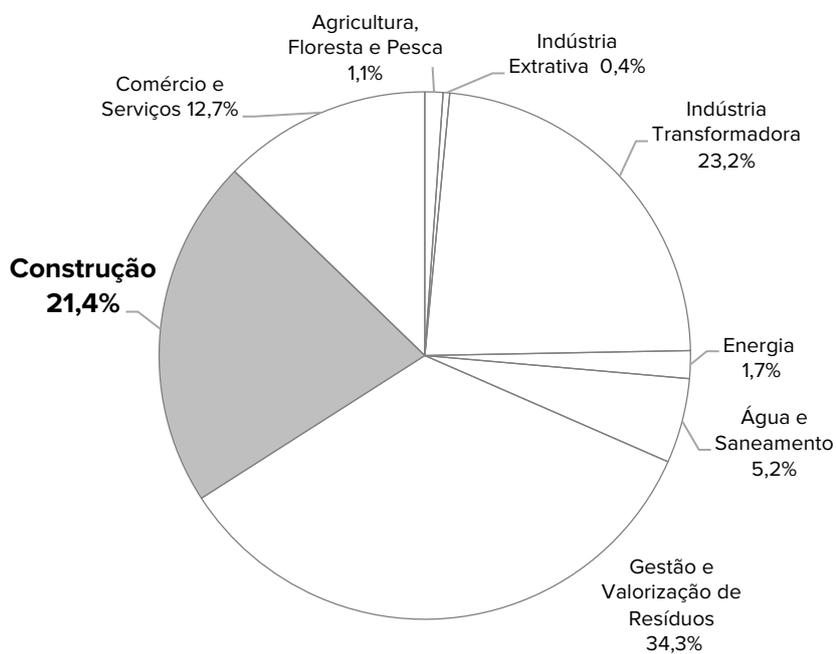
Figura 2.6. Extração Global de Matérias Primas em Biliões de Toneladas (Gt) (Veldhoven et al. 2022)

2.3. Consequências da construção

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA) (**figura 2.5.**), o setor da construção atingiu um recorde histórico de emissões de CO₂. No ano 2022 produziu cerca de 14,3 Gt, um aumento significativo relativamente a 2021 (10 Gt) e os anos anteriores. Este setor tem um peso significativo nas emissões de CO₂ relativamente às restantes atividades, sendo atualmente responsável por cerca de 40% das emissões globais de dióxido de carbono. Dentro da indústria da construção, 27% destas emissões correspondem a operações nos edifícios (consumo de energia), 6% correspondem à indústria da construção (construção dos edifícios) e 7% a outras indústrias, que representam emissões através da fabricação de materiais como o betão, aço e alumínio para os edifícios.

O *Circularity Gap Report 2022* reiterou que a extração de matérias primas tem aumentado: em apenas seis anos, a economia global consumiu mais meio trilhão de toneladas de materiais virgens, nomeadamente, minerais, combustíveis fósseis e biomassa. Este enorme volume de materiais está a aumentar ano após ano. Este relatório afirma ainda que a produção de resíduos está na origem da maioria dos problemas ambientais atuais, desde a perda de biodiversidade, ao aquecimento global e poluição do ar. Segundo a **figura 2.6.**, com base no presente relatório, em apenas 50 anos, o uso global de materiais quase quadruplicou – superando o crescimento populacional. Em 1972, quando o relatório do Clube de Roma *Limites do Crescimento* foi publicado, o mundo consumiu 28,6 giga toneladas de matéria-prima. Em 2000, esse número subiu para 54,9 giga toneladas e, a partir de 2019, ultrapassou os 100 giga toneladas. O aumento dos níveis de resíduos está a acompanhar a rápida aceleração do consumo. Em última análise, mais de 90% de todos os materiais extraídos e utilizados são desperdiçados, o que significa que apenas 10% são reutilizados. Essa taxa de extração continua a ameaçar o futuro do planeta e as previsões mostram um futuro incerto: de acordo com o Painel Internacional de Recursos, o uso de materiais pode aumentar

para entre 170 e 184 giga toneladas em 2050 se não forem tomadas medidas.



a

Figura 2.7. Geração de resíduos em 2021 por atividades económicas em Portugal. (INE)

2.4. A Construção em Portugal

Em Portugal, pode-se afirmar que a construção é predominantemente feita no estaleiro (*onsite*). De acordo com Smith & Quale (2017), a construção *onsite* pode apresentar alguns desafios e problemas, nomeadamente os prazos de construção, que podem atrasar muito mais do que o esperado, devido a atrasos causados por condições climáticas, falta de mão de obra qualificada ou problemas de logística. Além disso, a construção *onsite* é mais propícia a gerar desperdício de material do que outros métodos de construção, assim a falta de controlo de qualidade em cada etapa da construção, o que pode levar a problemas de segurança e durabilidade da estrutura.

A **figura 2.7.** mostra a quantidade de resíduos produzidos pelas diferentes atividades económicas em Portugal, destacando-se o setor dos resíduos, com 34,3%, o setor da indústria transformadora com 23,2% e em terceiro lugar o da construção, com 21,4%. A construção convencional portuguesa é maioritariamente classificada como um tipo de construção permanente, onde os elementos se misturam de um modo que impossibilita a sua futura separação. Segundo o LNEC, o cimento, betão, tijolo, materiais cerâmicos e reboco são os materiais mais utilizados nas construções, tornando-as em construções permanentes, incapazes de separar os seus componentes e reutilizar esses materiais quando existem intervenções, criando-se resíduos que acabam em aterros sanitários. A incapacidade de reutilização de determinados materiais tem como consequência um setor de construção com baixa circularidade e alta taxa de produção de resíduos.



3. Circularidade

Figura 3.1. Hospital Triemli, (1964) Zurique: Os elementos do edifício pré-fabricado foram considerados para implementação noutros edifícios. (Devènes J. et al.)

Como uma prática holística, a sustentabilidade deve combinar estratégias técnicas e materiais, bem como sociais, económicas, ecológicas e também éticas, que têm múltiplas interações complexas e muitas vezes também objetivos e prioridades conflitantes. Em nenhuma outra área isso pode ser melhor observado, abordado e influenciado do que na arquitetura e construção, porque na organização, projeto e construção do ambiente construído encontramos as complexidades da ação sustentável, incluindo todas as suas várias experiências, problemas e soluções potenciais. (Heisel et al., 2022)

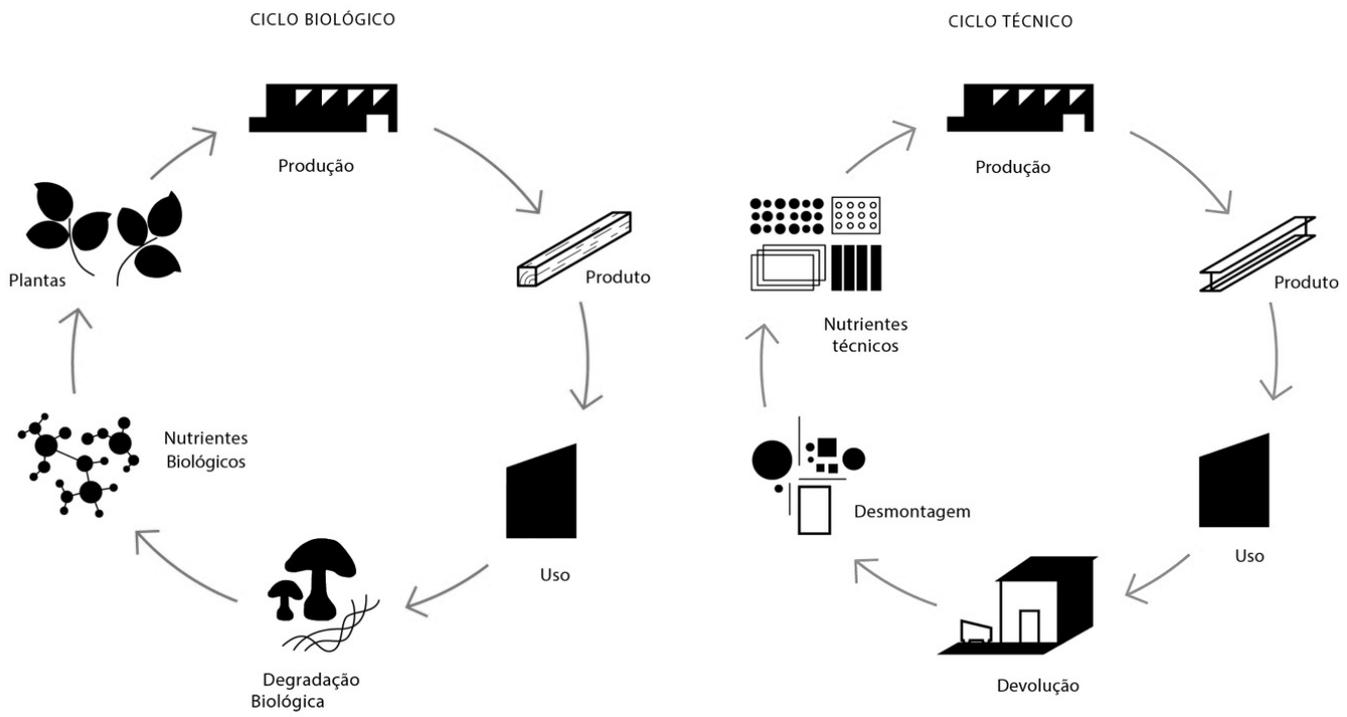


Figura 3.2. Diagrama da diferenciação do ciclo biológico e do ciclo técnico (Heisel et al., 2022).

3.1. Economia circular

A Economia Circular, segundo Heisel et al., (2022), é uma temática que tende a ser bastante mencionada atualmente, em vários contextos, desde o ciclo da natureza até aos modelos empresariais. Do ponto de vista económico, os princípios de circularidade começam-se a verificar em algumas empresas, como por exemplo a IKEA, que começa a preocupar-se com a reutilização dos produtos após a venda, comprando aos clientes produtos usados com o objetivo de os restaurar e vender em segunda mão. Os produtos são também projetados para serem facilmente recuperados, de forma a evitar o desperdício de materiais. Quando o projeto ou design prevê métodos de montagem e desmontagem (DFAD) mais simplificados, o produto torna-se uma futura fonte de matérias-primas, deixando de ser inútil após a sua vida útil inicial.

Em *Building Less, Better, Different*, destaca-se que o desenvolvimento de novos princípios de construção, representa a base tecnológica para permitir o uso circular de matérias-primas. Transformar o setor da construção para operar de acordo com os princípios de construção circular, implica alterações radicais na maneira como os recursos são geridos na indústria da construção e no ambiente construído. Semelhante a sistemas de armazenamento, os edifícios, cidades e regiões terão que acompanhar e antecipar os stocks e fluxos de materiais. A **figura 3.2.** ilustra o princípio *Cradle-to-Cradle*¹, que sintetiza a diferenciação dos ciclos biológicos e técnicos que devem ser considerados separadamente para evitar comprometer o potencial de circularidade de nutrientes, bens e produtos e os seus mecanismos correspondentes. Enquanto que o ciclo biológico se foca na degradação natural dos produtos, o ciclo técnico foca-se na desmontagem e valorização de componentes.

¹ O conceito *Cradle-to-cradle* representa o ciclo de vida de um produto, componente ou edifício, abrangendo todas as fases, inclusive os benefícios adjacentes à sua reciclagem e possível reuso, após o fim de vida. McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle To Cradle: Remaking The Way We Make Things*. North Point Press.

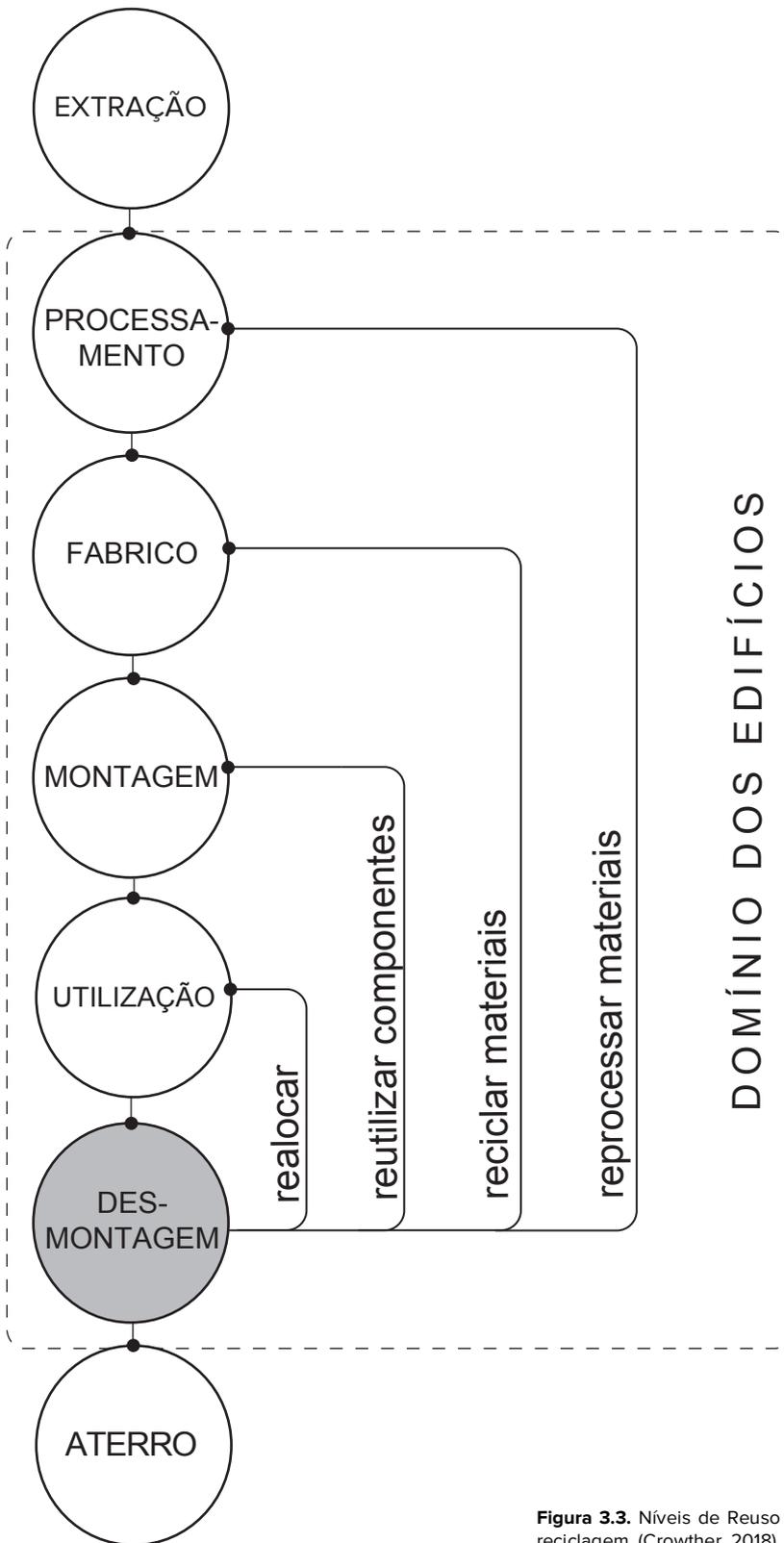


Figura 3.3. Níveis de Reuso e reciclagem. (Crowther, 2018)

3.1. ECONOMIA CIRCULAR

De acordo com Assche (2019), os processos construtivos convencionais entram em conflito com o sistema de pensamento circular: Isto porque estes processos construtivos são lineares, e o aterro é a fase final desse processo. Existe a necessidade de implementar uma nova lógica que incorpore os modelos de pensamento circular. Até recentemente, o processo de construção focava-se mais na criação do edifício. Face à necessidade de reduzir o consumo de matérias primas e implementar a reutilização de componentes, a atenção e o esforço no projeto são dedicados à conceção do edifício, focando-se mais na sua vida útil e no seu fim de vida. A construção convencional, não é capaz de se inserir neste contexto. O modelo linear intrínseco ao setor da construção, acaba por se tornar na razão pela qual, de acordo com Agência Europeia do Ambiente, este setor foi responsável por cerca de 50% do consumo de matérias-primas primárias na UE em 2019 e por 36% da produção de resíduos sólidos: isto porque as matérias-primas são extraídas de ciclos naturais, transformadas em bens e produtos para construção e posteriormente são descartados para o aterro. Essa abordagem ainda dominante na construção tem consequências profundas para o planeta e está a perturbar seriamente os ecossistemas existentes. Materiais como areia, cobre, zinco ou hélio em breve não serão mais tecnicamente, ecologicamente e economicamente viáveis para serem extraídos de fontes naturais. Utilizar o pensamento circular na arquitetura significa posicionar o pensamento socioeconómico na construção, relativamente à valorização e reutilização dos materiais, redução da produção de resíduos e do consumo de matérias primas na conceção ou intervenção dos edifícios.

Princípios de Circularidade

Segundo Philip Crowther (2018), se os edifícios fossem projetados tendo em mente sua futura desconstrução, poderíamos revalorizar os seus materiais e componentes, recapturando também a sua energia incorporada. É importante a implementação de estratégias de design para montagem e desmontagem na conceção dos edifícios, a fim de reduzir a produção de resíduos sólidos que são enviados para aterros sanitários e reduzir a quantidade de energia incorporada. O potencial de reutilização de um material ou componente é necessário desde o projeto inicial para permitir futura recuperação e reutilização. O investimento no ambiente construído pode oferecer retorno ecológico e financeiro através da revalorização de materiais e componentes, se se considerar o potencial de reutilização na fase de projeto e o design reversível.

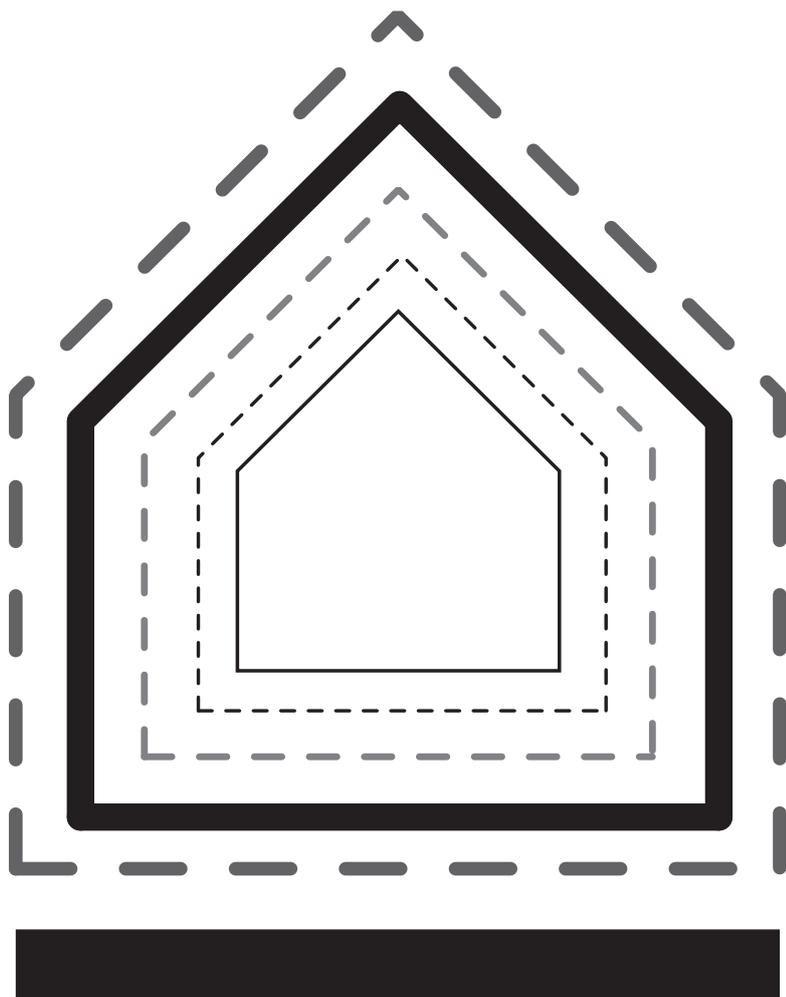


Figura 3.4. Diagrama das diferentes camadas nos edifícios. Reinterpretação do original por Stewart Brand, 1995.

Figura 3.5. Separação das diferentes camadas nos edifícios.

3.2. DFAD



De acordo com *Crowther (2009)*, o motivo pelo qual existe um grande entrave na reutilização e reciclagem de materiais e componentes, no contexto da arquitetura e construção, deve-se à incapacidade de desmontar as diferentes camadas umas das outras. Assim, a capacidade de reutilização e reciclagem no final da vida útil dos edifícios deverá ser determinada desde a fase mais preliminar do projeto.

Os princípios de projeto para a montagem e desmontagem – *design for assembly and disassembly* (DFAD) – é um método de definição de projeto que incorpora, desde as primeiras fases do projeto, um pensamento arquitetónico e construtivo que respeita princípios de circularidade, focando-se na construção de soluções capazes de facilitar a sua posterior desmontagem, evitando assim o transporte de pedaços de materiais para o aterro. A utilização de sistemas pré-fabricados tem características que propiciam a construção circular.

As camadas dos edifícios

Todos os edifícios são constituídos por camadas. Saber diferenciá-las e reconhecer as suas diferentes durabilidades é importante para quando o edifício necessitar de trabalhos de reabilitação, renovação ou demolição. As **figuras 3.4.** e **3.5.** representam diagramas das diferentes camadas inerentes aos edifícios, como princípio do modelo de *Brand (1995)*, que afirma que os edifícios são compostos por seis camadas com diferentes características: fundação, estrutura, fachada, serviços, divisórias e objetos. A exploração de formas construtivas que permitam a separação destas camadas facilitará eventuais reparações e substituições, pelo que cada um destes componentes deverá ser pensado individualmente desde a fase inicial de projeto.

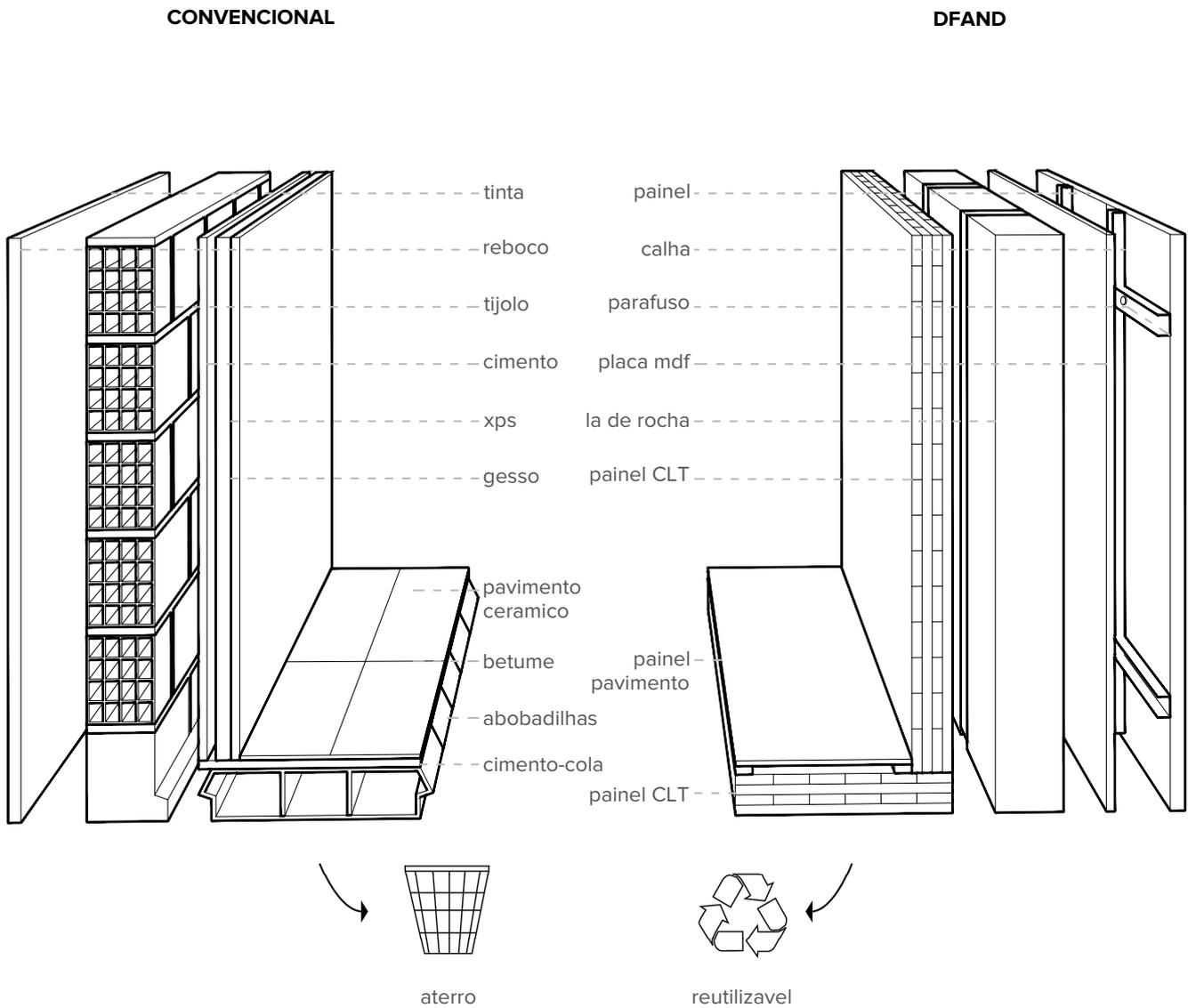


Figura 3.6. Diferença entre o sistema construtivo convencional e o sistema construtivo focado na circularidade, com facilidade na montagem e desmontagem (DFAD).

Convencional vs. DFAD

Quando um edifício é reabilitado, reconstruído ou precisa de ser demolido, muitos materiais de construção geralmente acabam em aterros sanitários. Isso requer muita energia e a perda de matérias-primas escassas e valiosas. Em Portugal, não se verifica a inclusão de princípios de circularidade na construção convencional, quer pelo custo mais acessível, quer pelos conhecimentos da mão de obra local, ou das próprias empresas de construção. Na **figura 3.6.**, foram selecionados alguns dos materiais mais utilizados na construção convencional.

Normalmente são utilizados em soluções construtivas de paredes exteriores, o tijolo perfurado, com cimento para assentamento, ou o betão feito em obra. Os isolamentos variam entre poliestireno extrudido (XPS), ou poliestireno expandido (EPS). Os revestimentos, costumam ser rebocos também feitos em obra, e no final com alguma tinta de exterior como acabamento. No interior, utiliza-se também o gesso cartonado, que tem sido um material bastante requisitado no mercado. O modo como estes elementos são colocados, resulta num tipo de construção rígida, com ligações não reversíveis, resultando em elementos impossíveis de separar, impossibilitando a sua futura desmontagem e reutilização no final da vida útil do edifício.

De modo a adaptar a construção ao pensamento circular, é necessário repensar os materiais a utilizar, mas mais importante são os métodos de construção e de montagem. O betão é conhecido por ser um material bastante poluente², contudo, se for aplicado no formato de painel, trará mais benefícios para a construção circular do que o cimento que se encontra nos interstícios do tijolo, por exemplo. O que muda é o cenário do fim-de-vida: enquanto que o painel poderá ser reutilizado diretamente para outro tipo de construção, o cimento dos interstícios, por exemplo, será partido em pedaços e enviado para o aterro.

² Segundo a Agência Internacional do Ambiente (IEA), em 2022, a indústria cimenteira produziu cerca de 8% das emissões globais de CO₂.

3.2. DFAD

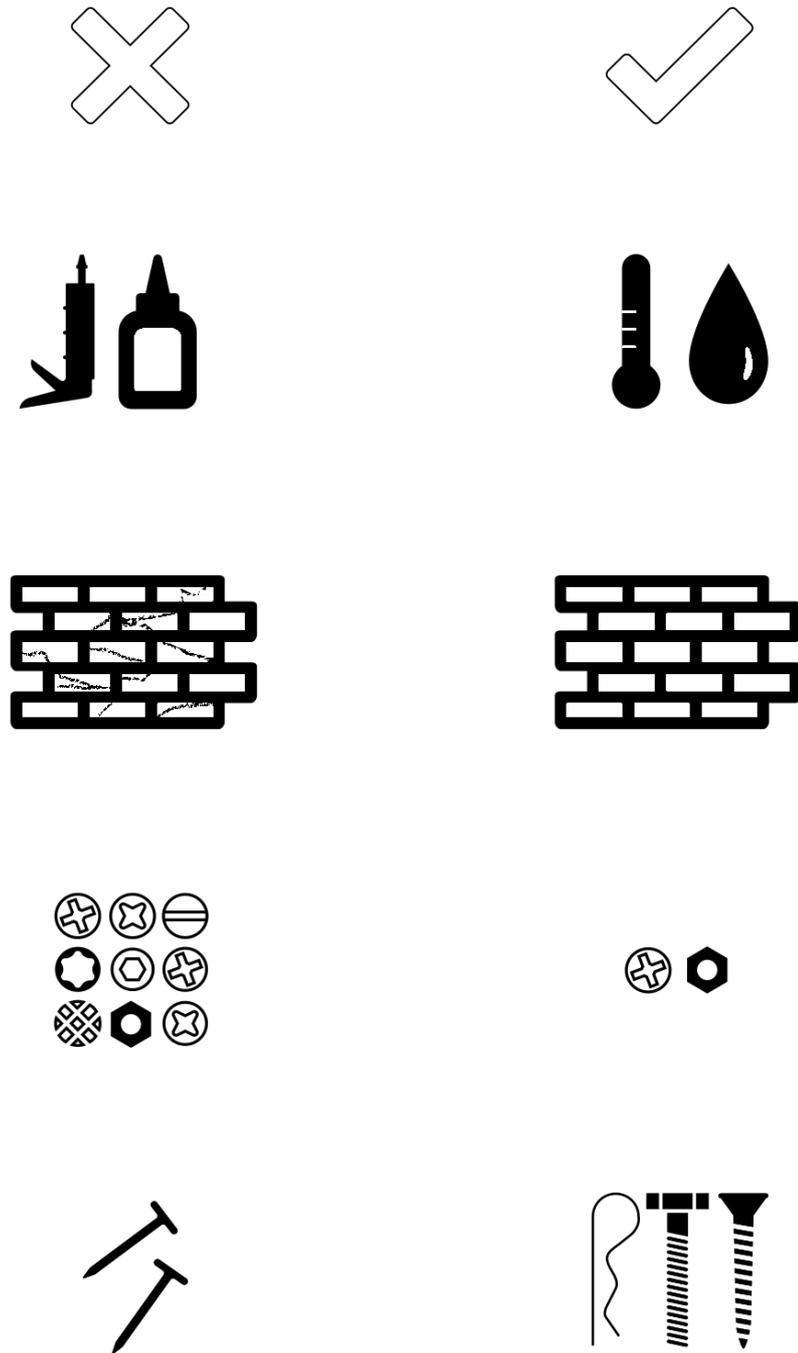


Figura 3.7. Diagrama de estratégias a seguir ao considerar o DFAD.

Boas práticas no DFAD

A regra geral para projetar de forma “desarmável” é através de ligações que sejam reversíveis. Juntas em ligações mecânicas, por exemplo, podem ser montadas e desmontadas várias vezes sem danificar o material ou o próprio componente de ligação. Na **figura 3.6.**, o sistema construtivo ilustrativo do lado direito, inclui uma calha metálica que suporta os painéis, permitindo a sua desmontagem de um modo simples.

Baseada numa ilustração presente em *Building a Circular Future 2018*, a **figura 3.7.** representa algumas sugestões de estratégia a serem implementadas ao considerar o DFAD. O uso de pregos através de estruturas e materiais para fazer ligações é muito comum na indústria da construção. Infelizmente, a desvantagem disso é que os pregos e as placas dentadas danificam os materiais e não podem ser adaptados a outros usos. Em vez disso, é melhor considerar o uso de parafusos, porcas e pinos, facilitando a desmontagem que permite a reutilização de materiais. Os elementos de fixação mecânica, cuja standartização e variedade de dimensão, exponencia o grau de liberdade na montagem e desmontagem. No entanto, isso torna-se problemático ao considerar o segundo uso do mesmo material. Ao usar sistemas de fixação comuns e semelhantes, haverá menos problemas para identificar diferentes tipos de fixações usados e menos ferramentas necessárias para a sua desconstrução/desmontagem. Usar aglutinantes solúveis em vez de colas e selantes é melhor ao considerar a desmontagem: a cola e os selantes não consideram a próxima vida útil do material, porque o contaminam e, portanto, deixam resíduos e às vezes rasgam o material ao separar os diferentes componentes. Ao usar aglutinantes solúveis, a resistência do adesivo é perdida quando exposta à água, temperatura, etc. sem agitação. Quando é estritamente necessário aplicar elementos de base aquosa, a argamassa de cal em vez de cimento Portland, será uma melhor escolha, porque este último é impossível de separar de qualquer componente e só deixará escombros quando for destruído, assim como o próprio tijolo, por exemplo, tenderá a quebrar antes do cimento. A argamassa de cal é muito mais flexível e permeável, e pode ser removida, através de jato de água ou desfeita com um martelo.

3.2. DFAD



Figura 3.8. Protótipo para um novo elemento estrutural de aço, VIA university college, Jimmi Jensen e Milad Ahmad Tokhi, 2015.



Figura 3.9. As ligações são feitas por um mandril com duas fendas, duas anilhas e dois contrapinos, que podem ser desmontados.

3.2. DFAD

Em *Building a Circular Future 2018*, são abordados alguns projetos que integram conceitos de circularidade. Entre esses destacam-se alguns projetos de soluções estruturais desmontáveis para variados tipos de estruturas (aço, betão e madeira), desenvolvidos na VIA University College.

O protótipo para um novo elemento de construção estrutural de aço (**figuras 3.8. e 3.9**), baseia-se num sistema de construção linear de alta flexibilidade, com colunas e vigas standard. O tempo de montagem é otimizado através de um sistema com um mandril, dois contrapinos e duas arruelas estabilizadoras, de modo a estabilizar os elementos estruturais, impedindo que estes se soltem. O processo de montagem e desmontagem é simplificado e não necessita de ferramentas.

Numa estrutura em betão, (**figuras 3.10. e 3.11**), foi desenvolvido um protótipo para uma ligação mecânica nos elementos estruturais. O protótipo desenvolve-se através de duas porcas, duas anilhas, e um parafuso longo, que transfere a carga, acessíveis, colocados em caixas de ancoragem incorporadas nos recessos pré-fabricados. Este sistema é fácil de montar e desmontar, porque as juntas aparafusadas são acessíveis a partir do lado externo da estrutura. Este conceito tem como alvo principalmente edifícios de até quatro andares.

Na madeira, (**figuras 3.12. e 3.13**), foi explorado um sistema de ligação entre painéis estruturais. Os painéis foram projetados com a tipologia macho-fêmea e foram fixados através de parafusos que os atravessam de um lado ao outro.

3.2. DFAD



Figura 3.10. Elementos utilizados na ligação da estrutura em betão.



Figura 3.11. Protótipo para uma ligação mecânica em elementos estruturais de betão. Martin Ravnsbæk e Hans Nicolai Søndergaard, VIA university college, 2015.

3.2. DFAD



Figura 3.12. Protótipo para um painel de madeira estrutural, VIA university college, Tinus Bengt Petersen e Ingri Bollingmo Løvsjøen, 2015.



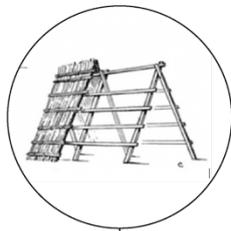
Figura 3.13. Elementos de ligação nos painéis de madeira.



4. Pré-Fabricação

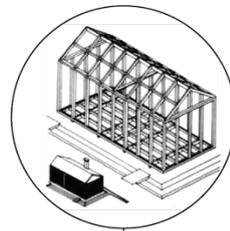
Figura 4.1. Construção do edifício modular B2, SHoP Architects, Nova Iorque, 2016.

Um sistema pré-fabricado compreendia uma série de componentes organizados hierarquicamente, com cada componente sendo um elemento claramente definido por si só e parte de uma entidade mais abrangente. (Herbert, 1984)



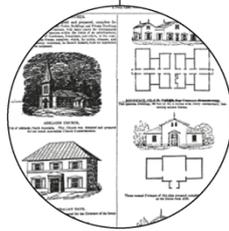
400 000 a.e.c.
Abrigos Nómadas

Portable Cottages, Austrália
1788

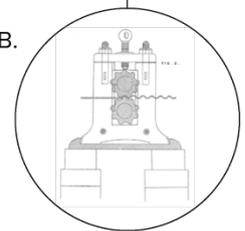
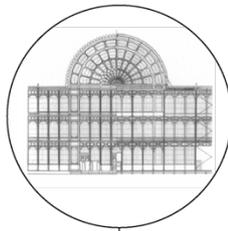


Pré-fabricação do aço, G.B.
1832

1830
Portable Colonial Cottage, G.B.

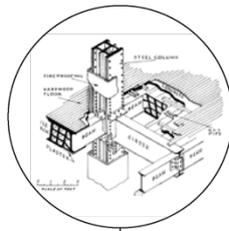


Portable Cottages, Austrália
1853

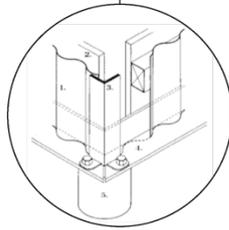


Profissão Arquitecto
1850

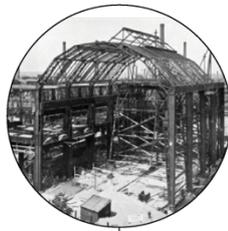
1854
Betão Pré-fabricado, França



Hennebique Houses, França
1896



1851
Palácio de Cristal, G.B.



Edifício de Betão, E.U.A.
1908

1890
Arranha-céus, E.U.A.



1907
Edifício AEG, Berlim

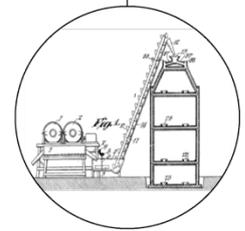
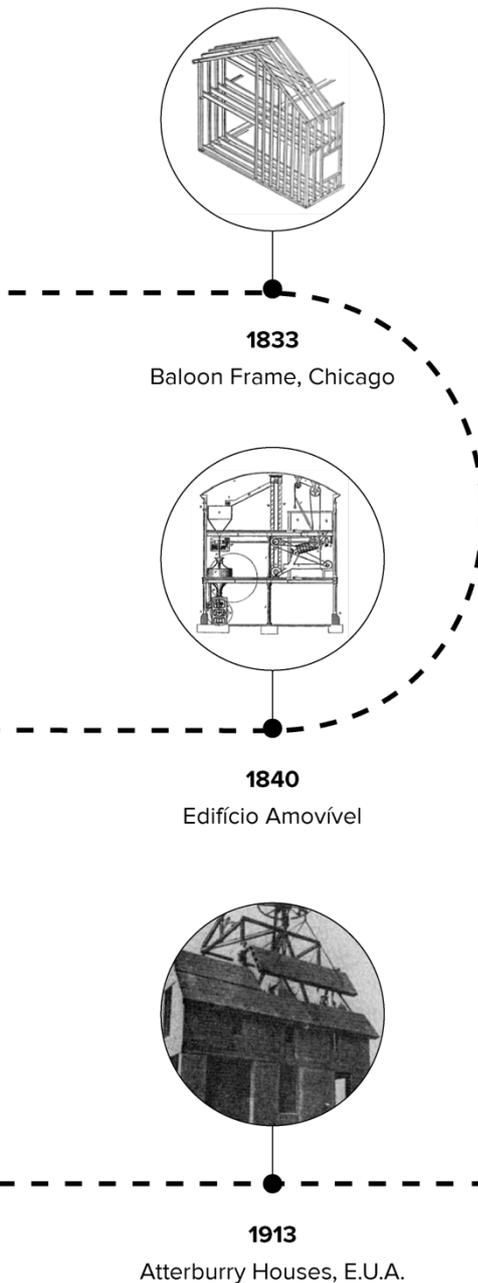


Figura 4.2.
Cronologia de sistemas
pré-fabricados (1).

4.1. Evolução



A pré-fabricação na construção, remete-nos para algo recente. No entanto, se analisarmos o contexto histórico numa perspetiva global, é possível verificar que desde tempos remotos o ser humano tende a criar sistemas e modelos de pré-fabricação com base nas suas necessidades, remetendo desde logo aos abrigos nómadas. Desde tentativas e experiências, a questão económica e até mesmo social, a definição de sistemas pré-fabricados foi mudando ao longo do tempo. As **figuras 4.2. e 4.3.** mostram uma cronologia que reúne uma seleção de projetos e experiências mencionados em três referências principais (Staib et al. 2008¹, Knaack et al., 2012² e Smith, R. 2017³) na tentativa de demonstrar a introdução, evolução e aperfeiçoamento de técnicas construtivas pré-fabricadas na arquitetura.

As **Portable Cottages**, terão sido uma das primeiras casas vendidas para o exterior. A primeira foi exportada de Inglaterra e erguida na Austrália, no espaço de uma semana, em 1788. Ao longo do tempo, desenvolveu-se um catálogo de sistemas usados para diferentes tipos de construção. Inicialmente, estas “Portable Cottages” ainda eram construídas em madeira, no entanto, após a introdução do ferro, este acabou por se tornar o material de construção predominante na década de 1840. Desenvolvida para os emigrantes, a *Portable Colonial Cottage*⁴, constava num sistema pré-fabricado de madeira e painéis de preenchimento da autoria de John Manning. Foi uma solução rapidamente implantável para as colónias britânicas em rápida expansão na Nova Zelândia e na África do Sul durante a década de 1830. Três anos depois, foi inventado o sistema **Balloon Frame** pelo carpinteiro George Snow nos Estados Unidos. A sua forma resulta

¹ Staib, D., & Rosenthal. (2008). Components and Systems - Modular Construction. Edition DETAIL.

² Knaack, U., Chung-Klatte, S., & Hasselbach, R. (2012). Prefabricated Systems: Principles of Construction. Birkhauser.

³ Smith, R. E. (2010). Prefab Architecture: A Guide To Modular Design And Construction. John Wiley & Sons, Inc.

⁴ Herbert, G. (1972). The Portable Colonial Cottage. Journal of the Society of Architectural Historians, 31, 261–275.

4.1. EVOLUÇÃO

numa estrutura linear, de elementos longitudinais e transversais uniformes de madeira (normalmente pinho), onde as vigas são contínuas. Neste tipo de estrutura, todos os elementos são importantes, e têm um papel estrutural no edifício. Este método deu lugar à produção em massa de pregos, tendo-se tornado mais acessível a sua conceção⁵.

Com a revolução industrial⁶, a utilização do ferro e aço como material construtivo e estrutural abriu novas possibilidades à construção, estabelecendo novas linguagens arquitetónicas, como é de realçar na **Biblioteca St. Geneviève**, Paris (1850), desenhada por Henri Labrouste e no **Palácio de Cristal**, Londres (1851), desenhado por Joseph Paxton. Uma fábrica de milho para a Turquia, foi o primeiro edifício inteiramente construído com ferro fundido e forjado, pré-fabricado em Inglaterra, enviado e erguido em Istambul, em 1840².

Juntamente com o ferro, um novo método construtivo e estrutural se desenvolve no século XX: o betão armado. O jardineiro Joseph Monier, a partir de uma experiência nos seus vasos de cimento, adicionando cabos, conseguiu obter uma melhor resistência⁷. E. Coignet, um empresário francês, foi o primeiro a usar elementos de betão armado pré-fabricado num casino em Biarritz (1891).

No pós-guerra dos E.U.A. verifica-se a integração de princípios de standartização na produção de ferro. É este avanço que permite a construção dos primeiros arranha-céus em aço. Um dos mais paradigmáticos é o **Reliance Building** (1890-95), desenhado por Atwood, no escritório de Arquitetura de Daniel Burham, juntamente com o engenheiro E.C. Shankland⁴. Em 1896, François Hennebique, construtor e engenheiro, desenvolveu as primeiras unidades modulares de betão armado, para espaços comerciais². No entanto, em 1908, Thomas Edison fez uma experiência para construção de uma habitação rápida e acessível. Usando o método de cofragem em grandes peças de ferro para um edifício de três andares, com a ajuda de um guindaste, depositou o betão para secagem de uma só peça. O método revelou-se pesado e difícil de modelar. Só quando Charles Ingersoll, trouxe a ideia de fazer cofragens em madeira, é que o conceito de Edison foi construído⁴. De modo a tentar também reduzir os custos de construção, Grosvenor Atterbury experimentou, em 1913,

⁵ Field, W. (1942). A Reexamination into the Invention of the Balloon Frame. *The Journal of the American Society of Architectural Historians*, 2, 3–29.

⁶ Gloag, J., & Bridgwater, D. (2023). *A History of Cast Iron In Architecture*. Routhledge.

⁷ Steinle, A., Bachmann, H., & Tillmann, M. (2019). *Precast Concrete Structures*. Ernst & Sohn.

4.1. EVOLUÇÃO

a criação de habitações com placas de betão pré-fabricado, conseguindo baixar os custos de construção em cerca de 20%⁸.

Embora tendo materializado nas suas obras o conceito de pré-fabricação, Le Corbusier teve um papel importante no pensamento da industrialização da arquitetura, defendendo em "Towards a New Architecture", no capítulo "Casas Produzidas em Série": que "uma nova era começou; um novo espírito está no exterior do mundo. (...) A grande indústria deve abordar a construção e produzir elementos de construção individuais em série. Os requisitos intelectuais para a produção em série devem ser criados." Em 1914, na tentativa de revolucionar a construção de edifícios, Le Corbusier desenvolveu o projeto **Dom-ino House**, que se baseava num sistema colunas de betão e lajes planas. Janelas, portas e armários pré-fabricados, produzidos em série, que poderiam ser montados individualmente pelos utilizadores².

Em 1916, foi patenteado por John Conzelmann, um sistema construtivo de estrutura pré-fabricada com painéis de parede, cobertura e lajes de betão armado, originalmente usado para edifícios industriais e ferroviários e mais tarde para habitação². Nos E.U.A., foi criada em 1906, pelos irmãos W.J. e O.E. Sovereign, um novo conceito de produção em massa de habitação acessível. As **Aladdin Homes**, seguiram o precedente da encomenda por correio, ou seja, os compradores podiam encomendar e montar a sua própria casa. Toda a madeira necessária para construir uma casa era previamente cortada em fábrica e entregue ao cliente. Este processo foi concebido para remover os resíduos associados ao corte da madeira no local, aumentando a velocidade de fabrico e melhorando a precisão. Os compradores apenas necessitariam de um martelo e tempo para a montagem das suas casas⁴.

Em 1926 surge um sistema de painéis na Holanda, **System Stadtrat**, de Ernst May, usado num empreendimento de cidade-jardim em Amsterdão. O sistema utilizava painéis de grandes dimensões (10x4m) que tiveram que ser fabricados no estaleiro devido ao seu imenso tamanho e foram erguidos por guindastes². Walter Gropius queria demonstrar "novas soluções para edifícios industrializados" na exposição de 1927 "The Apartment" em Weißenhof, Stuttgart. Projetou a **casa nº 17**, construída com elementos individuais e industrialmente pré-fabricados num processo de montagem de construção em junta-seca. A solução consiste em lajes de betão, sob as quais, após

⁸ Gray, C., Designing for High and Low. New York Times, 2009.

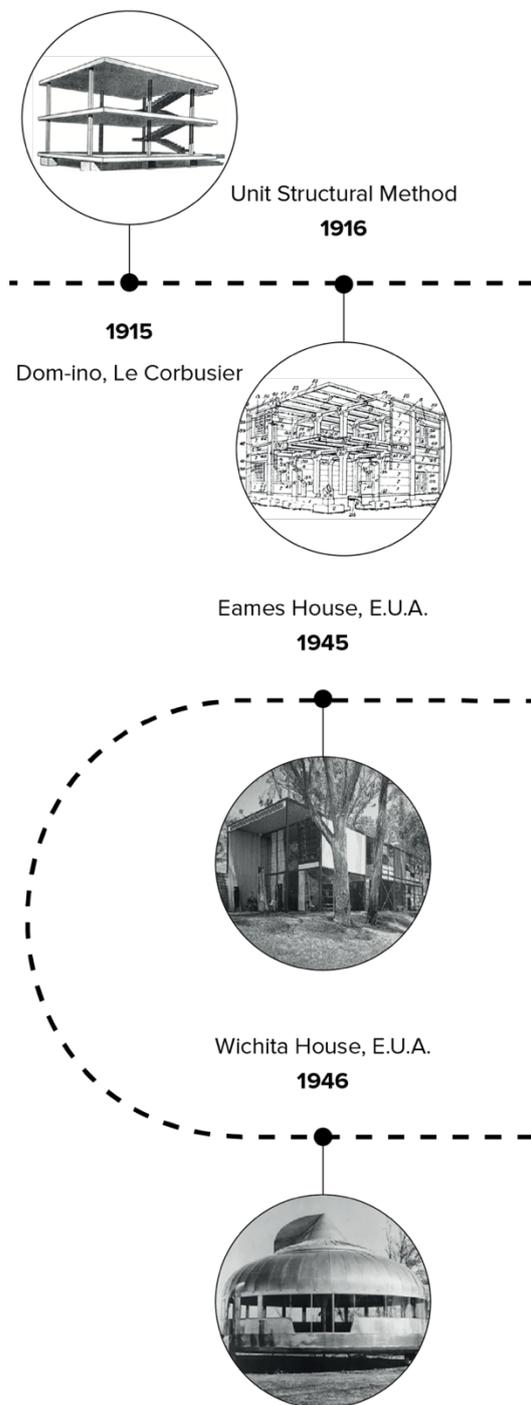
4.1. EVOLUÇÃO

posicionamento no local, se ergue uma estrutura de aço de secções Z com uma dimensão básica do módulo de 1,06 m. As cavidades foram preenchidas com painéis de cortiça de 8 cm de espessura².

Em 1928, na Declaração de La Sarraz, o Congrès Internationaux d'Architecture Moderne, (CIAM), pronunciou-se a favor da racionalização e standartização como métodos de produção económicos necessários. A declaração dos CIAM de 1928, assinada por vinte e quatro arquitetos representando a França, Suíça, Alemanha, Holanda, Itália, Espanha, Áustria e Bélgica, enfatizou a construção, como “atividade elementar do homem, intimamente ligada à evolução e ao desenvolvimento da vida humana”.

Em 1928, um projeto arrojado e inovador foi criado por Buckminster Fuller, a casa **Dymaxion**, com 11m de largura, tendo sido projetada para ser rapidamente montada. Mais tarde, em 1936, desenhou uma unidade de casa de banho pré-fabricada para a casa. Mais de uma década depois, em 1940, os militares dos EUA adotaram esta ideia em versões militares de 6 m de largura, chamadas DDU (Dymaxion Deployment Unit). Com o fim da guerra, em meados da década de 1940, a indústria dos aviões estava a ter dificuldades⁴. Fuller foi abordado para converter fábricas de aviões em instalações de produção de habitações. Isto satisfez a necessidade de manter os funcionários a trabalhar durante a crise de emprego no pós-guerra.

A **Wichita House**, também da autoria de Fuller, foi produzida em 1944-46, com Duraluminium, um material que provém da indústria aeronáutica. Esta construção, com 74 m², pesava apenas 3500 kg. Nenhum elemento desta construção pesava mais do que 5kg, portanto, seis homens poderiam erguer a casa num único dia - ou um homem em seis dias⁴. Konrad Wachsmann, desenvolveu o **Packaged House System** em colaboração com Walter Gropius, com quem estabeleceu uma parceria em 1941. Com base no seu projeto anterior de sistemas de construção com painéis, em parceria com Christoph & Unmack⁹, o **Packaged House System** era um sistema de construção modular em madeira para pequenos edifícios no qual os elementos eram ligados por meio de ganchos e contrapinos.



⁹ Christoph & Unmack, fundada em 1894 em Saxony, era uma empresa produtora de casas em madeira.

4.1. EVOLUÇÃO

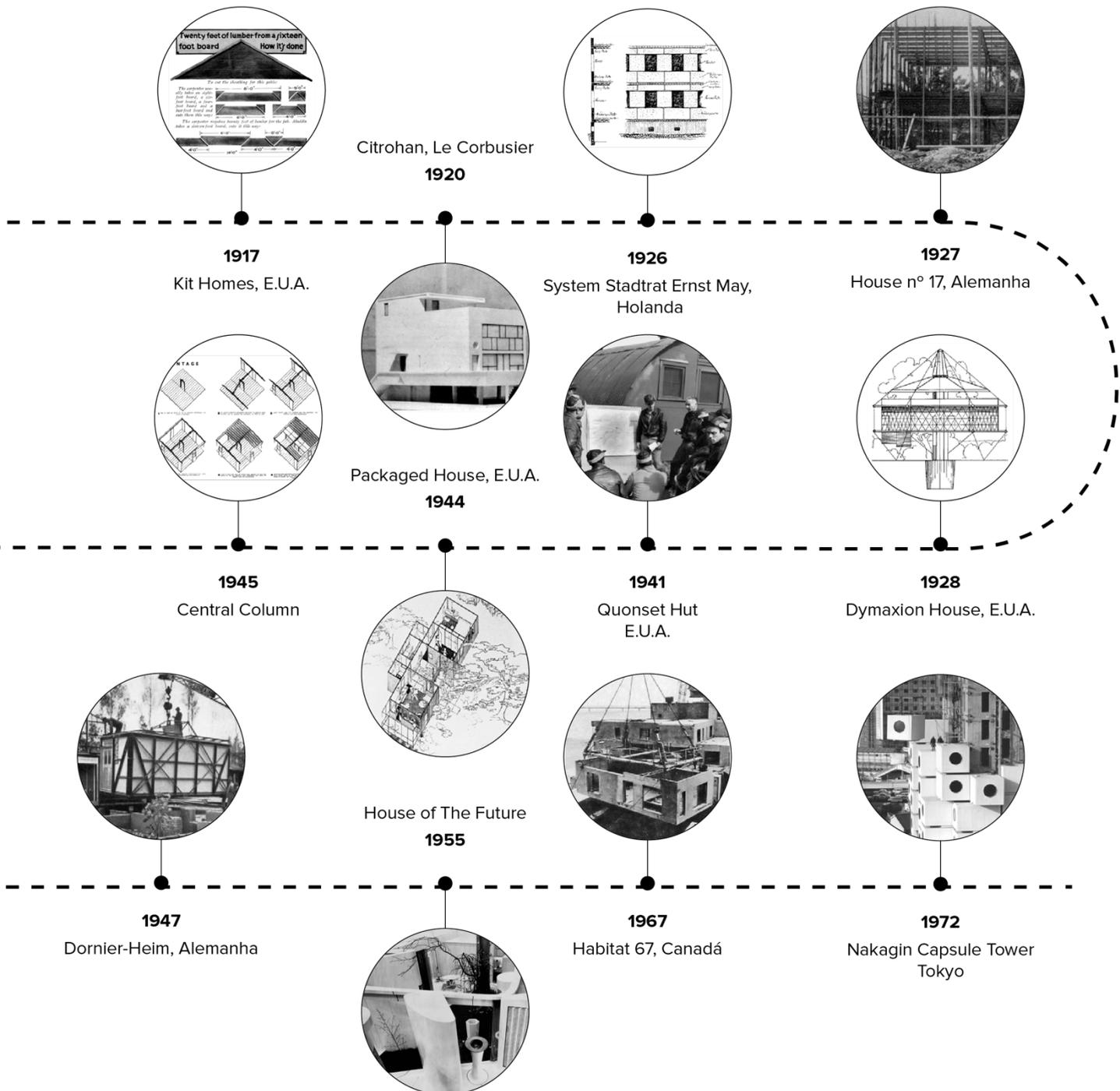


Figura 4.3.
Cronologia de sistemas
pré-fabricados (2).

4.1. EVOLUÇÃO

O **General Panel System**, desenvolvido por Wachsmann e Gropius em 1943/44, tinha menos elementos e técnicas de ligações melhoradas. A intenção era desenvolver o sistema de construção pré-fabricado mais completo possível, que poderia ser simplesmente montado no local por trabalhadores não especializados, que não tinham conhecimento ou competências prévias necessárias para qualquer tipo de construção de um ou dois pisos.

A personificação da pré-fabricação na série Case Study Houses pode ser vista mais explicitamente na **Casa Charles e Ray Eames**. Este influente casal de arquitetos e designers de meados do século XX, propõem um sistema composto por partes disponíveis na indústria, inclusive a estrutura de aço, em que recorreu a sistemas com componentes *standard*. A casa não se repetiu, no entanto poderia ser duplicada se uma lista de instruções e desenhos fossem entregues, mas representava a maximização da indústria disponível na época⁴.

A Alemanha do pós-guerra, gravemente danificada, foi reabilitada pelo desenvolvimento de sistemas habitacionais pré-fabricados e prontos. Com base na sua experiência na construção de habitações temporárias, o fabricante de aeronaves, Dornier, produziu pequenas casas prontas de dois andares, que tinham estruturas primárias de suporte de perfis de aço dobradas leves. Estes módulos eram construídos na fábrica em duas partes, completas, e sendo montados e revestidos com betão projetado no local².

O complexo habitacional **Habitat** de Moshe Safdie, construído como parte da Exposição Mundial de 1967, explorou a construção modular, através da criação de apartamentos pré-fabricados em betão, que se vão ligando em associações com várias orientações. Embora tenha custado mais do que a habitação convencional da época, foi uma obra experimental que auxiliou à compreensão do comportamento estrutural e a capacidade de dispor módulos pré-fabricados em composições diversas. Dado o elevado custo associado a este tipo de construção, a partir deste período, a arquitetura modular foi em grande parte preterida. Uma exceção é a Torre de Cápsulas *Nakagin*, Tóquio (1970), onde o arquiteto Kisho Kurokawa testa o recurso a um sistema modular de habitáculos com dimensões de habilidade mínima, formalmente similares a cápsulas, que se agregam numa megaestrutura. Este projeto pode ser ligado a outras obras contemporâneas de arquitetura do final da década de 1960 representativas do metabolismo. O interior da cápsula é totalmente pré-fabricado: desde o sistema de áudio até às instalações sanitárias.

4.1. EVOLUÇÃO

No estaleiro, as cápsulas são içadas por uma grua e presas ao núcleo de betão. Devido à substituição ou remoção de cápsulas individuais, a aparência da torre poderia evoluir continuamente ao longo do tempo, impedindo que esta se tornasse obsoleta.^{2,3,4}

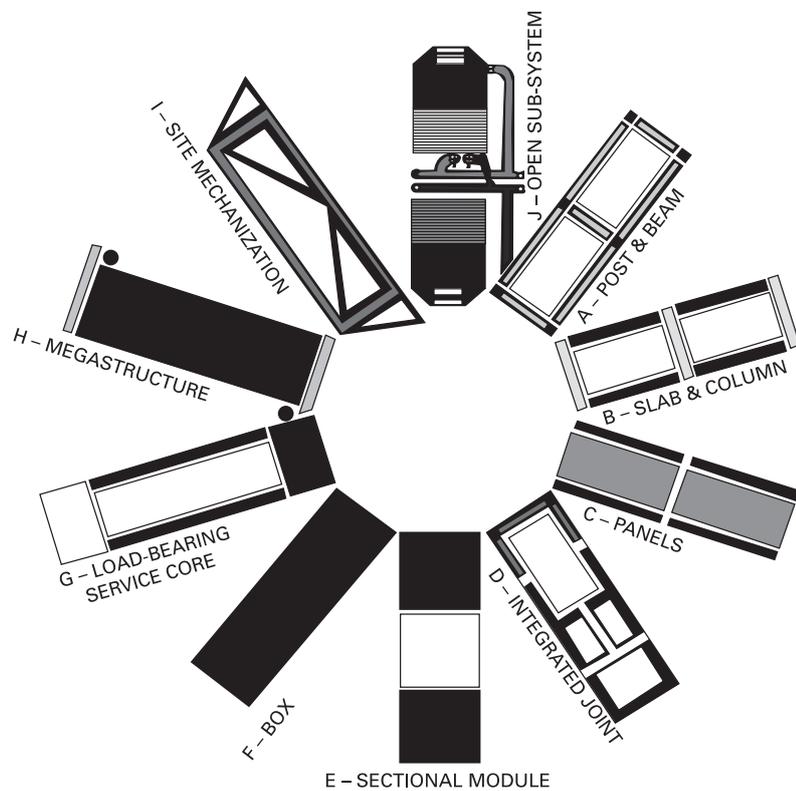
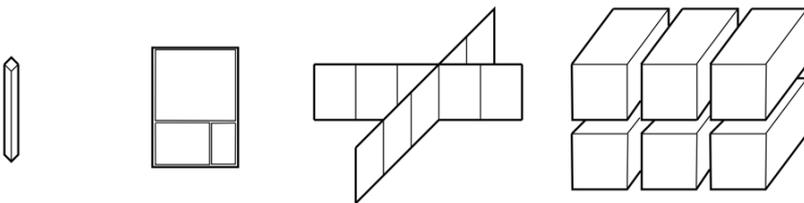
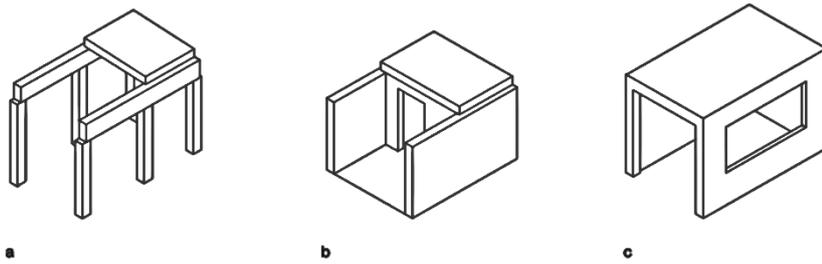


Figura 4.4. Sistematização dos princípios de sistemas pré-fabricados a-peças, b-painéis, c-módulos (Staib, 2008).

Figura 4.5. Sistemas pré-fabricados (Smith, R. 2010)

Figura 4.6. Tipos de sistemas de edifícios industrializados (Smith, R. & Quale, D., 2017)

4.2. Estado da arte

A construção com sistemas pré-fabricados, de acordo com Knaack et al., (2012), engloba a produção e utilização de componentes ou módulos pré-planeados como solução para construir com maior qualidade e eficiência. Está associado a redes dimensionais, elevados padrões técnicos, custos mais baixos e à repetição de componentes ou objetos. Hoje em dia, quase todas as ciências e indústrias são sistemas, e a indústria da construção já não é uma exceção, mas sim um setor que pelas suas idiossincrasias tardou em adotar processos mais sistematizados. Os sistemas de construção são utilizados para simplificar o planeamento complexo e o processo de construção. O seu carácter especial reside no facto de não estarem relacionados com nenhuma tarefa específica de construção, mas poderem ser aplicados como soluções universais. A construção de sistemas é frequentemente referida como sistemas pré-fabricados devido à natureza industrial da produção da construção. Muitos sistemas de construção consistem em componentes fabricados e utilizam métodos industriais de montagem, mesmo quando construídos no local.

De seguida, e de acordo com quatro textos de referência, expõem-se possibilidades para a compreensão de sistemas pré-fabricados pelo meio de decomposição em vários sistemas.

Components and Systems, 2008

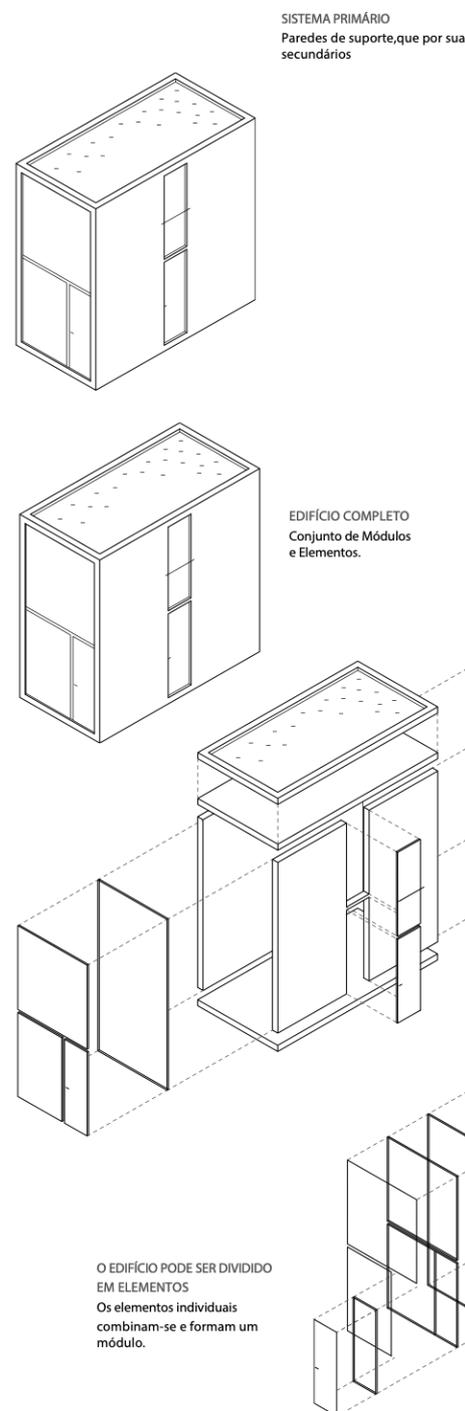
Segundo (Staub, 2008), os sistemas pré-fabricados dividem-se em três categorias, Esqueleto, Painel e Módulo (**figura 4.4.**). No entanto, dentro destas categorias, os autores fazem a distinção entre materiais, nomeadamente o aço, madeira e betão, pois os sistemas variam consoante os materiais utilizados. Do sistema de esqueleto, os autores começam por falar dos elementos lineares do aço, evidenciando os perfis existentes e o seu propósito, bem como os elementos de conexão entre elementos lineares deste material. São também referenciados os princípios de construção com este material (estrutura de viga contínua, estrutura de coluna contínua e estrutura sem direção).

Prefab Architecture, 2010

(SMITH R. E., 2010), menciona que os elementos pré-fabricados podem ser divididos em: componentes, que são elementos individuais que permitem uma maior flexibilidade na construção; Painéis, que podem ser subdivididos em painéis pequenos, painéis leves, painéis estruturais com isolamento, paredes-cortina e sistemas de revestimento. A pré-fabricação pode ser classificada na medida em que os elementos são preenchidos antes da montagem no local. A **figura 4.5.** ilustra os diferentes tipos de sistemas: materiais, componentes, painéis e módulos. Geralmente, os benefícios da pré-fabricação podem ser verificados à medida que os projetos conferem graus cada vez maiores de pré-fabricação.

Prefabricated Systems, 2012

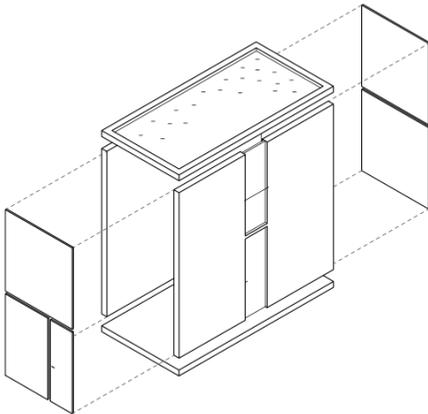
(Knaack et al., 2012), com uma visão semelhante de que os edifícios se dividem em quatro tipos básicos de construção: construção com estrutura leve, painéis, módulos e combinado. A maneira como os componentes de construção são entregues influencia a abordagem e a extensão da construção (*offsite vs onsite*). No entanto, discute a subdivisão dos sistemas em níveis de construção ou em componentes individuais, como cobertura, fachada, etc. Seguindo isso, discute o grau de pré-fabricação da construção e, finalmente, os tipos de ligações. Defendendo que essas diferentes maneiras de considerar a construção são necessárias para explicar os diferentes termos e métodos de construção usados. Segundo os autores, um sistema é uma estrutura de elementos individuais que formam um todo. O desenvolvimento em edifícios mais complexos, leva a uma maior divisão do sistema em sistemas primários e secundários, e em módulos e elementos. Os edifícios podem ser subdivididos em diferentes níveis de construção: O sistema, que consiste em sistemas primários e secundários, descreve o edifício como um todo, que por sua vez pode sofrer modificações como alteração de paredes, lajes, etc. O sistema primário geralmente representa a estrutura do edifício, enquanto o sistema secundário representa a sua envolvente. Os módulos são: módulos de fachada, janelas, portas, escadas, sistemas de telhado, etc. Os elementos são: tijolos, painéis de janelas, janelas com guarnição, vigas, etc. Esta subdivisão é hierárquica. Vários elementos podem formar um módulo e os módulos montados, o sistema. Distinguir as modificações de um edifício é simples, desde que a separação de funções seja refletida em módulos separados.



Offsite Architecture, 2017

Em *Offsite Architecture* os autores (SMITH R. e QUALE J., 2017), propõem a existência de 10 tipos de categorias de sistemas pré-fabricadas (**figura 4.6.**), mencionando também os tipos de fabricação dos mesmos, em que as três grandes categorias (peças, módulo e híbrido) são subdivididos em “A – Pilar-Viga”, o sistema mais simples onde apenas os elementos lineares são produzidos em fábrica; “B-Laje-Coluna” com elementos verticais lineares mas com integração de uma laje contínua que pode integrar os serviços; “C-Painel”, elementos maciços com distribuição de cargas uniformemente, que respondem aos requisitos de isolamento térmico e acústico; “D-Junta Integrada” componente monolítico com as conexões simplificadas no local; “E- Módulo Seccionado”, módulos pequenos e fáceis de transportar, mas incompletos, uma vez que precisam de um processo complementar no local; “F-Box”, unidade autónoma completa na fábrica; “G- Núcleo estrutural de serviços”, onde o núcleo é construído na fábrica, num módulo de capacidade estrutural de forma a suportar as lajes e os painéis exteriores; “H- Megaestrutura”, em que é desenvolvida uma subestrutura fortificada que permite atingir uma altura superior com os módulos, ao invés de os empilhar; e “I- Mecanização no Local”, onde a fábrica é transportada até ao estaleiro.

SISTEMA SECUNDÁRIO
Fachadas, paredes, tectos, coberturas e pavimentos.



O EDIFÍCIO PODE SER DIVIDIDO EM SISTEMAS
Funções separadas, como a estrutura de suporte de carga ou a envolvente do edifício, são atribuídas ao sistema primário estrutural e ao sistema secundário de fachada.

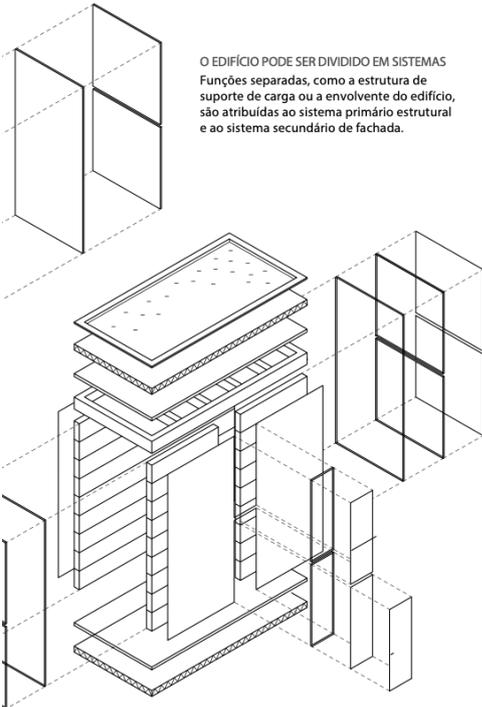
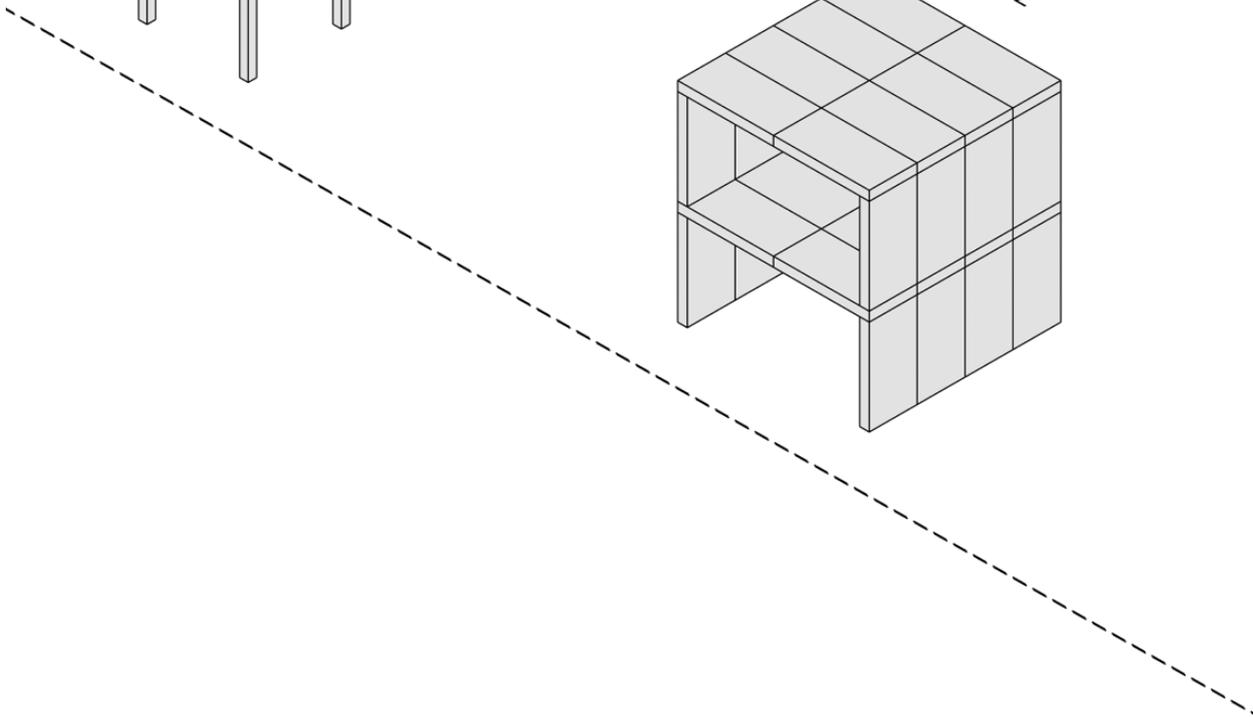
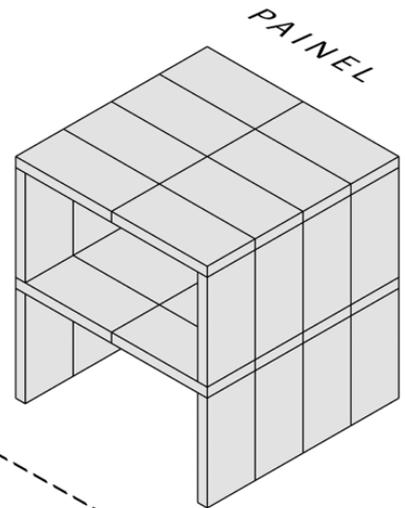
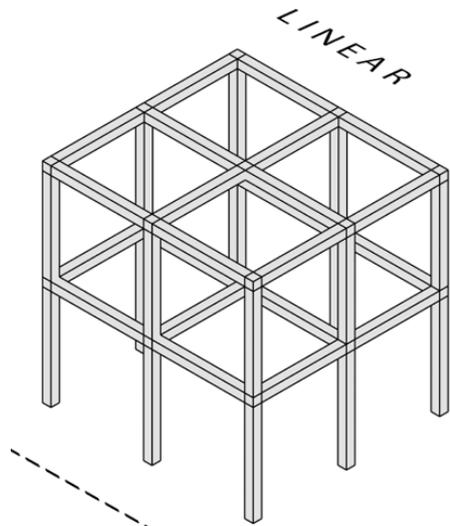


Figura 4.7. Tipos de sistemas em edifícios pré-fabricados (Knaack et al, 2012)



4.3. Níveis de Pré-fabricação

De forma a consolidar os sistemas anteriormente referenciados, com base nas referências previamente expostas, pode-se sugerir que os sistemas atuais pré-fabricados podem-se dividir em quatro categorias principais: Linear, Painel, Modular e Híbrido (**figura 4.8.**). Cada uma destas categorias desenvolve-se em subcategorias, que apresentam algumas variações. A singularidade destes sistemas e a procura pela escolha do mais adequado, deu lugar a uma análise qualitativa e a escolha de um projeto ilustrativo, nas páginas seguintes. No entanto, é de salientar que o tipo de projeto e o local são fatores determinantes para a escolha de um ou mais destes sistemas construtivos, pelo que devemos ter sempre em mente acessibilidade ao transporte e aos equipamentos de montagem.

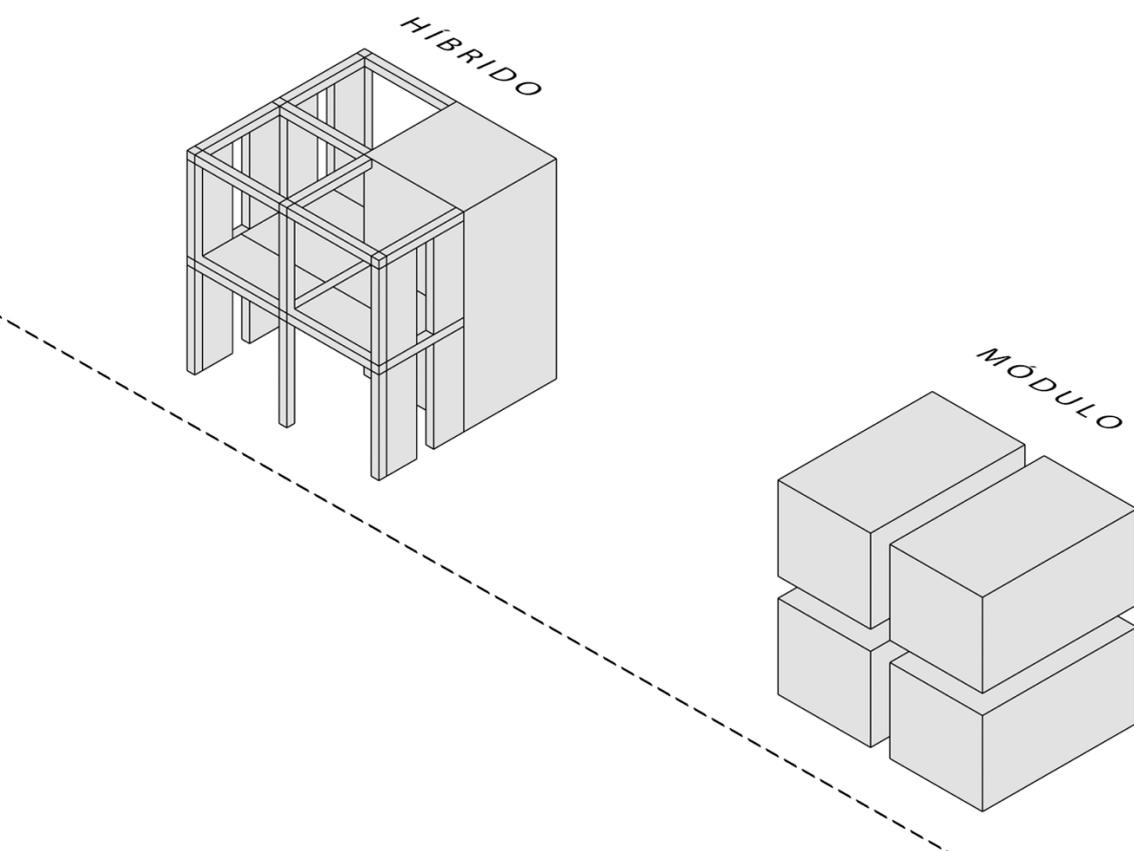


Figura 4.8. Categorias de sistemas pré-fabricados, dispostos por nível de pré-fabricação.

4.3. NÍVEIS DE PRÉ-FABRICAÇÃO

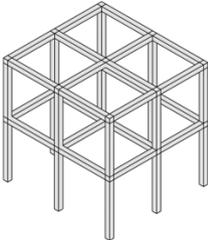
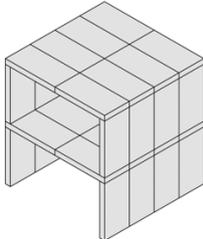
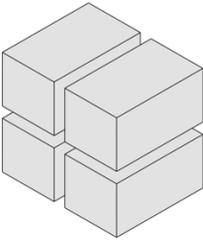
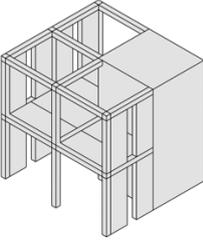
CATEGORIAS	NÍVEL DE PRÉ-FABRICAÇÃO	POTENCIALIDADES	FRAGILIDADES
<p>LINEAR</p> 	<p>Baixa percentagem de pré-fabricação.</p>	<p>Possibilidade de oferecer pilares contínuos para reduzir o número de juntas e vigas em balanço para fornecer vãos adicionais.</p> <p>Possibilidade de incorporar ligações sem elementos mecânicos.</p>	<p>Elevado número de ligações.</p> <p>Trabalhos <i>onsite</i> significativos.</p>
<p>PAINEL</p> 	<p>Média a alta percentagem de pré-fabricação (dependendo da dimensão dos painéis)</p>	<p>Melhor comportamento acústico e térmico num elemento.</p> <p>Integração horizontal e vertical da estrutura que poderá incorporar infraestruturas.</p>	<p>Resolução das pontes térmicas e estanquidade.</p> <p>Planta e secção do edifício limitados às dimensões dos painéis.</p>
<p>MODULAR</p> 	<p>Alta percentagem de pré-fabricação</p>	<p>Facilidade na ligação com as infraestruturas <i>onsite</i></p> <p>Rigor, facilidade e rapidez na montagem <i>onsite</i>.</p>	<p>Dimensões limitadas ao tipo de transporte.</p> <p>Limite de aproximadamente quatro pisos (sem megaestrutura).</p>
<p>HÍBRIDO</p> 	<p>Média a alta percentagem de pré-fabricação (dependendo da escolha do sistema predominante)</p>	<p>Qualidades do sistema painel ou linear, evitando os inconvenientes do sistema modular.</p> <p>Possibilidade de conceção de edifícios altos.</p>	<p>A construção é repartida entre <i>onsite</i> e <i>offsite</i>, aumentando o custo da mão de obra.</p>

Tabela 4.1.
Características dos sistemas pré-fabricados

4.3. NÍVEIS DE PRÉ-FABRICAÇÃO

Na caracterização dos sistemas pré-fabricados, (**tabela 4.1.**), foram selecionados alguns parâmetros: o nível de pré-fabricação, a liberdade arquitetônica, que simboliza a possibilidade de abrir vãos, ou criar edifícios com maior variação identitária e a performance construtiva, que se foca nas qualidades exclusivas a cada sistema.

Linear

Sistema construtivo em partes, com montagem *in situ*: envolve elementos lineares, tais como pilares e vigas, com ligações mecânicas ou em junta-seca, produzidos em grandes quantidades e em fábricas especializadas, implicando um elevado número de ligações no estaleiro.

Painel

Sistema construtivo em partes, com montagem *in situ*: envolve alguns componentes mais elaborados, sobre a forma de painéis, podendo já constituir as diferentes camadas de um elemento construtivo (parede ou laje), produzidos em grandes quantidades e em fábricas especializadas, implicando também algumas ligações no estaleiro.

Modular

Sistema de módulo tridimensional feito em fábrica: implica que todos os espaços e todos os componentes do edifício sejam inteiramente feitos, montados e acabados na fábrica como módulos 3D estruturais, exigindo apenas conexões simples com a infraestrutura (fundações e infraestruturas de ligação) e entre si uma vez no local. Podem conter apenas a estrutura ou agregar todos os subsistemas e acabamentos.

Híbrido

O sistema híbrido faz uma junção das vantagens do sistema linear, com o objetivo de evitar as desvantagens do sistema modular. São produzidos em fábrica os elementos mais simples, como lajes, paredes e algumas infraestruturas, as partes mais complexas do edifício são elaboradas no estaleiro.

4.3.1. SISTEMA LINEAR

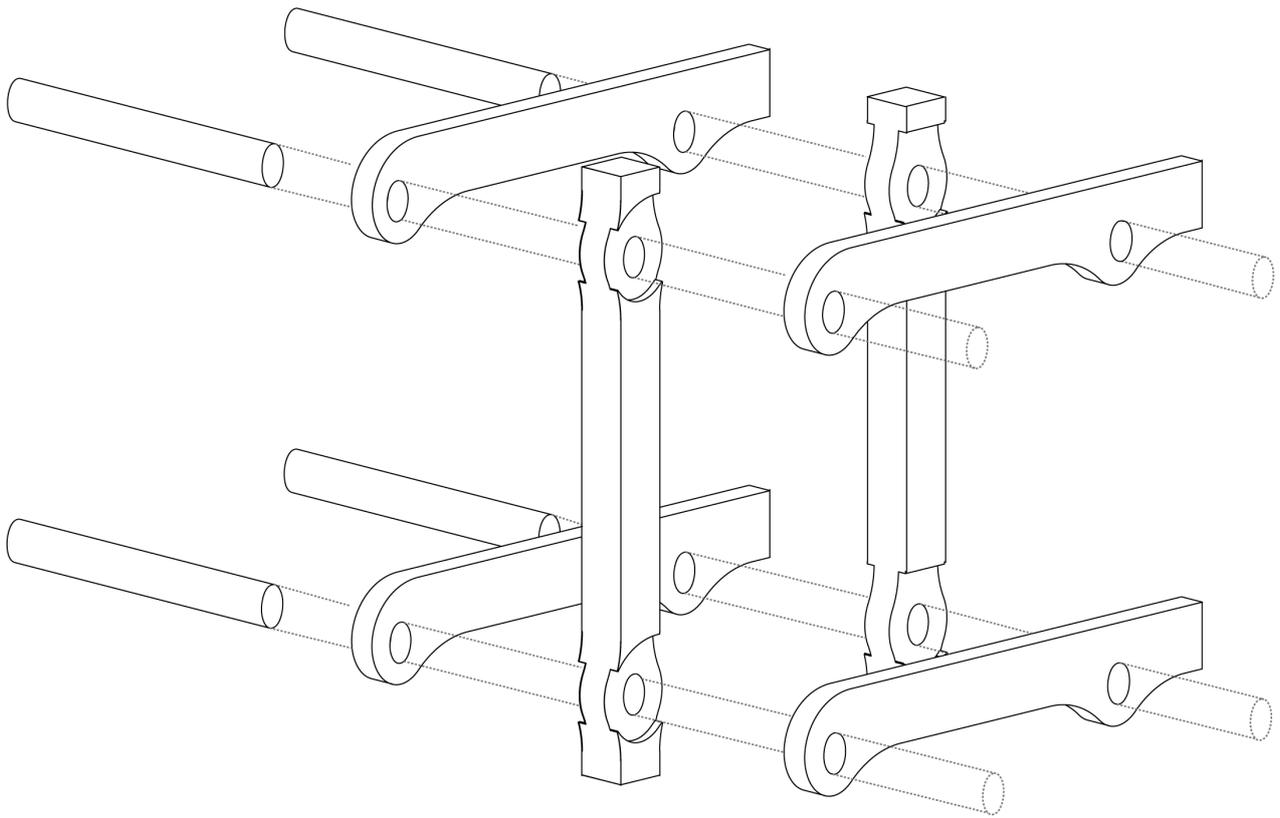
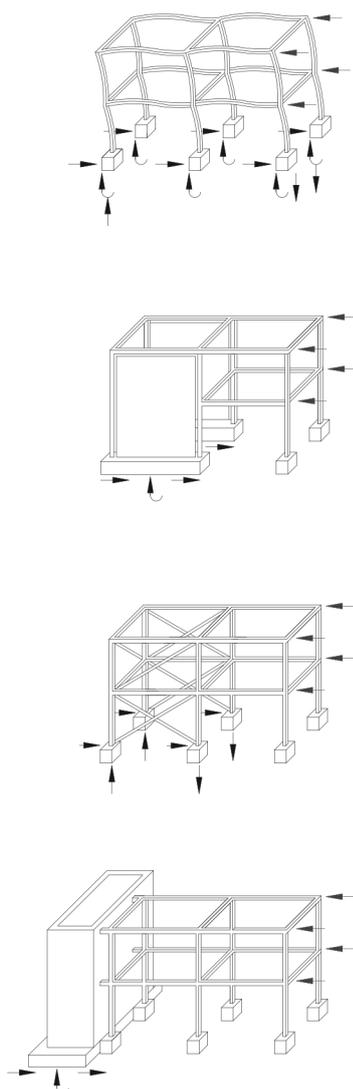


Figura 4.9. Sistema construtivo do edifício Tamedia Head Office, Shigeru Ban Architects, 2013, Zurique, Suíça. (Green & Taggart, 2020)

4.3.1. Sistema linear



A construção em esqueleto, ou seja, com elementos lineares pré-fabricados, representa o nível mais simples de pré-fabricação, pelo que existe ainda muito a fazer na construção do edifício. Geralmente, estes elementos garantem apenas a camada estrutural do edifício. O sistema esqueleto é constituído por componentes simples, produzidos em grandes quantidades e em fábricas especializadas, sendo transportados e entregues separadamente no local, implicando assim uma série de operações de montagem *onsite*.

Por outro lado, a utilização deste tipo de sistema construtivo possibilita a criação de vãos maiores com o uso de pilares ou vigas contínuas. Em edifícios em altura, este tipo de estrutura tende a ter mais fragilidades, necessitando de elementos adicionais que assegurem a sua estabilidade relativamente às ações do vento, conforme a ilustração na **figura 4.10**.

Tamedia Office

O projeto Tamedia Office de Shigeru Ban (2013) para um edifício de escritórios em 2013 utilizou um sistema linear único, com os elementos projetados com um princípio de encaixe e cortados em CNC, dispensando peças secundárias de ligação destes elementos (**figura 4.9**). Devido à sua forma oval, as vigas não podem girar, permitindo-lhes absorver as forças laterais às quais o edifício pode ser submetido, evitando assim o inconveniente primordial deste sistema.

Figura 4.10.

Comportamento estrutural do sistema linear: com elementos de união rígidos, painéis de contraventamento, tirantes diagonais e núcleos. (Staub & Rosenthal, 2008)

CATEGORIAS	NÍVEL DE PRÉ-FABRICAÇÃO	POTENCIALIDADES	FRAGILIDADES
LAJE-COLUNA	Baixa percentagem de pré-fabricação.	Elemento horizontal com possibilidade de integrar infraestruturas. Montagem facilitada da laje.	Necessidade de resolver o conflito da transferência uniforme das forças entre os elementos horizontais (lajes) e verticais (pilares). Repetição de elementos verticais.
PAINÉIS PEQUENOS	Média percentagem de pré-fabricação (dependendo da dimensão dos painéis)	Capacidade de transportar uma grande quantidade de uma só vez. Bom comportamento acústico e térmico.	Grande número de elementos. Elevada quantidade de pontes térmicas e estanquicidade a solucionar.
PAINÉIS GRANDES	Alta percentagem de pré-fabricação	Distribuição direta de cargas do eixo vertical ao horizontal sem qualquer transferência. Maior cobertura com apenas um elemento pré-fabricado;	Uso de sistemas de corte específicos para criação de negativos em lajes/paredes. Uso de instrumentos especiais para transporte e aplicação no local.

Tabela 4.2.
Características dos sistemas em painel.

4.3.2. Sistema painel

Na construção com painéis, os sistemas estruturais são constituídos por elementos planos de parede e laje, que formam simultaneamente um espaço fechado. Os painéis podem ser construídos em metal, madeira, derivados, betão ou alvenaria. Estes elementos podem já constituir uma parte da estrutura do edifício, podendo integrar componentes, como portas e janelas. Este sistema pode dividir-se em três subsistemas (**tabela 4.2.**), dos quais:

Laje-coluna

Elemento horizontal único e completo, elementos verticais fragmentados ou contínuos.

Painéis pequenos

Este sistema é usado apenas em edifícios de pé-direito baixo, podendo ter vários andares. Neste sistema, as paredes são construídas por painéis estreitos, sendo que o pé-direito do piso está dependente do tamanho do painel. Os painéis de formato pequeno permitem processos de projeto mais individuais do que os painéis de formato maior, podendo incorporar várias camadas do edifício. No entanto, o número de juntas e ligações é consideravelmente maior e deve ser ponderado no projeto. Embora os elementos pequenos sejam mais facilmente montados usando equipamentos mais simples, estes exigem mais tempo para a montagem.

Painéis grandes

O sistema de painéis grandes divide as cargas verticais e horizontais por uma série de painéis verticais regularmente espaçados dispostos em duas direções no plano. Podem adotar o suporte tipo plataforma ou balão (alterando a forma como estes se apoiam). Edifícios construídos usando métodos de construção de plataforma são erguidos piso a piso: as lajes do piso assentam nos painéis verticais. Nos sistemas de construção tipo balão, os painéis verticais exteriores estendem-se por

4.3.2. SISTEMA PAINEL

toda a altura do edifício enquanto os painéis de laje são ligados ao painel vertical, através de elementos de consola. Na maioria das vezes feitos de Madeira Laminada Cruzada (CLT), esses painéis idealmente têm a mesma configuração e espaçamento em cada piso do edifício. Como os sistemas de painéis tendem a resultar em plantas com uma flexibilidade limitada para reconfiguração ao longo da vida útil do edifício, estes geralmente são mais adequados para programas habitacionais, onde as necessidades dos ocupantes são fixas.

Woodcube

O Woodcube é um edifício com cerca de 15m x 10m em planta e utiliza os painéis de CLT como elemento predominante. A sua estrutura é constituída por paredes externas em CLT, um núcleo de escada e elevador centrais em betão armado, que se elevam desde a cave. Não existem estruturas secundárias, pelo que os apartamentos são subdivididos por divisórias em painéis não estruturais de madeira, facilitando uma futura reconfiguração. As coretes de serviços são também encostadas às paredes externas, de forma a serem facilmente acedidas. O Woodcube é composto por oito apartamentos de diferentes tipos, incluindo unidades de simplex e duplex. As paredes, pisos e teto são feitos de painéis de madeira maciça pré-fabricados que são laminados cruzados em camadas de tábuas horizontais, verticais e diagonais. As camadas são fixadas mecanicamente usando buchas de faia inseridas em furos perfurados perpendicularmente à face dos painéis numa malha de 240 mm x 300 mm. O edifício não faz uso de cola ou adesivos, em vez disso, os painéis de parede e piso em CLT são encaixados com parafusos de alta resistência para formar os pontos de ligação. Os painéis CLT são deixados expostos e inacabados no interior do edifício.

4.3.2. SISTEMA PAINEL

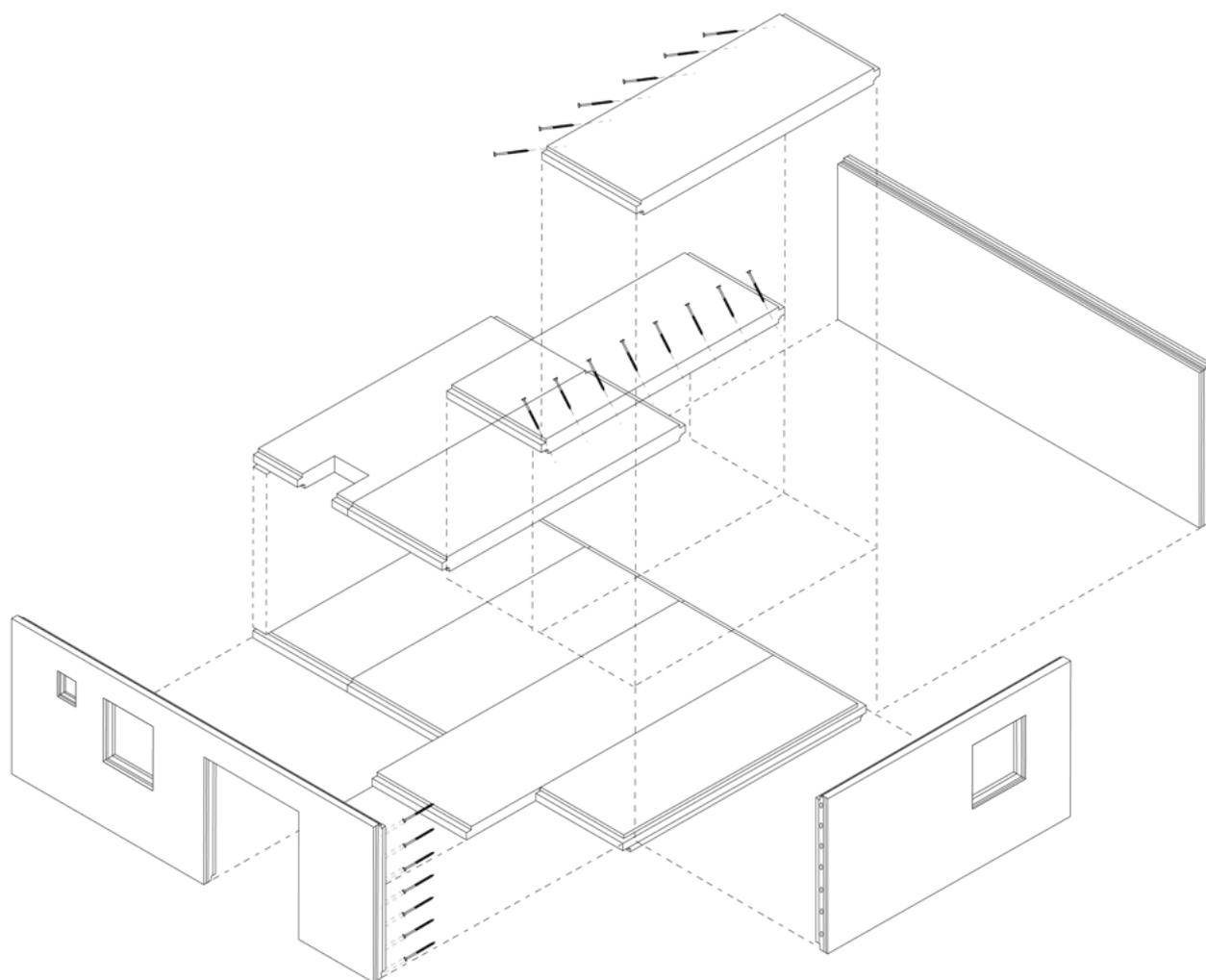


Figura 4.12.
Edifício Woodcube,
Architekturagentur
Stuttgart, 2013,
Alemanha. (Green &
Taggart, 2020)

4.3.3. SISTEMA MÓDULO

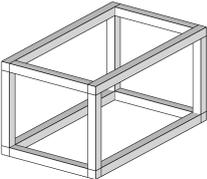
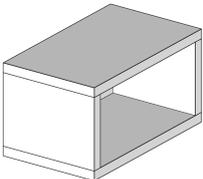
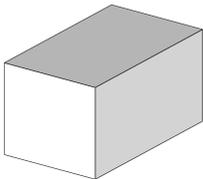
CATEGORIAS	NÍVEL DE PRÉ-FABRICAÇÃO	POTENCIALIDADES	FRAGILIDADES
ESQUELETO 	Média percentagem de pré-fabricação.	As faces são abertas, permitindo variações nos espaços.	Criação de vários módulos diferentes para compor um edifício.
PAINELIZADO 	Alta percentagem de pré-fabricação	Possibilidade de incorporar infraestruturas.	Necessário resolver o conflito entre a repetição de elementos.
MONOLÍTICO 	Máxima percentagem de pré-fabricação	Mais completo e compacto.	Apenas em edifícios de pequenas dimensões.

Tabela 4.3.
Características do sistema Módulo.

4.3.3. Sistema módulo

O sistema módulo define-se pela fabricação, montagem e acabamento em fábrica de edifícios ou partes de edifícios incorporando todos os seus componentes, exigindo apenas as ligações às infraestruturas e fundações, uma vez no estaleiro. A escolha deste sistema exige um planeamento disciplinar e altamente rigoroso. Dentro do sistema modular podemos identificar algumas variações (**tabela 4.3.**) desde:

Esqueleto

Utiliza uma estrutura esbelta, geralmente em aço, deixando a possibilidade de abrir as seis faces do módulo. Este sistema permite a criação de vários espaços e com diferentes características.

Painelizado

Os módulos painelizados podem combinar elementos lineares e painéis, por exemplo, no caso do edifício B2 (**figura 4.1.**), que contém módulos em estrutura de LSF, incorpora um painel em cimento no pavimento e está ligado a uma estrutura de aço que resiste às cargas laterais. Os sistemas modulares para habitações unifamiliares americanas costumam também ser construídas com painéis à base de madeira. Os contentores marítimos também se enquadram nesta categoria, sendo fáceis e rápidos de construir, com uma boa capacidade estrutural, no entanto é necessário o controlo térmico interior do contentor, de modo a criar um ambiente confortável.

Monolítico

Os módulos monolíticos, são módulos completos em fábrica, de dimensões limitadas ao tipo de transporte. São mais propícios em edifícios de pequenas dimensões e até quatro pisos, se empilhados. No entanto, é possível a construção de edifícios altos com módulos completos através de uma megaestrutura ou um núcleo estrutural, que suporta todos os módulos.

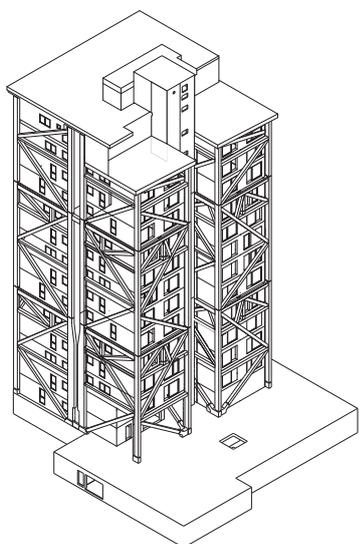
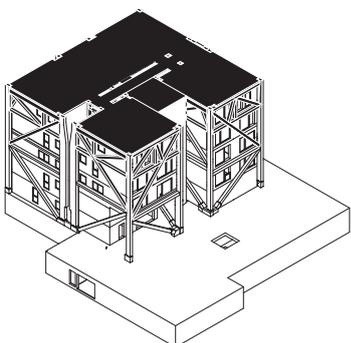
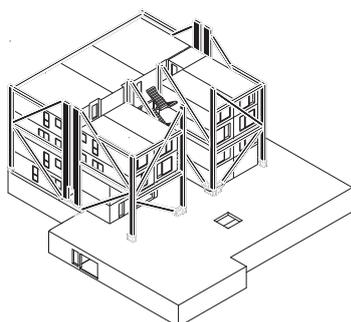
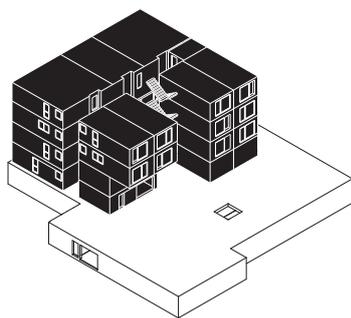
4.3.3. SISTEMA MÓDULO



Figura 4.14.
Treet Apartment Building,
Artec Arkitekter, Bergen,
Noruega, 2015.

Figura 4.15.
Treet Apartment Building
fases de construção.
(Green & Taggart, 2020)

Tret Apartment Building



O projeto Tret Apartment Building, mencionado no *Tall Wood Buildings*, é um bom exemplo no que toca a construção modular, embora contenha alguns elementos híbridos. Esta torre de apartamentos modulares com 49 metros de altura foi desenvolvida com analogia a uma estante com gavetas, em que as laterais e prateleiras da estante são formadas por grandes treliças de madeira laminada e as gavetas são compostas por módulos de habitação pré-fabricados. O edifício é de planta retangular, medindo aproximadamente 21 × 23 metros. Embora contidos nesse retângulo, as caixas de escadas e de elevadores, são em CLT, mas independentes da estrutura principal.

Uma estrutura deste tamanho está sujeita a forças laterais substanciais, logo foram posicionados treliças e elementos de travamento, ligados através de um sistema de placas de aço embutidas e pinos.

Os módulos de apartamentos consistem em dois módulos painelizados, um 'húmido', contendo as áreas da cozinha e wc, e um 'seco', contendo os espaços de estar e dormitórios. Os módulos foram fabricados na Estónia e enviados para a Noruega totalmente equipados com janelas, portas, armários, canalização, carpetes, gesso cartonado e outros acabamentos. A localização do empreendimento à beira-mar de Bergen, tornou a transferência de módulos do navio para o local mais eficiente, tendo estes sido levantados estaleiro através de um guindaste.

A construção começou com a colocação de quatro pisos de módulos de apartamentos sobre a base em betão. Esses módulos carregam seu próprio peso e são afastados da estrutura externa por uma distância de 346 mm para garantir que a estrutura externa não toque nos módulos quando desviada pelas ações do vento. Em seguida, os primeiros perfis de 15 metros das treliças verticais foram ancorados ao betão e conectadas com travamentos diagonais. Foram erguidas as primeiras secções de núcleos de elevadores e escadas em CLT, seguidas pelas treliças laterais. Os módulos do quinto andar foram inseridos e ligados às treliças (em vez de repousar nos módulos abaixo). As lajes de betão pré-fabricado foram posteriormente colocadas no topo das treliças para formar uma base para os próximos quatro andares e o processo foi-se repetindo para os restantes pisos.

4.3.4. SISTEMA HÍBRIDO

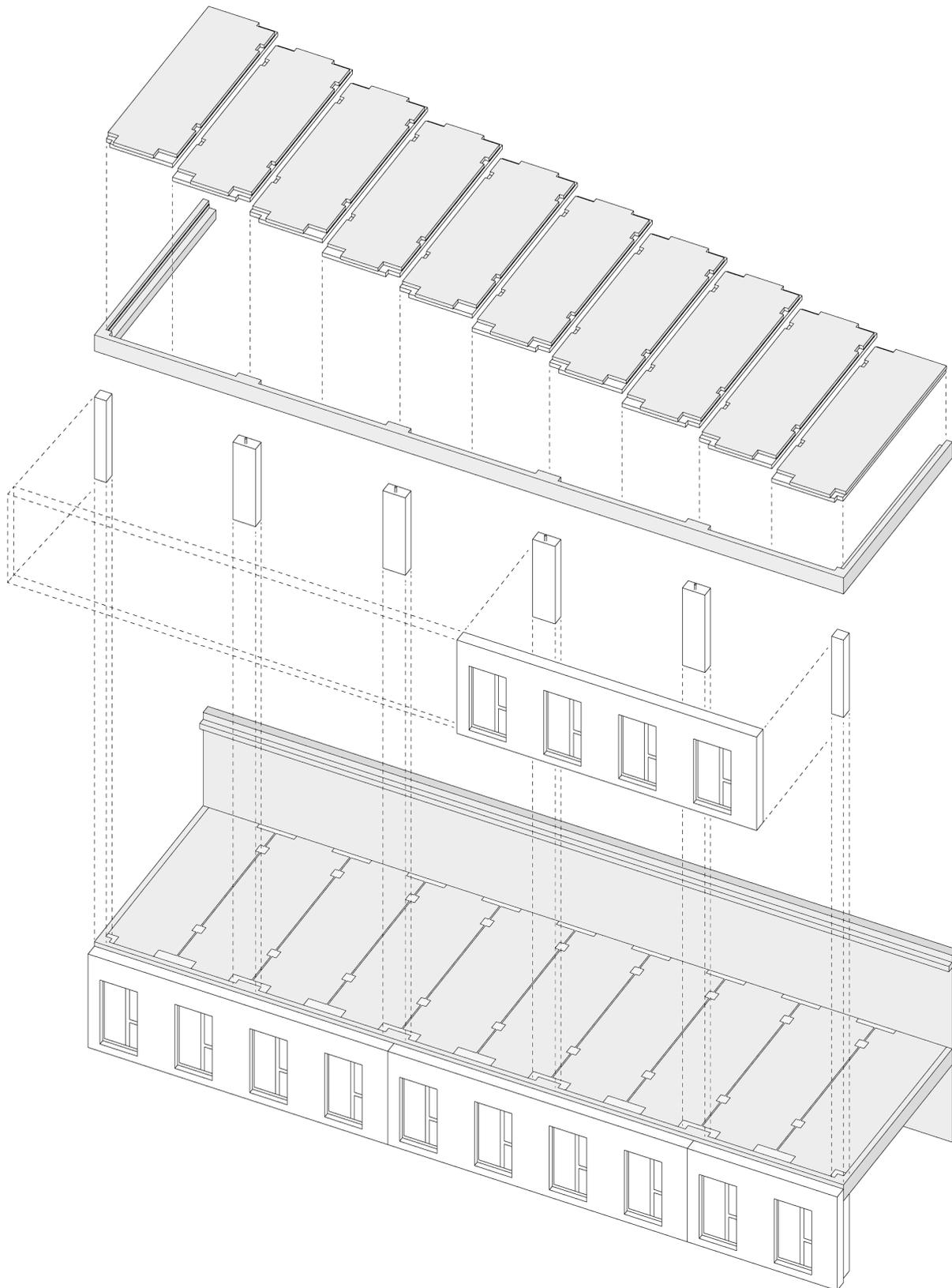


Figura 4.16.
Hoho Wien, RLP Rüdiger
Lainer, 2019.
(Green & Taggart, 2020)

4.3.4. Sistema híbrido

O sistema híbrido é o sistema que combina os sistemas anteriores (linear, painel e módulo), podendo variar dependendo da escolha dos sistemas e do edifício. Geralmente este sistema adota as vantagens dos anteriores, evitando também os seus inconvenientes. A escolha pode ser feita por razões arquitetónicas, estruturais, ambientais ou económicas, ou por causa de práticas de construção locais ou requisitos. Este tipo de sistema pode agregar mais um tipo de solução, o que influencia a sua percentagem de pré-fabricação. Existem edifícios híbridos que utilizam lajes compósitas e combinam elementos lineares. Outros fazem uso de módulos pré-fabricados: desde núcleos de escadas para suporte de painéis até aos módulos monolíticos, juntamente com megaestruturas a suportar os mesmos.

Hoho Wien

O projeto do edifício *Hoho Wien*, em Viena, trata-se de um edifício com 24 andares e 84 metros de altura, destinado a utilização mista. Além dos escritórios, o projeto inclui hotel, ginásio, restaurantes e apartamentos. Para cada andar, o kit de componentes (pilares e vigas madeira laminada colada – *glulam* - lajes compósitas e painéis de parede), foram entregues da fábrica para o local de modo a facilitar a construção. Cada piso foi erguido em aproximadamente uma semana: esta velocidade de construção ajudou a proteger os componentes de madeira contra danos causados pela água. O edifício é constituído por núcleos modulares de betão pré-fabricado que fornecem a resistência lateral, permitindo que as vigas e pilares de *glulam* ao redor permitam uma fachada aberta e flexível. As vigas perimetrais de betão pré-fabricado estendem-se ao redor da estrutura em cada piso, amarrando os pilares e as lajes compósitas, limitando ainda o movimento lateral. Estas vigas são apoiadas nas colunas *glulam*, onde são integrados os painéis de parede não estruturais, já com as janelas, o isolamento térmico e as telas impermeabilizantes instalados em fábrica, permitindo que os elementos da estrutura sejam erguidos no local com uma única ação do guindaste.

4.3.4. SISTEMA HÍBRIDO

O *grout* foi usado para fazer ligação final no local. Os painéis exteriores em CLT não estruturais, sendo necessários apenas para suportar o próprio peso e resistir às forças laterais que atuam diretamente sobre eles. Esta técnica construtiva de lajes compósitas de betão e *glulam* foi estreada em 2012 pela empresa CREE Buildings, no edifício *Life Cycle Tower One*, Áustria (**figura 4.15.**) e aplicada pela primeira vez na Península Ibérica em 2022, no edifício BB Hotel, em Guimarães, Portugal. (**figura 4.16.**)



Figura 4.15.
Edifício LCT One (2012),
Cree Buildings, Áustria.

Figura 4.16.
Edifício Hotel B&B
Guimarães (2022), Grupo
Casais, Portugal.



5. Avaliação do ciclo de vida

Figura 5.1. Torre em demolição no bairro do Aleixo, Porto (Jornal de Notícias, 2019)

Na busca por práticas de construção mais sustentáveis, a Avaliação do Ciclo de Vida – Life Cycle Assessment (LCA) é reconhecida como um método-chave para investigar os potenciais impactes ambientais de materiais, produtos, sistemas ou edifícios inteiros. Ao nível do edifício, a LCA geralmente visa quantificar os impactes ambientais potenciais associados com as várias fases do ciclo de vida de um edifício, ou seja, o fornecimento de matéria-prima, fabricação, construção-instalação, uso do edifício e fim de vida. (Thibodeau, et al. 2019)

5.1. Introdução

De que modo podemos caracterizar um edifício através da sua sustentabilidade? Como podemos saber se um sistema construtivo em madeira é mais sustentável do que um em betão? A Avaliação do Ciclo de Vida – Life Cycle Assessment (LCA) é um método multidisciplinar e complexo, que serve para avaliar os impactos ambientais de produtos, processos, atividades ou até mesmo de edifícios. Através da LCA, os consumos energéticos, as emissões de gases e os fluxos de materiais são identificados e quantificados durante as diferentes fases do ciclo de vida: na fase de produção (*Cradle to Gate*¹), em toda a vida útil (*Cradle-to-Grave*²), ou incluindo o cenário após o fim de vida (*Cradle to Cradle*³).

No contexto construtivo, a LCA tem como objetivo minimizar os impactos ambientais, o consumo de matérias, as emissões de gases de estufa (GHG), o consumo de água e de energia tanto na utilização como na produção e os custos associados à construção. A LCA pode ser uma ferramenta útil para os arquitetos na fase inicial de um projeto, pois ajuda a aferir o funcionamento do ciclo de vida de uma edificação e dos seus componentes, contribuindo para a definição de soluções de projeto que sejam mais sustentáveis para um contexto específico, através da comparação de impactos incorporados e operacionais de diferentes soluções alternativas.

Este tipo de avaliação divide-se em quatro fases: sendo que a primeira aborda a definição do objetivo e âmbito do estudo, mencionando os limites do sistema em análise, a segunda fase faz uma análise do inventário do ciclo de vida (LCI), através da recolha de dados, por exemplo, de Declarações Ambientais de Produtos (EPD). A terceira fase compreende a avaliação e quantificação dos valores e a quarta fase instiga uma interpretação dos resultados dos impactos do ciclo de vida (LCIA), procurando soluções que minimizem esses impactos e melhorem a sustentabilidade das soluções.

¹ *Cradle to Gate*, abrange o ciclo de vida de um produto desde a sua extração até ao portão da fábrica de produção.

² *Cradle to Grave*, abrange o ciclo de vida de um produto desde a sua extração até ao final da sua vida útil.

³ *Cradle to Cradle*, abrange a totalidade do ciclo de vida de um produto, incluindo a sua desmontagem e a sua reciclagem ou reutilização.

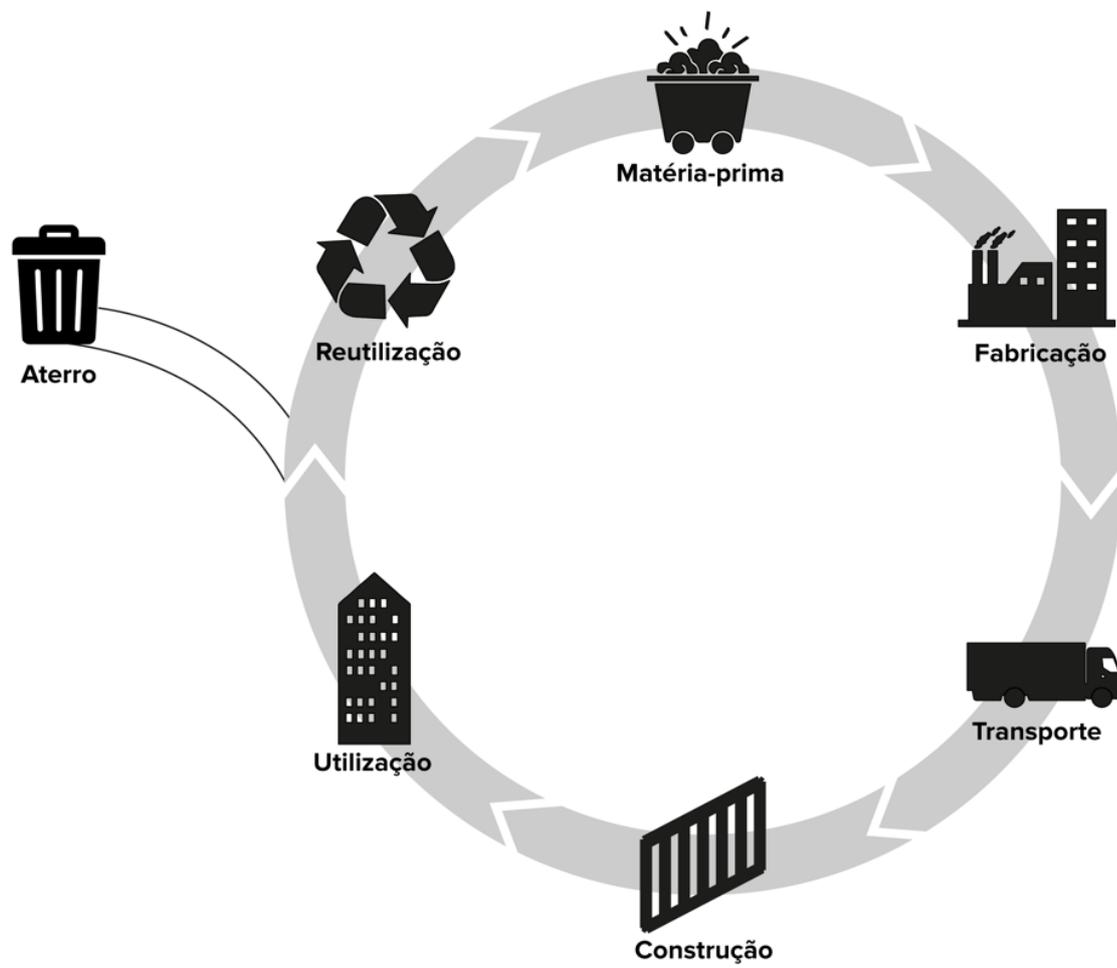


Figura 5.2. Diagrama das diferentes etapas na concepção de edifícios.

Origem

O método LCA foi desenvolvido e é utilizado há dezenas de anos, mas só foi normalizado nos finais dos anos 90, pela Organização Internacional de Normalização (ISO 14040).

De acordo com (Mumovic & Santamouris, 2019), é referido que os primeiros estudos de LCA se focavam no consumo de energia e matéria-prima, bem como na produção de resíduos. As crises do petróleo de 1973 e 1979 ocasionaram mais estudos com foco em questões e análises relacionadas com combustíveis e energia. No final da década de 1980, a produção e eliminação de embalagens com impacto ambiental negativo foi reconhecida como uma questão de grande importância e desde esse momento a importância da reciclagem passou a ser de conhecimento global.

A LCA está orientada para a avaliação de produtos ou materiais, mas a sua aplicação em edifícios é fulcral, de modo a compreender os impactos ambientais associados aos produtos de construção e aos métodos construtivos.

LCA em edifícios

A avaliação do ciclo de vida (LCA) pode ser aplicada a edifícios para avaliar o impacto ambiental dos materiais, da construção e utilização de um edifício ao longo de todo o seu ciclo de vida. Isso pode incluir a avaliação do impacto ambiental dos materiais usados na construção, como a sua energia incorporada, bem como a energia usada para o aquecimento, arrefecimento e iluminação do edifício ao longo da sua vida útil.

Na LCA, o foco pode estar na análise e comparação dos impactos ambientais de diferentes materiais e sistemas de construção, bem como na identificação de oportunidades para melhorar o desempenho ambiental dos edifícios. Contudo, existem várias possibilidades, dependendo do foco do estudo. A LCA pode incidir sobre:

- As emissões de gases de efeito de estufa associadas a materiais de construção;
- O uso de energia e emissões de GHG associadas ao aquecimento, arrefecimento, iluminação e outros sistemas de construção ao longo da vida útil do edifício;

5.1. INTRODUÇÃO

- Quantificação e gestão de resíduos associados ao edifício, incluindo resíduos de construção e eliminação na fase do fim de vida;
- Uso e gestão da água associada ao edifício, na fase de utilização;
- Qualidade ambiental interior e o seu impacto na saúde e bem-estar humano;
- Custo do ciclo de vida (LCC) para analisar os custos associados aos materiais de construção, à construção do edifício e à sua utilização e manutenção utilização ao longo da vida útil.

No geral, a LCA para construção é um campo multidisciplinar que requer conhecimento da ciência da construção, ciência dos materiais, ciência ambiental e metodologias de avaliação do ciclo de vida.

LCA em edifícios pré-fabricados

A elaboração da LCA em edifícios pré-fabricados ainda é algo recente na comunidade científica. No entanto, alguns estudos procuram demonstrar que o uso destes sistemas é mais benéfico, em comparação com sistemas construtivos convencionais. No contexto dos edifícios, os estudos mais comuns são os LCIA, que têm como objetivo a quantificação dos impactos ambientais das construções pré-fabricadas, que demonstram mais vantagens em comparação com os métodos convencionais

De acordo com um levantamento sobre a LCA em edifícios pré-fabricados (Tschunko, 2022), Pons (2014) sugere que, de acordo com o seu estudo comparativo de projetos escolares pré-fabricados na Catalunha, a construção pré-fabricada apresenta resultados mais sustentáveis do que a construção no local. No entanto, o grau de sustentabilidade de um projeto de construção depende da decisão da tecnologia pré-fabricada, mas também por exemplo da distância de transporte entre a fábrica e o estaleiro de construção.

No seu estudo comparativo, Cao et al. (2015) também ilustrou que uma amostra de um edifício pré-fabricado era mais eficiente do que uma habitação convencional. A amostra pré-fabricada teve menos 20% de consumo total de energia, menos 36% de esgotamento de recursos e menos 3% de danos no ecossistema.

Hong et al. (2016) compara o desempenho energético do ciclo de vida dos componentes pré-fabricados. De acordo com o seu estudo, as fases de transporte e construção no local utilizaram uma energia ligeiramente menos incorporada em comparação com as outras fases. Notaram ainda que a poupança de energia na fase de reciclagem de uma construção pré-fabricada pode variar entre 16% e 24%.

5.1. INTRODUÇÃO

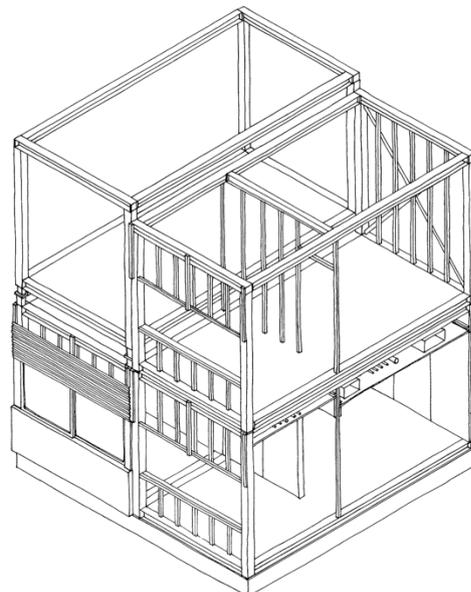
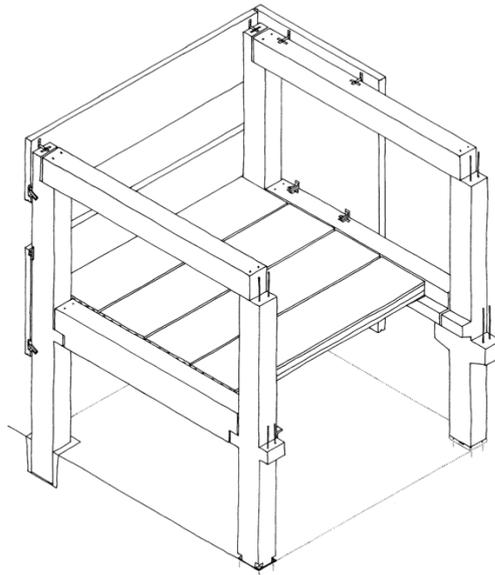
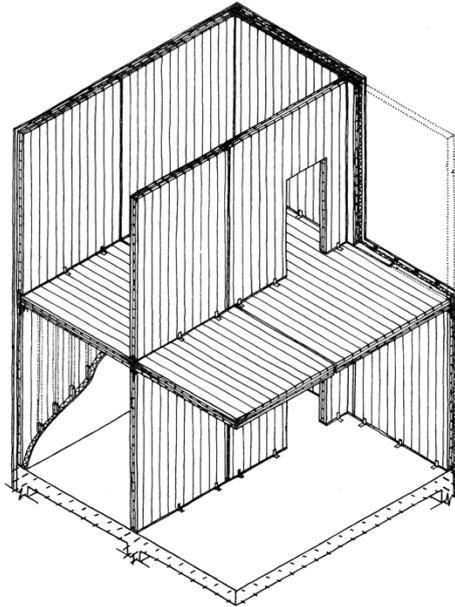


Figura 5.3. Axonometria de três diferentes tipologias pré-fabricadas: sistema com elementos de madeira, sistema com elementos de betão e sistema com elementos de aço, (Pons, 2014).

5.1. INTRODUÇÃO

Da mesma forma, Kamali e Hewage (2016) confirmaram no seu estudo que os métodos de construção modulares tiveram menores impactes ambientais e proporcionaram um melhor desempenho do ciclo de vida do que os métodos convencionais, especialmente no que diz respeito ao fim de vida e às fases de construção. No entanto, também foi observado que a LCA da utilização e as fases de fim de vida em construções fora do local foram maioritariamente negligenciadas.

O artigo da Jin et al. (2018, p. 1217) também sublinhou a necessidade de um sistema de indicadores de desempenho holístico, incluindo indicadores de custos, sociais e ambientais para projetos de construção pré-fabricados. Sublinharam que os desafios para criar um sistema deste tipo são a decisão do âmbito e objetivo do estudo e o acesso a dados precisos.

Honic et al. (2019) criou um passaporte de materiais e comparou um modelo de construção habitacional com duas alternativas de construção. A alternativa com o sistema construtivo de madeira apresentou resultados positivos para o potencial de reciclagem cumulativo e os impactes ambientais.

Noutro estudo, Tavares et al. (2021) analisa o potencial contributo da pré-fabricação para o *stock* de construção da UE e a melhoria dos impactes ambientais e económicos. O trabalho baseou-se numa comparação de dois edifícios energeticamente equivalentes, mas com diferentes sistemas: pré-fabricado e convencional. Finalmente, descobriram que a pré-fabricação pode reduzir significativamente os impactes incorporados e de fim de vida (incorporados 40% e fim de vida 90%). Também salientaram que a emissão de carbono do *stock* de construção da UE poderia ser reduzida em 6% com uma adoção generalizada da pré-fabricação.

Ferdous et al. (2019) também identificou os sistemas modulares como métodos de construção potencialmente sustentáveis. Além disso, sublinharam que os impactes económicos, sociais e ambientais devem ser avaliados em conjunto para a sustentabilidade. No entanto, na sua análise sobre outros estudos demonstrou que as LCA's eram limitadas e que não incluíam o LCC e o SLCA. Foi por esse motivo que salientaram que é necessário dispor de uma LCSA combinada com um LCC e SLCA para ajudar a revelar uma avaliação de sustentabilidade realista dos projetos. Esta pontuação apoiaria igualmente as decisões no sector da construção no que respeita ao cumprimento dos objetivos de sustentabilidade.

5.1. INTRODUÇÃO

Jin et al. (2020) questionaram a falta de revisão sistemática das instalações construídas pré-fabricadas. Identificaram também que a maioria dos estudos existentes se centrava principalmente nas emissões de carbono e no consumo de energia. No entanto, só estes dois indicadores podem não ser suficientes para avaliações realistas. Devem também ser tomados em consideração indicadores como o aquecimento global, o esgotamento do ozono e o consumo de água.

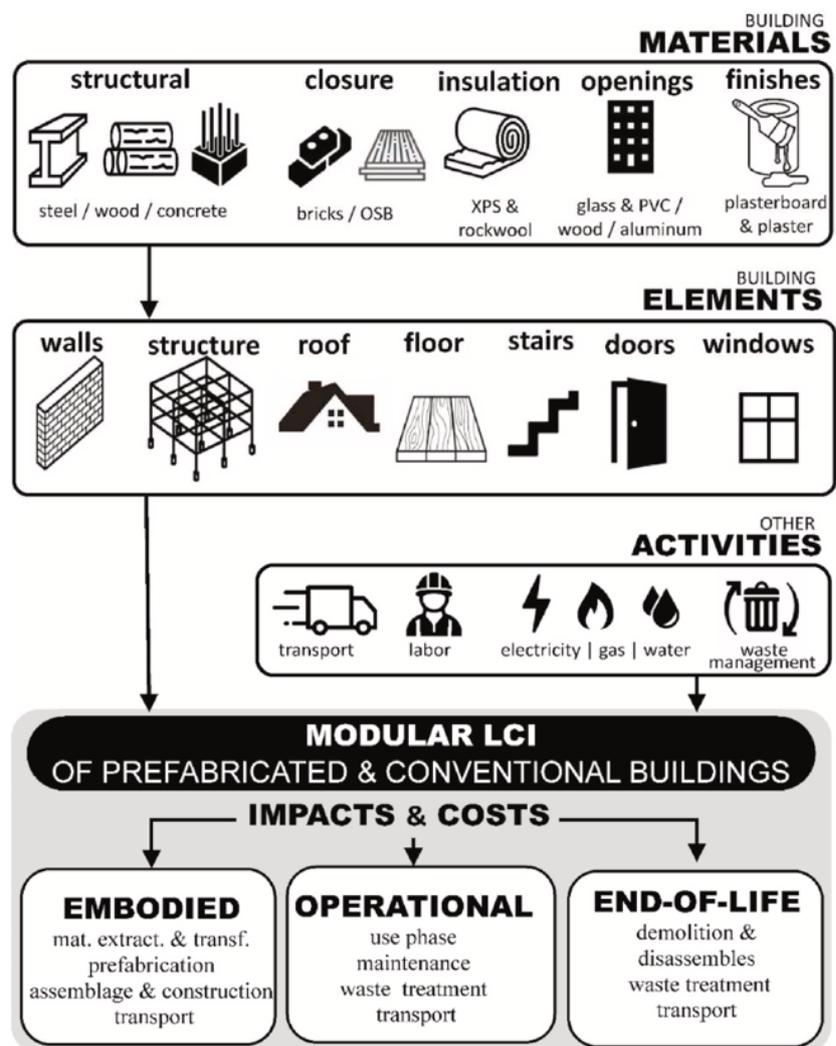


Figura 5.4. Diagrama do Inventário do Ciclo de Vida de edifícios modulares. (Tavares et al. 2021).

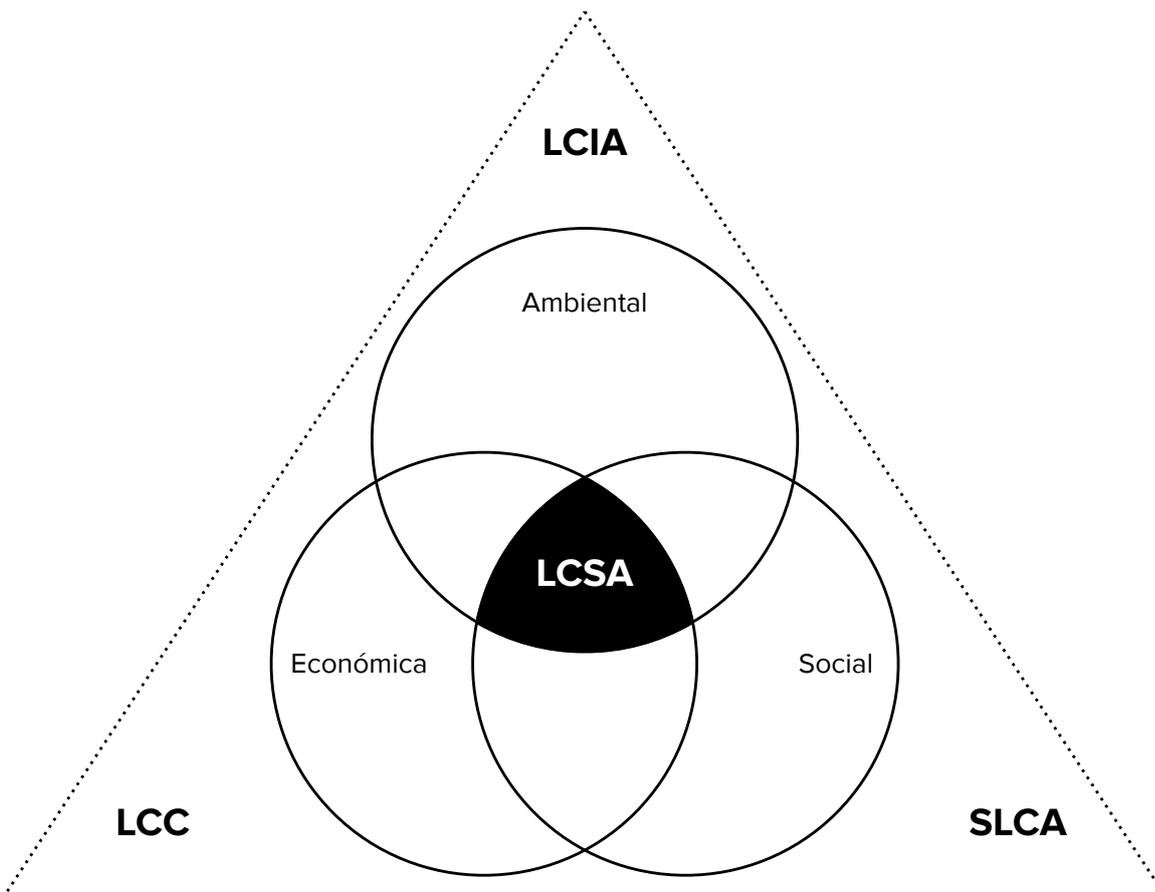


Figura 5.5. Diagrama de distinção entre os diversos tipos de avaliação de ciclo de vida.

5.2. Tipos de LCA

A LCA é bastante complexa e, dependendo do objetivo e do âmbito do estudo em questão, pode focar-se em diferentes parâmetros. O termo LCA não especifica o tipo de estudo elaborado, pelo que existem siglas que derivaram da sigla LCA de modo a especificar o tipo de estudo.

De acordo com Ren & Toniolo (2020), **figura 5.5.**, as três dimensões da sustentabilidade são a base da Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida – Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). Esta incorpora a Avaliação do Custo do Ciclo de Vida – Life Cycle Cost (LCC), a Avaliação Social do Ciclo de Vida – Social Life Cycle Assessment (SLCA) e a Avaliação dos Impactes do Ciclo de Vida – Life Cycle Impact Assessment (LCIA).

LCC

A análise de custo do ciclo de vida (LCC) é uma abordagem usada para avaliar o custo total de construção e utilização de um edifício ao longo da sua vida útil. Inclui custos iniciais (como projeto, construção e equipamento), custos operacionais (como energia, manutenção e reparação) e custos de capital (como depreciação de valor, substituição e reparação).

Para realizar uma análise de custo do ciclo de vida de um edifício, começa-se por definir os objetivos da análise e a vida útil do edifício. Depois disso, identificam-se os custos associados ao projeto de construção e determinam-se os seus valores. Estimam-se os custos futuros do edifício, incluindo custos de combustíveis, serviços públicos e manutenção. Por fim, realiza-se a análise e simulação do custo do ciclo de vida do edifício para determinar a opção mais económica. É importante observar que a análise de custo do ciclo de vida deve ser feita regularmente ao longo da vida útil do edifício para garantir os melhores resultados.

SLCA

A Avaliação Social do Ciclo de Vida (SLCA) é uma metodologia usada para avaliar os potenciais impactes sociais de produtos ao longo do seu ciclo de vida, desde a extração e o processamento de matérias-primas, fabricação, distribuição, uso, reutilização, manutenção, reciclagem e descarte final. A SLCA analisa as entradas e saídas de cada estágio do ciclo de vida por unidade funcional e avalia os impactes sociais e sociológicos desses processos.

Este tipo de avaliação é mais comum nas empresas, sendo que aplicar o SLCA ajuda a entender e avaliar os impactes sociais dos produtos, identificar áreas de melhoria e desenvolver estratégias para mitigar quaisquer impactes negativos.

LCIA

A Avaliação dos Impactes do Ciclo de Vida (LCIA) envolve a avaliação dos impactes ambientais causados por um produto ou processo ao longo do ciclo de vida, através de indicadores ambientais, tais como o potencial de aquecimento global (GWP); o potencial de destruição da camada de ozono (ODP); o potencial de acidificação (AP), o potencial de oxidação fotoquímica (POCP), o potencial de eutrofização (EP), a depleção de recursos abióticos (ADP), entre outros. Para além destes indicadores, a energia não-renovável incorporada (ENR) e o potencial de esgotamento dos recursos energéticos (FFDP) são indicadores que representam também uma preocupação energética.

Para cada indicador é atribuído um valor que representa a magnitude do impacte no meio ambiente. Os valores do indicador são então usados para calcular o impacte ambiental geral do produto ou processo. Novos indicadores estão atualmente a ser desenvolvidos de forma a quantificar o impacte dos produtos na saúde humana e nos ecossistemas.

LCSA

A Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCSA) é um modelo mais exigente, sugerido por Kloepffer (2008) e Guinée (2012), que engloba e faz uma compilação dos estudos anteriormente mencionados: o Custo do Ciclo de Vida (LCC), a Avaliação Social do Ciclo de Vida (SCLA) e a Avaliação dos Impactes do Ciclo de Vida (LCIA).

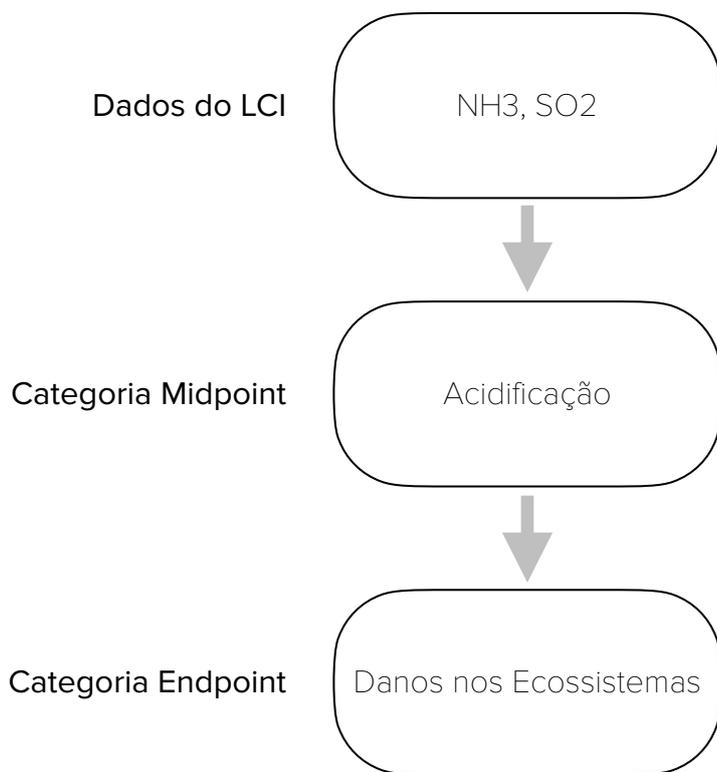


Figura 5.6. Exemplo de categoria *endpoint* e *midpoint*., de acordo com a ISO 14044: 2006.

5.3. Categorias de impacto ambiental

De modo a quantificar os impactos ambientais de uma solução, é necessário escolher quais as categorias de impacto ambiental a considerar. Muitas das vezes essa escolha depende da informação disponível (LCI). De acordo com a ISO 14044:2006, existem dois tipos de categorias que podem ser utilizadas num estudo LCIA: as categorias *endpoint* e *midpoint*. Uma das principais diferenças entre as categorias *endpoint* e *midpoint* na LCIA é o nível de detalhe (**figura 5.6.**). As categorias *endpoint* fornecem uma visão mais agregada do impacto, enquanto as categorias *midpoint* fornecem uma visão mais detalhada. As categorias *endpoint* concentram-se nos resultados finais do ciclo de vida, como por exemplo: mudanças climáticas, esgotamento de recursos e toxicidade humana, enquanto que as categorias *midpoint* concentram-se nas causas subjacentes desses impactos, como emissões de poluentes. As categorias *midpoint* geralmente são mais detalhadas e podem ser mais úteis para entender melhor as emissões que condicionam os impactos ambientais.

Muitos estudos mencionam apenas uma ou duas categorias de impacto ambiental, por exemplo (Pizzol, et al. 2011), que se focou no impacto dos metais na saúde humana (UH) e (Xu, J. et al. 2022), que se focou apenas nas emissões de carbono de um edifício pré-fabricado. Contudo, de forma a tornar um estudo LCIA abrangente, é benéfico agregar aquelas que consideramos importantes para um estudo sobre impactos ambientais. Seguidamente, com base em (Huijbregts, M. et al, 2017). serão listadas algumas das categorias de impacto ambiental mais relevantes.

GWP (Kg CO₂ eq.)

O potencial de aquecimento global (GWP) está entre as categorias de impacto ambiental mais importantes, sendo esta a consequência de uma acumulação a longo prazo de gases de efeito de estufa na camada mais alta da atmosfera: o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o

5.3. CATEGORIAS DE IMPACTE AMBIENTAL

óxido nitroso (N₂O). Embora o CO₂ tenha tido mais atenção e relevância, estudos demonstraram que o CH₄ e o N₂O contribuem muito mais do que o CO₂ para as alterações climáticas. As alterações climáticas podem resultar em efeitos adversos para a saúde humana. Esta categoria é expressa num intervalo de tempo de 100 anos (GWP¹⁰⁰), tendo em conta a escala de tempo que caracteriza a remoção da substância na atmosfera.

ODP (Kg CFC₁₁ eq.)

A medida do potencial de destruição da camada de ozono (ODP) indica o potencial de emissões de clorofluorohidrocarbonetos (CFC) e de hidrocarbonetos clorados (HC) para o esgotamento da camada de ozono.

AP (Kg SO₂ eq.)

A acidificação é causada pela emissão de um conjunto de substâncias, transportados pelo vento e depositadas no solo, que tem um grande impacto na saúde humana. Ocorre quando se encontram elevadas concentrações de Óxidos de Azoto (NO_x), Amónia (NH₃) e Dióxido de Enxofre (SO₂). Estas substâncias estão bastante presentes no setor industrial e no setor dos transportes públicos. Estes ácidos dão origem a chuvas ácidas, que trazem malefícios quer à biodiversidade, quer às construções, pois corroem todo o tipo de materiais.

POCP (kg C₂H₄)

O potencial de oxidação fotoquímica (POCP) é produzido devido à oxidação fotoquímica de gases emitidos por alguns veículos que produzem monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (COV), presentes também em tintas e vernizes. Quando a luz solar atinge os COV, formam-se partículas aerotransportadas e ozono ao nível do solo, (smog), sendo que as concentrações de ozono são mais elevadas no verão, a sua natureza tóxica pode afetar diretamente a saúde humana, causando irritação ocular, irritação pulmonar e perturbação dos ecossistemas

EP (Kg (PO₄)³⁻ eq.)

A medida do potencial de eutrofização (EP) é definida como o potencial dos nutrientes para causar a sobrefertilização da água e do solo, o que pode resultar num aumento do crescimento da biomassa. Quando um nutriente anteriormente escasso ou limitativo é adicionado a um corpo

5.3. CATEGORIAS DE IMPACTE AMBIENTAL

de água, leva à proliferação de vida vegetal aquática fotossintética. Isto pode conduzir a uma cadeia de outras consequências que vão desde odores sujos até à morte de peixes. As emissões de produtos químicos como NO_x, NH₄, N, PO₄, P e COD são os principais contribuintes para a eutrofização.

ADP (Kg Sb eq.)

A depleção abiótica (ADP) é o processo de diminuição dos recursos naturais disponíveis, como água, solo, minerais e combustíveis fósseis, resultando em menos recursos disponíveis para uso futuro, podendo resultar conseqüentemente na perda de biodiversidade. Além disso, a depleção de recursos abióticos também contribui para o aquecimento global, pois pode levar ao uso de combustíveis fósseis e outras fontes de energia que libertam gases de efeito de estufa (GHG) na atmosfera.

ER (Mj)

A energia renovável incorporada (ER) não demonstra um impacto ambiental negativo, mas sim um manifesto na utilização de fontes de energia renovável em detrimento de fontes não renováveis. É portanto, um indicador que infere boas práticas ambientais.

ENR (Mj)

A energia não-renovável incorporada (ENR) é um indicador que exprime a quantidade de energia não renovável associada às diferentes fases de ciclo de vida de um produto, contribuindo também para o esgotamento dos recursos energéticos não-renováveis.

FFDP (Mj)

O potencial de esgotamento dos recursos energéticos (FFDP) refere-se à possibilidade de uma fonte de energia esgotar-se ao longo do tempo. Os recursos energéticos não renováveis, como o petróleo, o carvão e o gás natural, são exemplos de fontes que possuem um potencial de esgotamento. Estes recursos são finitos e, portanto, esgotam-se ao longo do tempo, à medida que são utilizados para produzir energia. É importante notar que o potencial de esgotamento dos recursos energéticos também depende da taxa de consumo. Quanto maior a taxa de consumo, mais rápido serão esgotados esses recursos. Alternativamente, ao investir em fontes de energia renováveis, como a energia eólica e a solar, é possível reduzir o risco de esgotamento dos recursos energéticos.

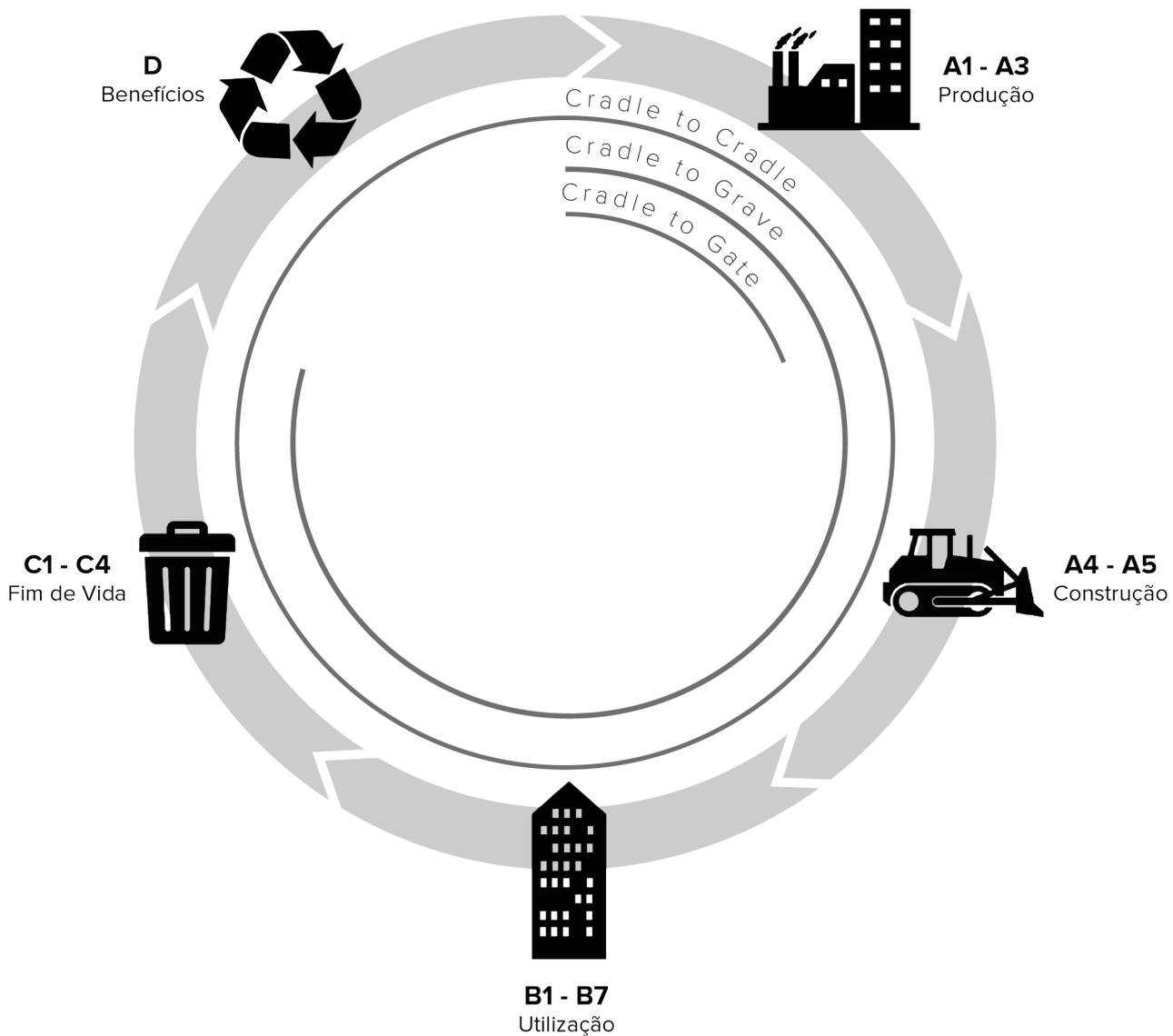


Figura 5.7. Diagrama das diferentes fases do ciclo de vida.

5.4. Fases do ciclo de vida

Antes de abordar a LCA, é importante identificar e distinguir as diferentes fases do ciclo de vida dos edifícios. Segundo a EN 15804:2012 — Sustentabilidade dos trabalhos de construção — Declarações ambientais de produtos — Regras básicas para a categoria de produtos de construção, o ciclo de vida de um edifício é composto por quatro fases: a fase de produção dos materiais, a fase de conceção e construção do edifício, a fase de uso, podendo ser designada também como fase de utilização e a fase de fim de vida. Para além destes, existe um módulo suplementar: *benefícios e cargas para além do sistema*, que engloba o potencial de reabilitação, reuso ou reciclagem. Em todas as fases do ciclo de vida de um edifício, são utilizados materiais e energia, como por exemplo: na extração e transformação de matérias-primas, fabrico de produtos e componentes, transporte de produtos e componentes e na energia utilizada para aquecimento, arrefecimento e iluminação do edifício. A escolha destes módulos é opcional, pelo que dependerá dos objetivos do estudo. A **figura 5.7.** ilustra os diferentes módulos do ciclo de vida dos edifícios, juntamente com os parâmetros associados.

Fase de produção

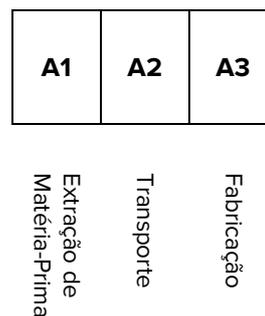
Na primeira fase, consideram-se os recursos primários: neste caso as matérias-primas e de que forma é que estes recursos são colhidos/extraídos. Depois, na conversão destes em materiais processados e produtos de fabrico utilizáveis para a construção.

As fases **A1-A3** tratam o processamento do material desde a extração da matéria prima, incluindo o transporte, fabrico e transformação, até ao momento em que o produto sai da fábrica de produção.

A1 “Extração de matérias-primas” refere-se a, por exemplo, processos mineiros, produção e transformação de biomassa, operações agrícolas ou florestais; reutilização de produtos ou materiais de um sistema de produtos anteriores; processamento de materiais secundários utilizados como entrada para o fabrico do produto; geração de eletricidade, vapor e calor provenientes dos recursos energéticos primários, incluindo também a sua extração, refinação e transporte; a recuperação de energia e outros processos de recuperação de combustíveis secundários, mas sem incluir os processos que fazem parte do processamento de resíduos no sistema de produtos anteriores.

A2 “Transporte” até ao portão da fábrica e transportes internos.

A3 “Fabrico” de materiais auxiliares ou pré-produtos, fabrico de produtos e coprodutos e fabrico de embalagens.



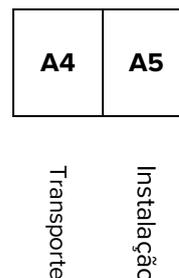
Fase de construção

A fase do processo de construção inclui os módulos de informação opcionais para:

A4-A5 Armazenamento de produtos, incluindo o fornecimento de aquecimento, arrefecimento e controlo de humidade; o desperdício de produtos de construção (processos de produção adicionais para compensar a perda de desperdício de produtos) e o processamento de resíduos provenientes de embalagens de produtos e de desperdício de produtos durante os processos de construção até ao estado de fim dos resíduos ou à eliminação de resíduos finais.

A4 “Transporte” do portão de produção para o estaleiro de construção.

A5 “Instalação” do produto no edifício, incluindo fabrico e transporte de materiais auxiliares e qualquer energia ou água necessária para a instalação ou exploração do estaleiro. Inclui também operações no local para o produto.



Fase de utilização da construção

B1	B2	B3
Uso	Manutenção	Reparação

A fase de utilização inclui os módulos de informação opcionais que cobrem o período desde a entrega do edifício ou obras de construção até quando este é desconstruído ou demolido. A duração da fase de utilização dos produtos pode ser diferente da duração útil exigida de um edifício. A fase de utilização inclui a utilização de produtos de construção, equipamentos e serviços no seu devido funcionamento. Inclui também a sua utilização para proteger, conservar, moderar ou controlar um edifício, por exemplo: módulos que descrevem a utilização do edifício através de serviços relacionados com a construção, tais como aquecimento, arrefecimento, iluminação, abastecimento de água e transporte interno (fornecido por elevadores e escadas rolantes). Inclui também a manutenção (incluindo limpeza), reparação, substituição e remodelação.

B1 "utilização do produto instalado" abrange aspetos ambientais e impactes decorrentes de componentes do edifício e obras de construção durante a sua utilização normal, por exemplo: a libertação de substâncias da fachada, telhado, revestimento do pavimento e outras superfícies (interiores ou exteriores) ao ar interior, solo ou água.

B2 "manutenção", abrange a combinação de todas as ações administrativas planeadas e associadas durante a vida útil para manter o produto instalado num edifício, numa obra ou nas suas partes, num estado em que possa realizar o seu desempenho funcional e técnico exigido, bem como preservar as qualidades estéticas do produto. Isto incluirá atividades de manutenção preventiva e regulares, tais como: limpeza, manutenção, substituição ou reparação de peças gastas, danificadas ou degradadas. O uso de água e energia necessárias para a limpeza, como parte da manutenção devem ser incluídos neste módulo, assim como a produção e o transporte de qualquer componente e produtos auxiliares utilizados para a manutenção, incluindo a limpeza, o transporte de quaisquer resíduos dos processos de manutenção, os processos de fim de vida de quaisquer resíduos provenientes do transporte e do processo de manutenção, incluindo qualquer parte do componente e materiais auxiliares removidos.

B3 "reparação" – consiste na combinação de todas as ações administrativas e técnicas associadas ao tratamento corretivo, responsivo ou reativo de um produto de construção ou das suas peças instaladas no edifício, durante a vida útil, ou a obras de reparação, que restabeleçam as condições funcionais e técnicas exigidas. Abrange também a preservação das qualidades estéticas dos produtos. A

5.4. FASES DO CICLO DE VIDA

substituição de um componente ou peça partido devido a danos deve ser atribuída à "reparação", enquanto que a substituição de todo um elemento devido a danos deve ser atribuído ao módulo "substituição".

B4 substituição - O módulo "substituição" abrange a combinação de todas as ações administrativas técnicas durante a vida útil associadas à devolução de um produto de construção a uma condição em que possa realizar o seu desempenho funcional ou técnico exigido, através da substituição de um elemento de construção na sua totalidade.

A substituição de um componente ou peça partido devido a danos deve ser incluída como "reparação", mas a substituição de todo um elemento de construção devido a danos deve ser considerado como "substituição". A substituição de vários elementos de construção no âmbito de um programa de substituição concertado do edifício deve ser considerado como "remodelação".

B5 remodelação - abrange a combinação de todas as ações técnicas e administrativas durante a vida útil de um produto associado à devolução de um edifício, componente ou material a uma condição na qual este possa desempenhar as suas funções adequadamente. Essas atividades abrangem um programa de manutenção, reparo e/ou substituição, numa parte significativa ou em toda a secção do edifício. As atividades de restauro devem ser incluídas na remodelação.

B4	B5
-----------	-----------

Substituição

Renovação

Fase de utilização operacional

O limite do módulo "Utilização de energia para operar sistemas técnicos integrados de construção") deve incluir a utilização de energia durante o funcionamento do produto, juntamente com os aspetos ambientais associados e os seus impactes, incluindo a transformação e o transporte de quaisquer resíduos resultantes da utilização de energia no local.

B6 "Consumo de Energia" (por exemplo: o funcionamento do sistema de aquecimento e outros serviços instalados relacionados com o edifício), incluindo sistemas técnicos de construção para aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação, água quente doméstica e outros sistemas de saneamento, segurança contra incêndios, transporte interno e automação de edifícios e comunicações informáticas.

B7 "Consumo de Água"; O limite do módulo deve incluir a utilização da água durante o funcionamento do edifício, bem como os seus aspetos ambientais associados e os seus impactes tendo em conta o ciclo de vida da água, incluindo a produção, o transporte e o tratamento das águas residuais.

B6	B7
-----------	-----------

Consumo de Energia

Consumo de Água

Fase de fim de vida

C1	C3	C4
-----------	-----------	-----------

Reconstrução /
Demolição

Processamento de
Resíduos

Descarte

A fase de fim de vida de um produto de construção inicia-se quando este é substituído, desmontado ou desconstruído a partir do edifício e não fornece qualquer outra funcionalidade. Também pode começar no fim de vida do edifício, dependendo da escolha do cenário de fim de vida do produto. Durante a fase de fim de vida do produto ou do edifício, todas as saídas provenientes da desmontagem, desconstrução ou demolição do edifício, desde processos de manutenção, reparação, substituição ou remodelação, todos os resíduos, todos os produtos de construção, materiais ou elementos de construção, que saem do edifício, são inicialmente considerados resíduos.

C1 “desconstrução”, incluindo a desmontagem ou demolição do produto a partir do edifício, incluindo a triagem inicial dos materiais no local.

C2 “transporte” do produto descartado como parte da transformação de resíduos, para um local de reciclagem e transporte de resíduos, para a eliminação final.

C3 “processamento de resíduos”, por exemplo, recolha de frações de resíduos provenientes da desconstrução e processamento de resíduos de fluxos materiais destinados à reutilização, reciclagem e valorização energética.

C4 “eliminação de resíduos”, incluindo o pré-tratamento físico e a gestão do local de eliminação.

Benefícios

D

Benefícios

O módulo D inclui as potencialidades de reutilização, recuperação e/ou reciclagem, expressas em impactes líquidos e benefícios. Este módulo visa a transparência para os benefícios ambientais ou cargas resultantes de produtos reutilizáveis, materiais recicláveis e/ou transportadores energéticos úteis que abandonam um sistema de produtos, por exemplo, como materiais secundários ou combustíveis.

ISO 14040:2006	Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e enquadramento.
ISO 14041:1998	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Definição de objetivos e âmbito e análise de inventário.
ISO 14042:2000	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Avaliação do impacto do ciclo de vida.
ISO 14043:2000	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Interpretação do ciclo de vida.
ISO 14044:2006	Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações.
EN 15978:2011	Sustentabilidade das construções — Avaliação do desempenho ambiental dos edifícios — Método de cálculo.
DIN EN 15941:2022	Sustentabilidade das obras - Qualidade de dados para avaliação ambiental de produtos e obras - Seleção e utilização de dados.
CEN/TR 15941:2010	Sustentabilidade das Obras – Declaração de Produtos Ambientais - Metodologia de seleção e utilização de dados genéricos.
EN 15804:2012	Sustentabilidade das construções — Declarações ambientais de produtos.
EN 15643-1:2010	Sustentabilidade das obras - Avaliação da sustentabilidade dos edifícios - Parte 1: Enquadramento geral.
prEN 15643-2:2009	Sustentabilidade das Obras de Construção - Avaliação de Edifícios - Parte 4: Quadro para a avaliação do desempenho ambiental.
prEN 15643-3:2008	Sustentabilidade das Obras de Construção - Avaliação de Edifícios - Parte 4: Quadro para a avaliação do desempenho social.
prEN 15643-4:2008	Sustentabilidade das Obras de Construção - Avaliação de Edifícios - Parte 4: Quadro para a avaliação do desempenho económico.
DIN EN 16760:2015	Produtos de base biológica - Avaliação do Ciclo de Vida.
ISO 21929-1:2011	Sustentabilidade na construção de edifícios — Indicadores de sustentabilidade — Parte 1: Quadro para o desenvolvimento de indicadores e um conjunto central de indicadores para edifícios.

Tabela 5.2. Normas Europeias e Internacionais relacionadas com a Avaliação do Ciclo de Vida e a Sustentabilidade das Construções.

5.5. Normalização

A Organização Internacional de Normalização (ISO) lançou a série de normas ISO 14040 sobre LCA, como suplemento e expansão da série de normas ISO 14000 sobre Gestão Ambiental. A nova versão da série ISO 14040 foi lançada desde então (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). De acordo com (Mummovic, 2009), embora as normas da série ISO 14040 sejam bastante semelhantes com o guia da *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), estas substituíram as diretrizes da SETAC devido à posição dominante da ISO no desenvolvimento de normas internacionais. Embora as primeiras normas tenham estado mais voltadas para produtos e processos, foram-se desenvolvendo ao longo do tempo normas destinadas à avaliação do ciclo de vida dos edifícios (séries 15nnn), aprofundando-se, em paralelo, os conceitos de sustentabilidade nas construções.

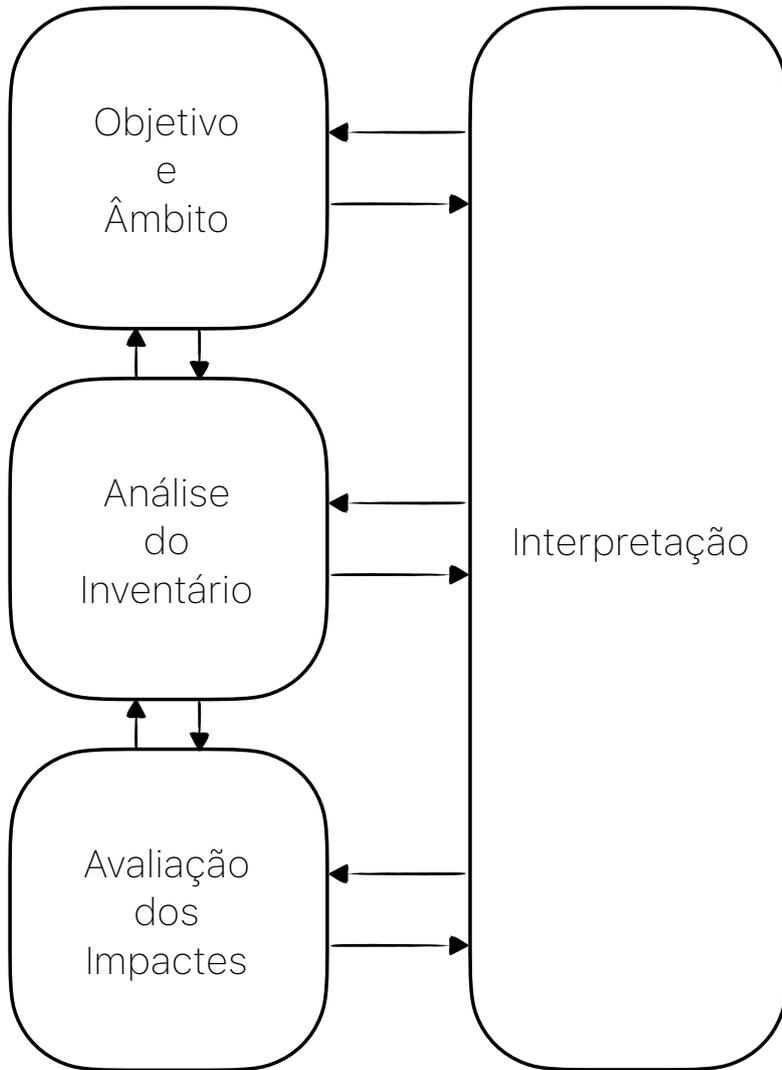


Figura 5.8. Fases da LCIA, segundo a EN 14040, 2006.

5.6. Fases da LCIA

A LCIA contém passos que deverão ser cumpridos, segundo a norma EN 14040 (**figura 5.8.**). Estes passos passam por:

1. Definição do âmbito e limites do estudo. Isso inclui determinar a unidade funcional do edifício, que é a unidade de análise, e identificar as etapas do ciclo de vida a serem incluídas na avaliação.
2. Reunir os dados sobre os materiais (LCI), sistemas e uso de energia associados ao edifício. Esses dados são usados para estimar os impactos ambientais do edifício ao longo do seu ciclo de vida.
3. Usar um software LCA ou folhas de cálculo para inferir a avaliação. O uso de ferramentas de LCA ajudam a organizar e analisar os dados, de modo a gerar os resultados.
4. Interpretar os resultados da LCA. Isso inclui a identificação dos impactos ambientais significativos do edifício, comparando sempre com um sistema base (de preferência convencional), e com sistemas semelhantes, como termos de comparação para oportunidades de melhoria.

Objetivo e âmbito

De acordo com *A Handbook of Sustainable Building Design and Engineering* (2019), a primeira fase da LCA é responsável pela definição do objetivo e âmbito do estudo. Isto inclui a determinação dos limites da abrangência e das fases do ciclo de vida. Além disso, nesta fase, são especificados os resultados prosseguidos e a metodologia de realização, revisão e comunicação do estudo. Os dados e informações necessários para a realização das fases seguintes são igualmente identificados e localizados de modo a serem compatíveis com as aspirações gerais do estudo. A LCA também requer, especialmente para fins comparativos, a definição de uma base de referência comum chamada unidade funcional ou base de comparação. A unidade funcional refere-se a uma ou mais das funções do sistema a avaliar e à duração da sua utilização. Outra questão que surge nesta fase é a identificação das hipóteses e limitações que devem ser tidas em conta durante a realização do estudo. No caso dos edifícios, são necessários vários pressupostos ou estimativas:

- a sua vida útil, bem como o tempo de vida útil dos seus componentes constituintes que determinam o número de reparações e substituições;
- os seus cenários de utilização e manutenção;
- os seus principais cenários de remodelação ou renovação;
- a sua adaptação à mudança de expectativas, utilizadores e tecnologias (muitos edifícios são desocupados ou demolidos muito antes da sua vida útil devido à falta de adaptabilidade);
- os cenários de demolição e reciclagem (isto é, os cenários de fim de vida que dividem os fluxos de resíduos enviados para aterros, incineração ou valorização).

Todos estes pressupostos e estimativas podem afetar significativamente os resultados da LCA, pelo que é importante definir nesta fase o objetivo do estudo.

Inventário do ciclo de vida

De acordo com (Guinée, F. et al., 2002), a segunda fase LCA (análise do inventário – LCI) é talvez a mais exigente. Diz respeito a todas as atividades/processos envolvidos no sistema em estudo e inclui a utilização direta e/ou indireta de energia e/ou massa. A análise do inventário é a fase em que o sistema em estudo deve ser especificado

5.6. FASES DA LCIA

em pormenor. Isto inclui o refinamento das fronteiras do sistema (isto é, a definição das suas fronteiras precisas em relação ao ambiente natural e outros sistemas); o desenvolvimento de um modelo de construção, incluindo todos os processos e subprocessos que serão considerados; e a recolha, quantificação, registo e validação de todos os dados relevantes com base no modelo de construção desenvolvido.

Declaração ambiental de produtos

Quantificar os processos e subprocessos de um material construtivo é um trabalho complexo e exigente, pelo que, existem já programas e ferramentas que incorporam estes fluxos de dados em vários países (bases de dados LCI). No entanto, estes dados tendem a ser generalizados.

Para uma abordagem rigorosa, estes dados são geralmente facultados através de documentos, denominados Declarações Ambientais de Produto (EPD, ou DAP no contexto português), representado na **figura 5.9**. Existem vários tipos de EPD's que cobrem diferentes fases de ciclo de vida de um produto:

- A EPD cradle-to-gate (A1-A3), envolve apenas os impactes ambientais do processo de fabrico e a colheita de um material, tendo a quantidade mínima de dados para a avaliação do ciclo de vida.
- A EPD cradle-to-grave (A1-C4) inclui os impactes de todo o ciclo de vida de um produto, especificamente cobrindo a sua manutenção e o fim da vida útil.
- A EPD cradle-to-cradle (A1-D) inclui os impactes de todo o ciclo de vida de um produto e inclui os benefícios adjacentes á reciclagem e reuso do material.

A norma EN 15804:2012 visa caracterizar as diferentes fases do ciclo de vida dos edifícios, fornecendo regras fundamentais da categoria de produtos para todos os produtos e serviços de construção. Fornece uma estrutura que garanta que todas as Declarações Ambientais de Produto (EPD) de produtos de construção, serviços de construção e processos de construção sejam derivadas, verificadas e apresentadas de forma harmonizada, facilitando posteriormente a avaliação do ciclo de vida dos edifícios.

Em Portugal, existem ainda poucas DAP, pelo que a aplicação da LCA nos edifícios é ainda precoce e por vezes utiliza softwares com dados de outros contextos, por sua vez resultando numa avaliação

5.6. FASES DA LCIA

menos rigorosa. Por exemplo, para calcular os impactes ambientais de um painel de aglomerado de cortiça, numa abrangência *cradle-to-gate*, é necessário consultar os valores dos impactes ambientais de uma DAP (caso o material seja local), de modo a extrair os valores associados à extração, produção e transporte deste material no contexto português. Em adição, deverá ser também contabilizada a localização do empreendimento, através dos impactes provocados pelo consumo de combustível associado. Uma EPD, identifica os valores dos impactes ambientais de um determinado material, bem como a fronteira de abrangência (*cradle to gate*, *cradle to cradle*, etc.). A **figura 5.9.** representa uma EPD de um painel da empresa Viroc, e a respetiva quantificação dos impactes associados a 1m³ de material.



2.2. Parâmetros que descrevem os potenciais impactes ambientais

		Aquecimento global kg CO ₂ equiv.	Depleção da camada do ozono kg CFC 11 equiv.	Acidificação kg SO ₂ equiv.	Eutrofização kg (PO ₄) ³⁻ equiv.	Oxidação fotoquímica kg C ₂ H ₄ equiv.	Depleção de recursos abióticos (elementos) kg Sb equiv.	Depleção de recursos abióticos (fósseis) MJ, P.C.I.
Extração e processamento matérias-primas	A1–A3	8,80E+02	6,47E-05	2,28E+00	2,76E-01	1,09E-01	3,47E-05	7,19E+03
Transporte								
Produção								

LEGENDA:
 Etapa de Produto

NOTAS: P.C.I. – Poder calorífico inferior.
 Valores expressos por unidade declarada (1 m³ de painel Viroc®)

2.3. Parâmetros que descrevem a utilização de recursos

		EPR MJ, P.C.I.	RR MJ, P.C.I.	TRR MJ, P.C.I.	EPNR MJ, P.C.I.	RNR MJ, P.C.I.	TRNR MJ, P.C.I.	MS kg	CSR MJ, P.C.I.	CSNR MJ, P.C.I.	Água doce m ³
Extração e processamento de matérias-primas	A1–A3	1,01E+03	0	1,01E+03	8,21E+03	0	8,21E+03	0	0	0	5,84E+00
Transporte											
Produção											

LEGENDA:
 Etapa de Produto

EPR = utilização de energia primária renovável excluindo os recursos de energia primária renováveis utilizados como matérias-primas; RR = utilização dos recursos de energia primária renováveis utilizados como matérias-primas; TRR = utilização total dos recursos de energia primária renováveis (EPR + RR); EPNR = utilização de energia primária não renovável, excluindo os recursos de energia primária não renováveis utilizados como matérias-primas; RNR = utilização dos recursos de energia primária não renováveis utilizados como matérias-primas; TRNR = Utilização total dos recursos de energia primária não renováveis (EPNR + RNR); MS = utilização de material secundário; CSR = utilização de combustíveis secundários renováveis; CSNR = utilização de combustíveis secundários não renováveis; Água doce = utilização do valor líquido de água doce.

NOTAS: Valores expressos por unidade declarada (1 m³ de painel Viroc®)

Figura 5.9. Declaração Ambiental de um produto Viroc: dados sobre potenciais impactes ambientais do produto por 1m³ de painel. (Daphabitat)

Avaliação dos impactes

A terceira fase da LCA visa avaliar os impactes ambientais do sistema em estudo com base nos resultados do inventário em relação ao objetivo e âmbito do estudo. Para o efeito, os resultados do inventário são ainda processados no que diz respeito aos impactes ambientais e às preferências sociais pré-estabelecidas (Guinée et al, 2001).

A avaliação dos impactes é um processo quantitativo e/ou qualitativo que é utilizado para caracterizar e interpretar as consequências negativas dos impactes ambientais identificados durante a fase de inventário. Seguem-se cinco etapas para a avaliação dos impactes: classificação, caracterização, normalização, agrupamento e ponderação (Guinée et al, 2001; ISO 14040, 2006; Goedkoop e Oele, 2007). Os últimos três passos são opcionais, mas são frequentemente seguidos, uma vez que os seus resultados facilitam a interpretação dos resultados de toda a análise durante a quarta fase da LCA.

Durante a classificação, as categorias de impacte são refinadas e finalizadas, tendo em conta o grau de pormenor necessário especificado durante a primeira fase de LCA. Os dados de inventário são então atribuídos às categorias de impacte definidas. Durante este processo, é possível que alguns dados sejam atribuídos a mais de uma categoria de impacte.

Não existe nenhuma norma que defina as categorias de impacte e a sua classificação, isso significa que para avaliar de um modo mais minucioso os impactes ambientais devemos de selecionar o máximo de indicadores relevantes para o contexto e os objetivos do estudo. A norma ISO 14044 (2006b) menciona que “A seleção das categorias de impacte (...) deve ser coerente com o objetivo e o âmbito do estudo da LCA;” e “As fontes das categorias de impacte (...) deverão ser referenciadas;”.

Interpretação

A Interpretação dos resultados do Ciclo de Vida é a fase em que os resultados da análise e todas as escolhas e suposições feitas durante o curso da análise são avaliados em termos de solidez e robustez, acompanhando-se das conclusões que são tiradas do estudo. Os principais elementos da fase de Interpretação são uma avaliação dos resultados, uma análise comparativa dos mesmos e a formulação das recomendações do estudo.

	Método	País	Link
Genéricas	Sima Pro	Países Baixos	simapro.com
	Gabi	Alemanha	gabi-software.com
	Open LCA	Alemanha	openlca.org
	EIO-LCA	E.U.A.	ifu.com/umberto/oekobilanz-software
	Umberto	Alemanha	eiolca.net
Folhas de Cálculo	Envest	Reino Unido	clarityenv.com.au/envest
	Ökobilanz Bau	Alemanha	oekobilanz-bau.de
	SBS Building Sustainability	Alemanha	gabi3.com
	eTOOL	Austrália	etoolglobal.com
	Athena Impact Estimator	Canadá	athenasmi.org
	Legep	Alemanha	legep.de
	Elodie	França	logiciels.cstb.fr
	LCAbyg*	Dinamarca	lcabyg.dk
Catálogo de Componentes	IDEMAT	Países Baixos	http://idematapp.com
	Eco2soft	Áustria	baubook.info/eco2soft
	BEES	E.U.A.	ws680.nist.gov/Bees2
	Bauteilkatalog	Suíça	bauteilkatalog.ch
	eLCA	Alemanha	bauteileditor.de
Compatível com CAD	Impact	Reino Unido	bregroup.com/impact
	Cocon-BIM	França	cocon-bim.com
	Lesosai	Suíça	lesosai.com
	Tally	E.U.A.	choosetally.com
	CAALA	Alemanha	caala.de
	One Click LCA Formerly 360optimi	Finlândia	oneclicklca.com
	EVE-BIM Elodie	France	logiciels.cstb.fr
	Pleiades	France	izuba.fr/logiciels
	GENERIS	Germany	generis.live

Tabela 5.2. Lista de softwares de LCA.

5.7. Ferramentas de LCA

Segundo (Buyle, M. et al. 2013), os primeiros estudos de LCA no setor da construção utilizavam o método *CML 1992*. Atualmente existem diversos softwares disponíveis para a realização de uma avaliação do ciclo de vida (LCA) em edifícios. Tendo como base o levantamento de (Tschunko, 2022), a **tabela 5.2.**, enumera alguns softwares utilizados para a elaboração de estudos LCA, com a distinção entre ferramentas genéricas, folhas de cálculo, catálogos de componentes e softwares compatíveis com Desenho Assistido por Computador (CAD). Enumeram-se algumas das ferramentas mais utilizadas:

SimaPro, desenvolvido pela *PRé Sustentabilidade*, este software é amplamente utilizado para a realização da LCA e cumpre com as normas ISO 14040 e ISO 14044. Permite a modelagem de sistemas complexos e possui uma ampla base de dados de categorias de impacto pré-definidas no inventário.

GaBi, desenvolvido pela *PE International*, este software também é amplamente utilizado para conduzir LCAs e está em conformidade com os padrões internacionais ISO 14040 e ISO 14044. *GaBi* é particularmente adequado para a indústria de construção e possui uma grande base de dados de categorias de impacto definidas e dados de inventário de ciclo de vida (LCI).

IDEMAT, de acordo com o website, a *IDEMAT* é uma aplicação desenvolvida pela Universidade Técnica de Delt e apresenta quantitativamente a percentagem de impactes, como a pegada carbónica ou os custos de reciclagem de materiais.

TALLY, de acordo com Tschunko (2022), é um *plug-in revit*⁴ para avaliações LCA integradas com *Building Information Modeling* (BIM). Este plug-in utiliza uma base de dados personalizada que se baseia na Base de Dados *GaBi* para as avaliações. De acordo com a sua página

⁴ *Revit* é um software de Modelagem da Informação e Construção - *Building Information Modeling* (BIM).

5.7. FERRAMENTAS DE LCA

web (Tally, 2020), é possível avaliar os impactos *Cradle to Grave* com o *plug-in*. Dá a opção de incluir outros módulos quando necessário, como a construção e a energia operacional para uma avaliação completa do edifício, embora nenhuma opção LCC esteja incluída.

CAALA, de acordo com a respetiva empresa, é o primeiro *plug-in* para um design de edifício holístico. Oferece uma otimização de edifícios ecológicos e económicos na fase inicial do projeto. O CAALA inclui os Módulos A1-3, B3, B6, C3 e C4 para avaliação. O módulo D também pode ser incluído separadamente. A ferramenta utiliza o procedimento simplificado da DGNB como base para os cálculos. Além da DGNB, estes cálculos poderiam ser utilizados para os sistemas de certificação BNB e BNK (CAALA, 2020).

Atualmente, o software pode ser integrado no *Sketchup* e no *Rhino*⁵ como um *plug-in*. Para a utilização de *Revit* e *Archicad*⁶, é necessário utilizar a ferramenta web da empresa. A ferramenta utiliza a base de dados *ÖKOBAUDAT* e, quando necessário, faculta a importação das EPDs, que não estão incluídas na base de dados (CAALA, 2020).

Estes são apenas alguns exemplos das ferramentas de software disponíveis para a realização de uma LCA em edifícios. É importante selecionar uma ferramenta de software adequada às necessidades específicas do projeto e que esteja em conformidade com as normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044.

⁵ *Sketchup e Rhino* são softwares de conceção tridimensional (3D).

⁶ *Archicad* é um software de Modelagem da Informação e Construção - *Building Information Modeling* (BIM).

6. Conclusão

Tendo em consideração a necessidade de reverter as consequências das alterações climáticas e a perda de biodiversidade no nosso planeta, bem como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pelas Nações Unidas, para 2030, a implementação de métodos circulares na arquitetura e construção é deveras importante para o alcance destas metas. No contexto da construção em Portugal, a pré-fabricação é um método preterido, pelo que o destino final dos elementos construtivos da maioria dos edifícios é direcionado para o aterro. Contudo, a construção pré-fabricada tem sido vista como um potencial método circular, dada a sua capacidade de montagem e desmontagem simplificados.

Esta dissertação agrega e relaciona o estado de conhecimento de temas que caracterizam metodologias de projeto circulares. A análise cronológica e revisão de literatura relativa a sistemas construtivos pré-fabricados contemporâneos constituiu-se com o conhecimento base para a procura de mais soluções e conceitos formais e tecnológicos adotados, sustentando a definição de soluções bem informadas no contexto de arquitetura contemporânea. A categorização dos sistemas pré-fabricados e a sua avaliação qualitativa foi também um ponto importante na distinção das vantagens e desvantagens adjacentes ao uso de cada um dos sistemas.

A Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) é uma ferramenta de projeto útil, desde as primeiras fases de desenvolvimento do projeto, pois ajuda a inferir o funcionamento do ciclo de vida de um edifício e dos seus componentes, contribuindo para a definição de soluções de projeto que sejam mais sustentáveis. Avaliar o ciclo de vida de um edifício é um processo complexo e demorado, pelo que a definição prévia do seu objetivo e âmbito é uma condição fulcral para uma avaliação.

Embora a LCA nos edifícios já seja abordada desde a década 1970, existem ainda algumas fragilidades nos métodos existentes. O principal motivo é o facto de os estudos LCA abordarem diferentes objetivos, inferidos sobre diferentes fases do ciclo de vida, dando lugar a

resultados fragmentados. Em paralelo, de modo a avaliar os impactes ambientais de um edifício é necessário ter acesso a dados do Inventário do Ciclo de Vida (LCI) locais, com as Declarações Ambientais de Produto (EPD) dos materiais de construção que serão utilizados. Nos edifícios pré-fabricados a LCA é ainda recente e não existem ainda LCI que façam a distinção entre materiais pré-fabricados e materiais aplicados no estaleiro.

A análise LCA poderá tornar-se complexa e exaustiva, quanto maior a abrangência e a quantidade de componentes a analisar. É importante definir em cada estudo um objetivo específico, recolhendo os dados necessários, de modo a este ter resultados mais rigorosos e assertivos, tornando-o num estudo viável. Na avaliação do ciclo de vida de sistemas pré-fabricados, é relevante quantificar os impactes ambientais dos materiais e dos métodos construtivos das soluções numa perspetiva *cradle to cradle*, consolidando também a sua capacidade de desmontagem (a fase do ciclo de vida D).

Os resultados de uma análise LCA dependem também da proximidade das indústrias ao local do estaleiro, isto porque as emissões provocadas pelo transporte das diferentes fases deverão também ser quantificadas. Por isso, os impactes ambientais do ciclo de vida das construções com sistemas pré-fabricados dependem muito da localização do local de fabricação dos componentes, para além da localização original das matérias primas, que estão na fase de extração.

Através da investigação sobre estudos que abordam a LCA nos edifícios pré-fabricados, é possível verificar que a integração de sistemas pré-fabricados na construção dos edifícios não só traz menos impactes ambientais, como também aumenta a rapidez e rigor da construção, garantindo uma melhor qualidade no ambiente construído. Pode-se concluir que a integração da pré-fabricação na arquitetura desde a estrutura até à fachada, é uma boa prática alternativa aos sistemas construtivos comumente adotados.

Futuros Desenvolvimentos

Atualmente a procura de soluções arquitetónicas com carácter circular para novas construções tem sido explorada. No entanto, a adaptação de métodos circulares na reabilitação de edifícios é uma possibilidade que visa a reconfiguração e a adaptação do ambiente construído, atendendo aos requisitos contemporâneos funcionais e sustentáveis, permitindo alargar a vida útil do ambiente construído.

No contexto Português existe ainda pouca informação relativamente à abordagem da LCA em edifícios, pelo que este trabalho teve como objetivo a criação de linhas orientadoras na aplicação da LCA em edifícios pré-fabricados. Embora exista ainda a falta de informações ambientais específicas sobre os produtos das indústrias de materiais portuguesas (EPD), é possível utilizar ferramentas informáticas que incorporem dados de outros contextos, de forma a criar uma aproximação a resultados viáveis.

A criação de DAP's para componentes e elementos pré-fabricados facilitará a criação de uma análise LCA, garantindo a viabilidade nos resultados do estudo. A abrangência dos valores de LCI, numa perspetiva *cradle-to-grave* garante resultados que se focam no ciclo de vida dos edifícios.

A elaboração de um modelo de análise que incorpora a junção dos três conceitos de sustentabilidade, Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCSA) em edifícios pré-fabricados abordando todos os conceitos incorporados neste trabalho, desde a Avaliação do Custo do Ciclo de Vida – Life Cycle Cost (LCC), a Avaliação Social do Ciclo de Vida – Social Life Cycle Assessment (SLCA) e a Avaliação dos Impactes do Ciclo de Vida – Life Cycle Impact Assessment (LCIA).

7. Bibliografia

Acar-Tschunko, S. (2022). *Analysis of integrated LCA tools in BIM platforms for prefabricated timber construction*. Fakultät für Architektur und Raumplanung. Technische Universität Wien.

Assche, P. van. (2019). *Architecture & Circular Thinking*. In M. Berkers (Ed.), *Amsterdam Academy of Architecture* (pp. 1–48). Amsterdam Academy of Architecture.

Bragança, L., & Mateus, R. (2011). *Avaliação do ciclo de vida dos edifícios: Impacte ambiental de soluções construtivas*. 1ª Edição. (Policopiado).

Brand, S. (1995). *How Buildings Learn: What Happens After They're Built*. Penguin Books. New York.

Brophy, Vivienne., & Lewis, J. Owen. (2011). *A Green Vitruvius: Principles And Practice Of Sustainable Architectural Design*. Earthscan. London.

Cao, X., Li, X., Zhu, Y., & Zhang, Z. (2015). *A Comparative Study Of Environmental Performance Between Prefabricated And Traditional Residential Buildings In China*. *Journal of Cleaner Production*, 109, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.120>

Carvalho, J. P., Alecrim, I., Bragança, L., & Mateus, R. (2020). *Integrating BIM-Based LCA And Building Sustainability Assessment*. *Sustainability* (Switzerland), 12(18). <https://doi.org/10.3390/SU12187468>

Charles Thibodeau, Alain Bataille, & Marion Sié. (2019). *Building Rehabilitation Life Cycle Assessment Methodology—State Of The Art*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 103, 2019, P. 408–422, ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.037>.

Cozzi, L., Gould, T., & et. al. (2022). *World Energy Outlook*. International Energy Agency.

Crowther, P. (2009). *Designing for Disassembly*. In P. Newton, K. Hampson, & R. Drogemuller (Eds.), *Technology, design and process innovation in the built environment* (pp. 224–237). Abingdon: Taylor & Francis.

Crowther, P. (2018). *Re-Valuing Construction Materials and Components Through Design for Disassembly*. *Unmaking Waste in Production and Consumption: Towards the Circular Economy*, Emerald Publishing Limited, Bingley, pp. 309–321. <https://doi.org/10.1108/978-1-78714-619-820181024>.

- Devenes J., Bastien-Masse M., Küpfer C., Fivet C. (2022). *Zurich – Stadtpital Triemli Personenhäuser – Resource Assessment Of Structural Elements*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Fribourg. DOI: 10.5281/zenodo.6020923
- Duan, Z., Huang, Q., & Zhang, Q. (2022). *Life Cycle Assessment Of Mass Timber Construction: A Review*. In *Building and Environment* (Vol. 221). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109320>
- El khouli, S., & et al. (2015). *Sustainable Construction Techniques. From Structural Design To Interior Fit-Out: Assessing And Improving The Environmental Impact Of Buildings*. Detail Green Books. Munich.
- EN 15804:2012 - *Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*.
- Feng, H., & et al. (2022). *Uncertainties In Whole-Building Life Cycle Assessment: A Systematic Review*. *Journal of Building Engineering*, 50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104191>
- Field, W. (1942). *A Reexamination Into The Invention Of The Balloon Frame*. *The Journal of the American Society of Architectural Historians*, 2, 3–29. <https://doi.org/10.2307/901212>
- Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T. D., Manalo, A., & Mendis, P. (2019). *New Advancements, Challenges And Opportunities Of Multi- Storey Modular Buildings – A State-Of-The-Art Review*. *Engineering Structures*, 183, 883–893. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.061>
- Gloag, J., & Bridgwater, D. (2023). *A History of Cast Iron In Architecture*. Routledge.
- Green, M., & Taggart, J. (2020). *Tall Wood Buildings: Design, Construction And Performance*. (2nd edition). Birkhäuser.
- Guinée, J. B., & et al. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Volume 7. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Heeren, N., & et al. (2015). *Environmental Impact of Buildings—What Matters?*. *Environmental Science & Technology*, 49, 9832–9841. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01735>
- Heisel, F., Hebel, D. E., & Webster, K. (2022). *Circular Construction and Circular Economy*. Birkhäuser.
- Herbert, G., & Wachsmann, K., (1984). *The Dream of the Factory-Made House: Walter Gropius and Konrad Wachsmann*. MIT Press. Cambridge.
- Herbert, G. (1972). *The Portable Colonial Cottage*. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 31, 261–275. URL: <http://www.jstor.org/stable/988810>.
- Huijbregts, M. A. J., & et al. (2017). *Recipe 2016 V1.1: A Harmonized Life Cycle Impact Assessment Method At Midpoint And Endpoint Level*. *Int. Journal of Life Cycle Assessment*. Springer. 22, 138–147. DOI 10.1007/s11367-016-1246-y.

International Energy Agency. (2022). *Global Co2 Emissions. Data and Statistics*.

ISO 14040:2006. *Environmental management —Life cycle assessment — Principles and framework*

ISO 14044:2006. *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*

Jin, R., Gao, S., Cheshmehzangi, A., & Aboagye-Nimo, E. (2018). *A Holistic Review Of Off-Site Construction Literature Published Between 2008 And 2018*. Journal of Cleaner Production, 202, 1202–1219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.195>

Jin, R., Hong, J., & Zuo, J. (2020). *Environmental Performance Of Off-Site Constructed Facilities: A Critical Review*. Energy and Buildings, 207, 109567. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109567>

Jingzheng, R. & Toniolo, S. (2020). *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making: Methodologies and Case Studies*. Elsevier.

Kamali, M., & Hewage, K. (2016). *Life Cycle Performance Of Modular Buildings: A Critical Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 1171–1183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031>

Kamali, M., Hewage, K., & Sadiq, R. (2019). *Conventional Versus Modular Construction Methods: A Comparative Cradle-To-Gate LCA For Residential Buildings*. Energy and Buildings, 204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109479>

Klöpffer, W., (2008). *Life Cycle Sustainability Assessment Of Products*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 13(2), 89. <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>

Klöpffer, W., & Curran, M., A. (2015). *LCA Compendium: The Complete World of Life Cycle Assessment*. Springer.

Knaack, U., Chung-Klatte, S., & Hasselbach, R. (2012). *Prefabricated Systems: Principles of Construction*. Birkhäuser.

Lamb, W., F. & et. al. (2022). *The Closing Window: Emissions Gap Report*.

Lima, F. (2021). *Estatísticas do Ambiente*. Instituto Nacional de Estatística (INE). Lisboa.

M. Pizzol, P. Christensen, J. Schmidt, M. Thomsen (2011). *Impacts Of “Metals” On Human Health: A Comparison Between Nine Different Methodologies For Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*. Journal of Cleaner Production. V. 19. P. 646-656, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.05.007>.

McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle To Cradle: Remaking The Way We Make Things*. North Point Press. Canada.

Meadows, D., & et. al. (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books.

- Meadows, D. H., Randers, J., & Meadows, D. (2004). *Limits to Growth: the 30 year update*. Chelsea Green Publishing Company.
- Merrild, H., Guldager Jensen, K., & Sommer, J. (2016). *Building a Circular Future*. (1 ed.) GXN.
<http://issuu.com/3xnarchitects/docs/buildingacircularfuture/283?e=5740644/35968611>.
- Moradibistouni, M., Vale, B., & Isaacs, N. (2019). *Evaluating Sustainability Of Prefabrication Methods In Comparison With Traditional Methods*. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 131, 228–237.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-04293-6_23.
- Mumovic, D., Santamouris, M., & et al. (2009). *A Handbook of Sustainable Building Design and Engineering: An Integrated Approach To Energy, Health And Operational Performance*. Earthscan.
- Omrany, H., Soebarto, V., Zuo, J., & Chang, R. (2021). *A Comprehensive Framework For Standardising System Boundary Definition In Life Cycle Energy Assessments*. *Buildings*, 11(6).
<https://doi.org/10.3390/buildings11060230>.
- Pons, O. (2014). *Assessing The Sustainability Of Prefabricated Buildings*. In *Eco-efficient Construction and Building Materials* (pp. 434–456). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.3.434>.
- ReCiPE, 2008. *A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonized Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level*. Lieden University Press.
www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf.
- Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge. Oxon.
- Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A Guide To Modular Design And Construction*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.
- Staib, D., & Rosenthal. (2008). *Components and Systems: Modular Construction*. Birkhäuser.
- Steinle, A., Bachmann, H., & Tillmann, M. (2019). *Precast Concrete Structures*. Ernst & Sohn. Berlin.
- Tavares, V., Soares, N., Raposo, N., Marques, P., & Freire, F. (2021). *Prefabricated Versus Conventional Construction: Comparing Life-Cycle Impacts Of Alternative Structural Materials*. *Journal of Building Engineering*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102705>.
- Tavares, V., Gregory, J., Kirchain, R., & Freire, F. (2021). *What Is The Potential For Prefabricated Buildings To Decrease Costs And Contribute To Meeting EU Environmental Targets?* *Building and Environment*, 206, 108382.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108382>.
- Tighnavard Balasbaneh, A., Sher, W., Yeoh, D., & Koushfar, K. (2022). *LCA & LCC Analysis Of Hybrid Glued Laminated Timber–Concrete Composite Floor Slab System*. *Journal of Building Engineering*, 49.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104005>.

Union Internationale des Architectes (UIA). (1993). *Declaration of Interdependence for a Sustainable Future*. UIA/AIA World Congress of Architects, 18–21 June 1993, Chicago.

United Nations Environment Programme (2022). *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate Crisis Calls For Rapid Transformation Of Societies*. Nairobi.

United Nations Environment Programme (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi.

V.G. Larsen, & et al. (2022). *What Are The Challenges In Assessing Circular Economy For The Built Environment? A Literature Review On Integrating LCA, LCC And S-LCA In Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA*. Journal of Building Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104203>.

Van Stijn, A., Malabi Eberhardt, L. C., Wouterszoon Jansen, B., & Meijer, A. (2021). *A Circular Economy Life Cycle Assessment (CE-LCA) Model For Building Components*. Resources, Conservation and Recycling, 174, 105683. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105683>.

Circle Economy. (2021). *The Circularity Gap Report 2021* (pp. 1-64, Rep.). Amsterdam. Circle Economy.

Circle Economy. (2022). *The Circularity Gap Report 2022* (pp. 1-64, Rep.). Amsterdam. Circle Economy.

Wang, H., Zhang, Y., Gao, W., & Kuroki, S. (2020). *Life Cycle Environmental And Cost Performance Of Prefabricated Buildings*. Sustainability (Switzerland), 12(7). <https://doi.org/10.3390/su12072609>.

Webgrafia

Agência Internacional de Energia (IEA) – Dados estatísticos. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics> (acedido em dezembro 2022).

Análise do Custo de Ciclo de Vida (LCC)
<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/life-cycle-cost> (acedido em janeiro de 2023).

Análise Social de Ciclo de Vida (SLCA)
<https://www.unep.org/resources/report/guidelines-social-life-cycle-assessment-products> (acedido em janeiro de 2023).

Análise do Custo de Ciclo de Vida (LCIA)
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/life-cycle-impact-assessment> (acedido em janeiro de 2023).

Building a Circular Future. Disponível em: <https://adk.elsevierpure.com/en/publications/building-a-circular-future>. (acedido em outubro de 2022).

CAALA. Software LCA. Disponível em: <http://caala.de/> (acedido em janeiro de 2023).

Concentração de CO₂ na atmosfera e temperatura da Antártida (2009). Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/antarctic-temperature-change-and-atmospheric-carbon-dioxide-concentration-co2-over-the-past-800-000-years> (acedido em dezembro de 2022).

Cree Buildings, Áustria. Disponível em: <https://www.creebuildings.com/> (acedido em setembro de 2022).

Declaração de Chicago: União Internacional dos Arquitetos (1996). Disponível em: https://www.uia-architectes.org/wp-content/uploads/2022/01/DeclarationChicagoJuin1993_english.pdf (acedido em setembro de 2022).

Declarações Ambientais de Produtos. Disponível em: <https://daphabitat.pt> (acedido em outubro de 2022).

Demolição da torre do Aleixo, Jornal de Notícias, (2019) Disponível em: <https://www.jn.pt/local/noticias/porto/porto/das-tres-torres-do-aleixo-ja-so-restam-uma-e-meia--11123761.html> (acedido em novembro de 2022).

Edifício B2, Shop Architects (2016). Disponível em: <https://www.shoparc.com/projects/b2/> (acedido em setembro de 2022).

IDEMAT. Delft University of Technology. Disponível em: ecocostsvalue.com/data/idemat-and-idematlightlca/ (acedido em janeiro de 2023).

Ikea Suécia: Modelo de Economia Circular. Disponível em: <https://about.ikea.com/en/newsroom/2021/12/20/ikea-test-secondhand-store-format> (acedido em janeiro de 2023).

Incêndio em Ourém (2022). Disponível em: <https://www.reuters.com/world/europe/iberian-peninsula-swelters-heatwave-wildfire-risk-grows-2022-07-12/> (acedido em setembro de 2022).

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) 2005. (2005) http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/evol_tipol.html (acedido em setembro de 2022).

Tally FAQ. (2020). Tally FAQ. Disponível em: <http://choosetally.com/faq/> (acedido em janeiro de 2023).