

Universidades Lusíada

Silva, Helena Isabel Sobral

Arquitetura e descarbonização : o contributo da construção modular pré-fabricada em Mass Timber para a ecologia do habitar

<http://hdl.handle.net/11067/8459>

Metadados

Data de Publicação

2025

Resumo

Face ao aumento das emissões de gases com efeito de estufa, é necessário repensar a forma como se constroem os edifícios, sobretudo os habitacionais. A descarbonização do setor não se limita a promover a eficiência e a autossuficiência energéticas, mas implica também a mudança dos sistemas construtivos tradicionais, como o betão armado, a alvenaria e o aço. A análise do ciclo de vida dos edifícios, numa perspetiva “cradle to gate”, revela que a extração de matérias-primas, a transformação e o tr...

In view of the increase in greenhouse gas emissions, it is necessary to rethink the way buildings are constructed, especially residential buildings. Decarbonizing the sector is not limited to promoting energy efficiency and self-sufficiency, but also involves changing traditional construction systems, such as reinforced concrete, masonry and steel. Analysis of the life cycle of buildings, from a “cradle to gate” perspective, reveals that the extraction of raw materials, transformation and transp...

Palavras Chave

Habitação, Descarbonização, Construção Modular

Tipo

masterThesis

Revisão de Pares

no

Coleções

[ULF-FAA] Dissertações

Esta página foi gerada automaticamente em 2026-10-29T23:03:09Z com informação proveniente do Repositório



Orientador: Professor Doutor Rogério Amoêa

ARQUITETURA E DESCARBONIZAÇÃO:
O CONTRIBUTO DA CONSTRUÇÃO MODULAR PRÉ-FABRICADA EM MASS TIMBER PARA A ECOLOGIA DO HABITAR

ARQUITETURA E DESCARBONIZAÇÃO
O CONTRIBUTO DA CONSTRUÇÃO MODULAR PRÉ-FABRICADA EM
MASS TIMBER PARA A ECOLOGIA DO HABITAR

Helena Isabel Sobral Silva



Dissertação para obtenção do grau de mestre em Arquitectura
pela Universidade Lusíada de Vila Nova de Famalicão

FAA - Faculdade de Arquitectura e Artes

Junho de 2025

2024
2025



UNIVERSIDADE LUSÍADA

(Vila Nova de Famalicão)

ARQUITETURA E DESCARBONIZAÇÃO

**O CONTRIBUTO DA CONSTRUÇÃO MODULAR PRÉ-FABRICADA EM
MASS TIMBER PARA A ECOLOGIA DO HABITAR**

Helena Isabel Sobral Silva

Orientador: Professor Doutor Rogério Amoêda

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura

Vila Nova de Famalicão, 2025

AVISO LEGAL

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

Declaração sob compromisso de honra

(Artigo 6.º, n.º 2 das Normas e orientações para a submissão de trabalhos académicos na plataforma Urkund para deteção de similaridade e plágio)

Eu, abaixo assinado, tenho consciência de que a prática de plágio consiste numa forma de violação da integridade académica, constituindo um crime punível por lei com relevância nos regimes disciplinar, civil e criminal.

Nesse sentido, declaro por minha honra que a dissertação apresentada é original e que todas as fontes, incluindo as da minha autoria, estão devidamente identificadas e referenciadas.

Vila Nova de Famalicão, 27 de Junho de 2025

O (A) Estudante

Helena Isabel Sobral Silva

Agradecimentos

Expresso o meu sincero agradecimento a todos os que de alguma forma contribuíram para que esta dissertação se concretizasse.

Em particular, gostaria de agradecer aos professores da Universidade Lusíada de Vila Nova de Famalicão, especialmente ao Professor Doutor Rogério Amoêda, pela orientação, apoio, dedicação e partilha de conhecimentos preciosos que foram fundamentais para esta investigação.

Não posso deixar de mencionar o meu profundo reconhecimento à minha família e amigos, em especial aos meus pais, que tornaram possível este percurso académico, através do seu amor e compreensão.

O meu muito obrigado a todos.

Índice

Índice de Figuras	XII
Índice de Tabelas	XVI
Acrónimos	XVIII
Resumo	XIX
Palavras-chave	XX
Abstract	XXI
Key-words	XXII
Introdução	1
1. A mitigação do carbono na construção	5
1.1. Alterações climáticas	7
1.2. Pegada carbónica na construção	8
1.2.1. Aço	11
1.2.2. Betão	12
1.2.3. Madeiras transformadas	13
1.2.4. Comparação	15
1.3. Sequestro do carbono	16
2. <i>Mass Timber</i>	19
2.1. O conceito de <i>Mass Timber</i>	21
2.2. Componentes estruturais	23
2.2.1. Cross Laminated Timber	23
2.2.2. Glued Laminated Timber	24
2.2.3. Laminated Veneer Lumber	26
2.2.4. Nail Laminated Timber	27
2.2.5. Dowel Laminated Timber	28
2.3. Ligações no sistema <i>Mass Timber</i>	29

2.3.1. Ligações mecânicas	29
2.3.1.1. Ligações mecânicas – não reversíveis	30
2.3.1.2. Ligações mecânicas – reversíveis	30
2.3.2. Ligações adesivas	33
2.3.3. Sambladuras	34
2.3.3.1. Juntas emechadas	34
2.3.3.2. Juntas cruzadas	37
3. Pré-fabricação em <i>Mass Timber</i>	43
3.1. Evolução da pré-fabricação	45
3.2. Componentes modulares em <i>Mass Timber</i>	51
3.3. Módulo pré-fabricado em <i>Mass Timber</i>	54
3.3.1. Sistema híbrido	56
4. <i>Plug-in</i>	59
4.1. <i>Plug-in</i> na arquitetura	61
4.2. As vantagens e desvantagens do <i>plug-in</i>	68
4.2.1. Vantagens do <i>plug-in</i>	68
4.2.2. Desvantagens do <i>plug-in</i>	68
5. Protótipo	71
5.1. Conceito	74
5.2. Caracterização do protótipo	77
5.2.1. Sistema estrutural	78
5.2.2. Infraestruturas	80
5.2.3. Boxes	82
5.2.4. Ligações entre componentes modulares	86
5.3. Desempenho térmico	89
5.4. Impermeabilização	92
5.5. Estanquidade	95

5.6. Transporte da box	95
5.7. Inserção do módulo na estrutura	97
6. Caso de estudo	99
6.1. Contextualização	101
6.2. Conceito	103
6.3. Módulos habitacionais	104
6.3.1. Habitação tipo	105
6.3.2. Habitação tipo - residência	112
Conclusão	121
Referências	125

Índice Figuras

Figura 1. Impactes das alterações climáticas no futuro. Adaptado de IPCC (2023).

Figura 2. Gases com efeito de estufa. Adaptado de IPCC (2023).

Figura 3. Ciclo de vida da construção. Adaptado de Dalemarken (2023).

Figura 4. Ciclo global do carbono. Adaptado de Martins (2003).

Figura 5. Fabricação Digital em *Mass Timber*. Fonte: TimberLab (2024).

Figura 6. Configuração do painel CLT. Fonte: Luthi (2022).

Figura 7. Configuração do painel GLT. Fonte: Thinkwood (2024).

Figura 8. Finger joints. Fonte: Sviták et al. (2014).

Figura 9. Painel LVL. Fonte: Whywood (2024).

Figura 10. Configuração do painel NLT. Fonte: Luthi (2022).

Figura 11. Configuração do painel DLT. Fonte: Luthi (2022).

Figura 12. Diagrama das ligações mecânicas empregues nos sistemas *Mass Timber*.

Figura 13. Adesivo epoxídico bicomponente. Fonte: Rothoblaas (2024).

Figura 14. Resistência à compressão (1) e resistência ao cisalhamento (2). Adaptado de TRADA Technology (2012).

Figura 15. Ligações de encaixe (1) e encaixe por contraventamento (2). Adaptado de TRADA Technology (2012).

Figura 16. Museu Ponte de Madeira Yusuhara, Kengo Kuma 2010. Fonte: Kengo Kuma Associates (2010b).

Figura 17. Corte construtivo do Museu Ponte de Madeira Yusuhara, Kengo Kuma 2010. Fonte: Kengo Kuma Associates (2010b).

Figura 18. Ligação por cunha. Adaptado de TRADA Technology (2012).

Figura 19. GC Prostho Museum Research Center, Kengo Kuma 2010. Fonte: Kengo Kuma Associates (2010a).

Figura 20. Pormenor construtivo do GC Prostho Museum Research Center, Kengo Kuma 2010. Fonte: Kengo Kuma Associates (2010a).

Figura 21. Tamedia Office, Shigeru Ban 2013. Fonte: Montilha et al. (2014)

Figura 22. Sistema de ligação do edifício Tamedia Office, Shigeru Ban 2013. Fonte: Archdaily (2014).

Figura 23. Fabricação digital do edifício Tamedia Office, Shigeru Ban 2013. Fonte: Archdaily (2014).

Figura 24. Dymaxion Houses – Wichita House, Buckminster Fuller 1946. Fonte: C20 Society (2024).

Figura 25. Dymaxion Houses – Wichita House, Buckminster Fuller 1946. Fonte: C20 Society (2024).

Figura 26. Montagem da Dymaxion Houses – Wichita House, Buckminster Fuller. Fonte: Buckminster Fuller (2023).

Figura 27. Casa pré-fabricada SECO – Catford, Londres. Fonte: Hogan-O'Neill (2021).

Figura 28. Cronogramas de construção pré-fabricada e construção convencional. Adaptado de Hogan-O'Neill (2021).

Figura 29. Construção pré-fabricada através de componentes modulares. Fonte: Tamarack Media (2024).

Figura 30. Brock Commons Tallwood House, Acton Ostry Architects. Fonte: Archdaily (2018).

Figura 31. Módulo estrutural, Brock Commons Tallwood House. Fonte: Archdaily (2018).

Figura 32. Construção pré-fabricada através de módulos em *Mass Timber*. Edifício Sara Cultural Center, Skellefteå. Fonte: Archdaily (2023).

Figura 33. Revier Mountain Lodge, Carlos Martinez Architekten, Suíça 2017. Fonte: Lins (2017).

Figura 34. Módulo em *Mass Timber* do edifício Revier Mountain Lodge, Carlos Martinez Architekten 2017. Fonte: Lins (2017).

Figura 35. Sistema híbrido CREE. Fonte: CREE Buldings (2021).

Figura 36. Sistema CREE, The First Guimarães, Grupo Casais 2023. Fonte: CREE Buldings (2021).

Figura 37. Plug-in City, Archigram 1964. Fonte: Toit (2020).

Figura 38. Dockable Dwelling, Matias Creimer 2003. Fonte: Kronenburg and Klassen (2006).

Figura 39. Dockable Dwelling, Matias Creimer 2003. Fonte: Kronenburg and Klassen (2006).

Figura 40. Docks, Cattani Architectes 2010. Fonte: Atelier Cattani (2010).

Figura 41. City of the Sun, Denis Svirid 2013. Fonte: Svirid (2013).

Figura 42. City of the Sun, Denis Svirid 2013. Fonte: Svirid (2013).

Figura 43. Estrutura Multiply, 2019 – Waugh Thistleton Architects. Fonte: Architects (2018).

Figura 44. Diagrama estrutural do edifício Multiply, 2019 – Waugh Thistleton Architects. Fonte: Architects (2018).

Figura 45. Conceito do protótipo.

Figura 46. Estrutura modular.

Figura 47. Estrutura modular.

Figura 48. Infraestruturas.

Figura 49. Infraestruturas.

Figura 50. Componente modular em *Mass Timber*.

Figura 51. Adição e subtração do componente modular em *Mass Timber*.

Figura 52. Versatilidade do módulo.

Figura 53. Diagrama componente modular.

Figura 54. Ligação entre módulos CLT – corte.

Figura 55. Ligação entre módulos CLT – corte horizontal.

Figura 56. Ligação entre módulos CLT – corte vertical.

Figura 57. Acabamento hidrofóbico. Fonte: StoraEnso (2025).

Figura 58. Acabamento hidrofóbico UV. Fonte: StoraEnso (2025).

Figura 59. Corte construtivo.

Figura 60. Transporte de placas CLT. Fonte: Rothoblaas (2024).

Figura 61. Planta de implantação – Caso de estudo.

Figura 62. Modelo digital do edifício modular em *Mass Timber* – vista sul.

Figura 63. Modelo digital do edifício modular em *Mass Timber* – vista sul.

Figura 64. Habitação Tipo.

Figura 65. Planta habitação tipo.

Figura 66. Proposta modular habitação tipo.

Figura 67. Parede com painel fotovoltaico, habitação tipo.

Figura 68. Parede verde, habitação tipo.

Figura 69. Habitação tipo.

Figura 70. Habitação tipo – residência.

Figura 71. Planta habitação tipo - residência.

Figura 72. Proposta modular habitação tipo – residência.

Figura 73. Parede verde, habitação tipo - residência.

Figura 74. Parede com painel fotovoltaico, habitação tipo - residência.

Figura 75. Habitação tipo - residência.

Índice Tabelas

Tabela 1. Ciclo de vida padrão das emissões das EPDs.

Tabela 2. Análise de Ciclo de Vida do Aço. Adaptado de Bauforumstahl (2023)

Tabela 3. Análise de Ciclo de Vida do Betão. Adaptado de Molins (2024)

Tabela 4. Análise de Ciclo de Vida do CLT. Adaptado de Schilliger Holz (2020)

Tabela 5. Análise de Ciclo de Vida do GLT. Adaptado de Schilliger Holz (2020)

Tabela 6. Potencial de aquecimento global total (aço, betão e madeira)

Tabela 7. Ligações não ocultas.

Tabela 8. Ligações ocultas.

Tabela 09. Propriedades componentes modulares.

Tabela 10. Condutividade térmica da envolvente opaca exterior – Paredes.

Tabela 11. Condutividade térmica da envolvente opaca exterior – Laje Tetos.

Tabela 12. Condutividade térmica da envolvente opaca exterior – Laje Piso.

Tabela 13. Componentes modulares da Habitação Tipo – Standard.

Tabela 14. Componentes modulares Habitação Tipo – Residência

Acrónimos

BIM - Building information modeling

CLT - Cross laminated timber

DLT - Dowel laminated timber

EEA - European environment agency

EPD - Environmental product declarations

GEE - Gases de efeito estufa

GLT - Glue Laminated Timber

GWP - Global warming potential

IPCC - Intergovernmental panel on climate change

LNEC - Laboratório nacional de engenharia civil

LVL - Laminated veneer lumber

NLT - Nail laminated timber

OSM - Off-site manufacturing

SCE - Sistema de certificação energética

UV - Ultravioleta

Resumo

Face ao aumento das emissões de gases com efeito de estufa, é necessário repensar a forma como se constroem os edifícios, sobretudo os habitacionais. A descarbonização do setor não se limita a promover a eficiência e a autossuficiência energéticas, mas implica também a mudança dos sistemas construtivos tradicionais, como o betão armado, a alvenaria e o aço. A análise do ciclo de vida dos edifícios, numa perspetiva “cradle to gate”, revela que a extração de matérias-primas, a transformação e o transporte são etapas com grande impacto na pegada carbónica dos materiais e sistemas construtivos. Por esse motivo, o setor da construção é um dos que mais urgentemente necessita de reduzir as suas emissões.

Com o previsível aumento da construção de habitação e a sua concentração nos meios urbanos, torna-se fundamental adotar estratégias que incluam a reconversão do edificado existente e a mudança nos modos de construção. Nos últimos vinte anos, o sistema em *Mass Timber* tem ganhado destaque, sobretudo na América do Norte, Reino Unido e Norte da Europa. A sua pegada carbónica reduzida, a capacidade de manter o carbono sequestrado e a facilidade de pré-fabricação tornam a madeira uma solução ambientalmente mais sustentável.

Neste contexto, o presente estudo visa desenvolver um sistema construtivo de unidades habitacionais compostas por módulos pré-fabricados em *Mass Timber*. O modelo baseia-se na integração tipo *plug-in* de unidades habitacionais numa malha estrutural previamente construída, composta por pórticos vazios que definem acessos e redes de infraestruturas. Esta ideia remete para os conceitos da cidade *plug-in*, concebidos pelos Archigram nas décadas de 1960 e 1970, nomeadamente por Peter Cook, que idealizou cápsulas habitacionais transportáveis, compondo cidades dinâmicas e mutáveis.

As unidades de habitação são formadas a partir de um módulo base em *Cross Laminated Timber* (CLT) com 3,00 x 3,00 m. Este módulo pode ser subdividido em componentes de diferentes larguras (1/3, 1/2 e 2/3) ou duplicado, resultando em cinco componentes combináveis. Estas peças permitem a criação de habitações personalizadas, montadas através de ligações mecânicas em aço numa malha tridimensional de pilares e vigas em *Glue Laminated Timber* (GLT).

O protótipo propõe um sistema baseado nos princípios de planejar, pré-fabricar, transportar e montar, com menor impacto ambiental em comparação com o betão ou o aço, possibilitando ainda a reutilização ou reciclagem dos módulos no fim da sua vida útil.

Palavras-Chave: Descarbonização, Sequestro de Carbono, Habitação, Construção Modular, Pré-fabricação, Mass Timber

Abstract

In view of the increase in greenhouse gas emissions, it is necessary to rethink the way buildings are constructed, especially residential buildings. Decarbonizing the sector is not limited to promoting energy efficiency and self-sufficiency, but also involves changing traditional construction systems, such as reinforced concrete, masonry and steel. Analysis of the life cycle of buildings, from a “cradle to gate” perspective, reveals that the extraction of raw materials, transformation and transportation are stages with a major impact on the carbon footprint of materials and construction systems. For this reason, the construction sector is one of those that most urgently needs to reduce its emissions.

With the foreseeable increase in housing construction and its concentration in urban areas, it is essential to adopt strategies that include the conversion of existing buildings and a change in construction methods. In the last twenty years, the Mass Timber system has gained prominence, especially in North America, the United Kingdom and Northern Europe. Its reduced carbon footprint, carbon sequestration capacity and ease of prefabrication make wood a more environmentally sustainable solution.

In this context, this study aims to develop a construction system for housing units made up of prefabricated modules in Mass Timber. The model is based on the plug-in integration of housing units in a previously built structural mesh, made up of empty porticos that define access and infrastructure networks. This idea harks back to the concepts of the plug-in city, conceived by Archigram in the 1960s and 1970s, particularly by Peter Cook, who idealized transportable housing capsules, making up dynamic and changeable cities.

The housing units are formed from a base module in Cross Laminated Timber (CLT) measuring 3.00 x 3.00m. This module can be subdivided into components of different widths ($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ and $\frac{2}{3}$) or duplicated, resulting in five combinable components. These parts make it possible to create customized homes, assembled using mechanical steel connections in a three-dimensional mesh of Glue Laminated Timber (GLT) pillars and beams.

The prototype proposes a system based on the principles of planning, prefabricating, transporting and assembling, with less environmental impact compared to concrete or steel, while also making it possible to reuse or recycle the modules at the end of their useful life.

Keywords: Decarbonization, Carbon Sequestration, Housing, Modular Construction, Prefabrication, Mass Timber

Introdução

Num momento em que os impactos da crise climática se tornam cada vez mais evidentes e difíceis de ignorar, torna-se urgente repensar a forma como projetamos, construímos e habitamos os nossos espaços. A arquitetura, enquanto disciplina profundamente enraizada na transformação do território e na gestão de recursos, é chamada a responder com soluções que respeitem os limites do planeta. Neste contexto, a presente dissertação centra-se no contributo da construção modular pré-fabricada em *Mass Timber* para a ecologia do habitar, propondo uma abordagem sustentável, adaptável e alinhada com os desafios ambientais da contemporaneidade. A escolha deste tema surge da consciencialização sobre o papel que a construção tem tido nas emissões de gases com efeito de estufa, responsável por uma percentagem significativa da pegada carbónica global. Esta realidade, aliada à necessidade crescente de novas soluções habitacionais em áreas urbanas e periurbanas, reforça a importância de explorar sistemas construtivos mais eficientes e amigos do ambiente. O *Mass Timber*, enquanto sistema construtivo baseado em madeira transformada, representa uma alternativa promissora ao betão e ao aço, não só pelas suas qualidades estruturais, mas sobretudo pela sua capacidade de sequestrar carbono e de ser pré-fabricado com grande precisão e baixos níveis de desperdício.

A crescente necessidade de descarbonizar o setor da construção impõe uma reflexão crítica sobre os métodos construtivos atualmente utilizados, exigindo a adoção de soluções que aliem sustentabilidade ambiental, viabilidade técnica e aplicabilidade em diferentes contextos geográficos e socioculturais. Neste enquadramento, a construção modular assume particular relevância, ao permitir uma racionalização dos processos, a redução do desperdício e a otimização dos recursos. Quando associada ao uso de *Mass Timber*, a modularidade revela-se uma estratégia construtiva especialmente eficaz. Estes materiais, pelas suas características estruturais, ecológicas e operacionais, possibilitam o desenvolvimento de soluções habitacionais que são, simultaneamente, leves, versáteis, de montagem rápida e facilmente adaptáveis. Além disso, a natureza reversível e evolutiva destes sistemas responde às exigências contemporâneas de flexibilidade habitacional e de circularidade, oferecendo alternativas resilientes num panorama urbano e social em constante transformação.

A presente dissertação tem como objetivo compreender de que forma a construção modular em *Mass Timber* pode contribuir para uma arquitetura mais sustentável e ecológica, com foco na redução das emissões de carbono e na promoção de um habitar mais consciente. A investigação parte de uma pergunta central: como pode um sistema modular em *Mass Timber* responder às exigências ambientais, técnicas e sociais do nosso tempo? Para responder a esta questão, é desenvolvido um protótipo habitacional baseado num sistema modular tipo *plug-in*, em que boxes habitacionais em CLT são encaixadas numa malha estrutural pré-construída em GLT. Este modelo, inspirado nos conceitos das cidades modulares dos anos 60, é repensado para os dias de hoje, integrando princípios de circularidade, eficiência energética e adaptabilidade aos diferentes modos de viver.

A metodologia adotada assenta numa abordagem teórico-prática, estruturada em duas fases complementares. A primeira fase é dedicada à construção de um enquadramento crítico, começando por uma análise do impacto ambiental dos materiais tradicionalmente usados na construção, com especial atenção à pegada ecológica do betão e do aço. A esta análise segue-se um aprofundamento do sistema *Mass Timber*, com destaque para as suas características técnicas, vantagens ambientais, tipos de ligações e potencial de pré-fabricação. Ainda na vertente teórica, explora-se a evolução histórica e tecnológica da construção modular, assim como os conceitos de flexibilidade e adaptabilidade habitacional. A segunda fase do estudo centra-se no desenvolvimento prático de um protótipo modular, concebido com base nos princípios estudados. Este protótipo é testado e analisado a partir de várias perspetivas: montagem, desempenho térmico, comportamento estrutural e potencial de reutilização. O processo de conceção teve como ponto de partida um caso de estudo localizado na zona de Barcelos, no âmbito do projeto SMILE — Visões para o Habitar em Áreas Rurais Periurbanas, que serviu de base para explorar a aplicabilidade real do sistema proposto.

A dissertação organiza-se em seis capítulos, distribuídos entre a fundamentação teórica e a aplicação prática.

O primeiro capítulo analisa o papel da construção nas alterações climáticas, apresentando dados concretos sobre a pegada carbónica dos materiais convencionais e sobre a necessidade de promover estratégias de mitigação, como o sequestro de carbono.

O segundo capítulo introduz o conceito de *Mass Timber*, explorando as suas propriedades, variantes e vantagens face aos materiais tradicionais.

O terceiro capítulo dedica-se à pré-fabricação e aos sistemas modulares, traçando a evolução desta abordagem desde as experiências do século XX até às propostas atuais mais inovadoras. No quarto capítulo, analisa-se o conceito de arquitetura plug-in, inspirado em visões utópicas como as dos Archigram, e recontextualizado como estratégia realista para habitações flexíveis, reversíveis e adaptáveis.

O quinto capítulo apresenta o desenvolvimento de um protótipo modular em *Mass Timber*, detalhando as soluções construtivas, os componentes, as ligações e os aspetos de desempenho ambiental.

Por fim, o sexto capítulo aplica este protótipo a um caso de estudo real, no concelho de Barcelos, permitindo testar e validar as soluções propostas em contexto físico, social e territorial concreto.

Esta dissertação pretende, acima de tudo, ser um contributo para a construção de uma nova mentalidade dentro da arquitetura, uma mentalidade que veja na sustentabilidade não um constrangimento, mas uma oportunidade criativa. Que valorize a pré-fabricação e a modularidade não como soluções industrializadas e rígidas, mas como ferramentas para criar espaços flexíveis, confortáveis e atentos às transformações do tempo. Ao apostar no *Mass Timber* e na arquitetura plug-in, esta dissertação propõe um caminho possível para um habitar mais consciente, mais ecológico e mais justo.

1. A Mitigação do carbono na construção

1. A Mitigação do carbono na construção

1.1. Alterações climáticas

Desde o início da Revolução Industrial, o aumento das atividades industriais e o uso massivo de combustíveis fósseis têm resultado no aumento contínuo das emissões de gases com efeito de estufa. Estas emissões originam o aquecimento global do planeta com consequências nas alterações climáticas, assim como, na economia e qualidade de vida (Foxell, 2014).

As alterações climáticas manifestam-se em todo o planeta a nível de picos de temperatura, precipitação, aumento do nível do mar e a perda da biodiversidade (European Environment Agency, 2019).

Segundo estudos do *Intergovernmental Panel Climate Change* (2023), observa-se que se atualmente não forem tomadas medidas para a reversão do aquecimento global, em 2100 enfrentar-se-á um aumento da temperatura do planeta em 4°C (ver figura 1). O mesmo gráfico aponta que apesar de se agir rapidamente, a humanidade enfrentará um aquecimento global ,em 2100, de pelo menos 2°C (IPCC, 2023). Atualmente, parece inevitável que a temperatura global continue a aumentar, com consequências de maior ou menor gravidade. Nesse contexto, o IPCC já não considera a existência de um cenário de risco zero.

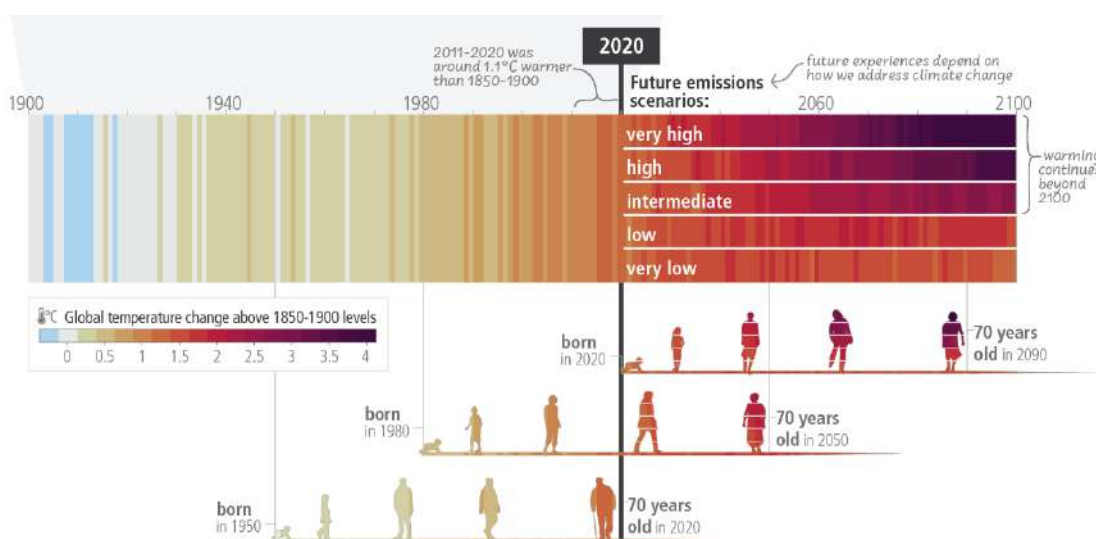


Figura 1. Impactes das alterações climáticas no futuro. Adaptado de IPCC (2023).

De acordo com a European Environment Agency (EEA), a União Europeia estabeleceu metas que promovem uma diminuição de aproximadamente 55% das emissões de gases de efeito estufa até 2030. O objetivo de alcançar a neutralidade carbónica passa por mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e aumentar a capacidade de sequestro de carbono (European Environment Agency, 2019).

O aumento do aquecimento global, causado pelas emissões de GEE, têm origem principalmente na queima de combustíveis fósseis (o petróleo, o carvão e o gás natural), assim como nas atividades humanas (a agricultura e a desflorestação), permitindo libertações destes gases para a atmosfera (European Environment Agency, 2024).

A principal razão das alterações climáticas é o efeito de estufa, devido a alguns gases presentes na atmosfera que retêm o calor do sol impedindo-o de ser devolvido para o espaço, contribuindo assim para o aquecimento global (European Environment Agency, 2019).

Relativamente às emissões de GEE, em 2019 o World Green Building Council refere que a nível global a construção é responsável por 39% dessas emissões, sendo que o mesmo relatório refere ainda que 28% pertencem apenas à fase de construção e utilização do edifício e 11% relativos ao ciclo de vida dos materiais de construção. Conforme dados mais recente de 2022, a EEA refere que no espaço Europeu os valores são de 34% dessas emissões, relacionadas com a energia. Estas emissões resultam em parte da utilização direta de combustíveis fósseis para a produção de eletricidade e calor para a utilização dos edifícios (European Environment Agency, 2024). Apesar das diferenças nas datas e nas geografias dos dados apresentados, é possível deduzir que um valor de referência aceitável se situa em torno dos 40%.

1.2. Pegada carbónica na construção

Consideram-se gases com efeito de estufa o CO₂, o N₂O e o CH₄. Para comparar o efeito de cada gás através de uma unidade comum é utilizado o kgCO₂eq.

Devido à variação da quantidade de emissões de cada um dos gases, o IPCC periodicamente refaz a tabela de equivalência, para que os valores expressem a situação atual (ver figura 2).

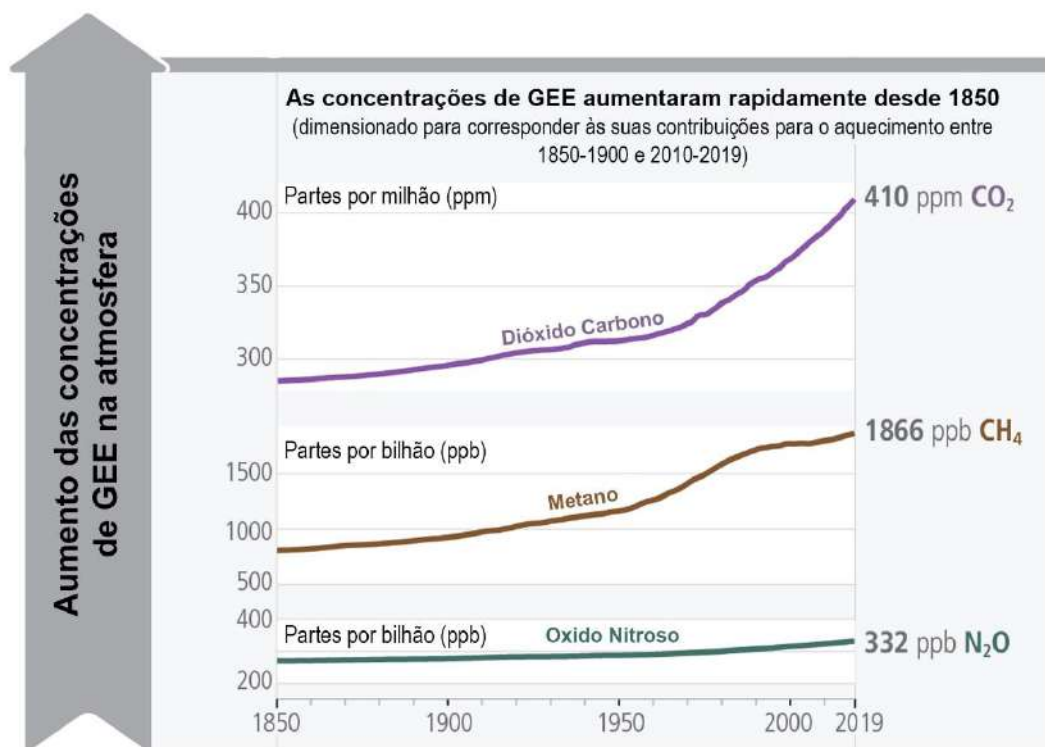


Figura 2. Gases com efeito de estufa. Adaptado de IPCC (2023).

A pegada de carbono expressa o contributo de uma atividade para o aquecimento global, medida na unidade de kg CO₂eq e consiste na contabilização das emissões de GEE associadas ao longo de todo o ciclo de vida de um produto. No caso de um edifício, o ciclo de vida é composto pelas seguintes fases:

- Extração de matérias primas;
- Fase da produção de materiais e componentes;
- Fase de construção;
- Fase de utilização;
- Fase de fim de vida.

Analisando o ciclo de vida da construção de um edifício (ver figura 3), verifica-se que as emissões de GEE estão presentes ao longo de todo o ciclo de vida, incluindo a extração de matérias primas, o transporte e a demolição.

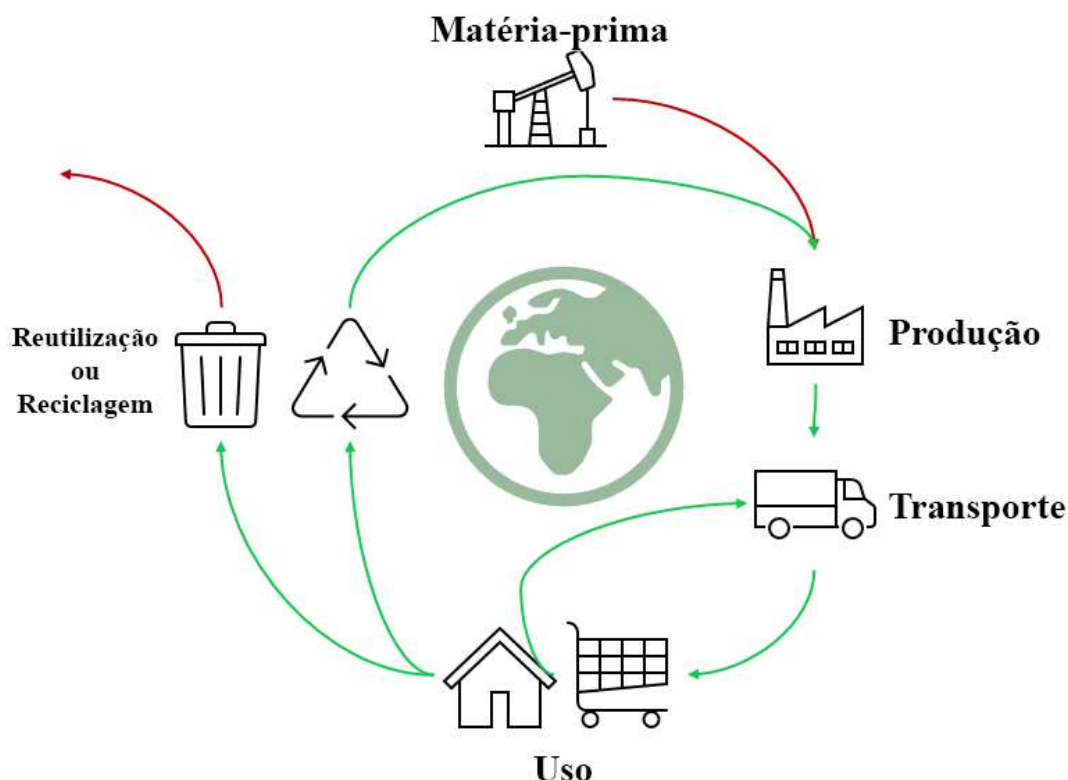


Figura 3. Ciclo de vida da construção. Adaptado de Dalemarken (2023).

Normalmente os sistemas construtivos utilizados na construção baseiam-se no aço, no betão armado e na madeira. Como tal, tendo cada um, um diferente ciclo de vida, torna-se essencial compreender os impactes associados às emissões geradas ao longo de cada um desses ciclos.

Os dados relativos ao potencial do aquecimento global de cada um dos sistemas construtivos, pode ser obtida, tomando como referência as Environmental Product Declarations (EPDs) dos diferentes materiais. As EPDs estão associadas a produtos, apresentando dados fidedignos sobre o desempenho ambiental de produtos e serviços a partir de uma perspetiva de ciclo de vida (The International EPD System, 2021).

Para as emissões do ciclo de vida das EPDs, é considerado um ciclo de vida padrão que é constituído por três tipo de fases (ver tabela 1):

- Fase A – fase da produção, transporte e instalação do produto;
- Fase B – fase de utilização;
- Fase C – fase do fim de vida do produto.

Tabela 1. Ciclo de vida padrão das emissões das EPDs.

Fase do produto			Fase do processo de construção		Fase de utilização							Fase de fim de vida			
Fornecimento de matérias primas	Transporte	Fabrico	Transporte	Processo de instalação da construção	Uso	Manutenção	Reparação	Remodelação	Substituição	Utilização de energia operacional	Utilização operacional da água	Demolição de construção	Transporte	Tratamento de resíduos	Eliminação
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
X	X	X	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Como materiais de referência, para comparação são considerados um elemento em chapa estrutural de aço, o betão pronto e um elemento estrutural em CLT e GLT. Na comparação foram só consideradas a fase A1 à A3, que representam o GWP para o material pronto para colocação em obra.

1.2.1. Aço

O aço é um dos materiais mais utilizados na construção, segundo a European Commission (2002) o aço representa em média 500 toneladas de aço incorporado nos edifícios (European Commission, 2002).

De acordo com a EPD emitida pela empresa Bauforumstahl (2023), refere que a produção de chapas de aço estrutural tem um impacte ambiental significativo no seu processo, o que leva à libertação de CO₂ para a atmosfera. Quanto ao potencial do aquecimento global, observa-se que para a produção de uma tonelada de aço estrutural, as emissões totais correspondentes são de 2530 kgCO₂eq (ver tabela 2).

Tabela 2. Análise de ciclo de vida do aço. Adaptado de Bauforumstahl (2023).

FRONTEIRAS DO SISTEMA (X = INCLUÍDO NA LCA; ND = NÃO DECLARADO)																
Fase do produto			Fase do processo de construção		Fase de utilização							Fase de fim de vida				Benefícios e cargas para além do limite do sistema
Fornecimento de matérias primas	Transporte	Fabrico	Transporte	Processo de instalação da construção	Uso	Manutenção	Reparação	Remodelação	Substituição	Utilização de energia operacional	Utilização operacional da água	Demolição de construção	Transporte	Tratamento de resíduos	Eliminação	Fornecimento de matérias primas Reutilização - Recuperação - Reciclagem - Potencial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

RESULTADOS DA ACV - IMPACTO AMBIENTAL de acordo com a norma EN 15804+A2: 1 tonelada de aço estrutural		
Parâmetros	Unidades	A1-A3
Potencial de aquecimento global total	kg CO2 eq.	2.53E+03
Potencial de aquecimento global fóssil	kg CO2 eq.	2.53E+03
Potencial de aquecimento global biogénico	kg CO2 eq.	4.03E-01
Potencial de empobrecimento da camada de ozono estratosférico	kg CFC 11 eq	5.5E-10
Potencial de acidificação, excedência acumulada	mol H+ eq.	5.37E+00
Potencial de eutrofização, fração de nutrientes que atinge o comparti	kg P eq.	1.1E-03
Potencial de eutrofização, fração de nutrientes que atinge o comparti	kg N eq.	1.33E+00
Potencial de eutrofização, excedência acumulada	mol H+ eq	1.45E+01
Potencial de formação do ozono troposférico	kg NMVOC eq.	5.67E+00
Potencial de esgotamento abiótico dos recursos não fósseis	kg Sb eq.	3.63E-03
Potencial de esgotamento abiótico dos recursos fósseis	MJ, net calorific value	2.4E+04
Potencial de privação de água (utilizador), consumo de água ponderado pela privação	m³ world eq.deprived	1.4E+02

1.2.2. Betão

Analisando a EPD da empresa Molins Concrete Aggregates, referente à produção de peças estruturais em CLT, os impactes ambientais publicados relativamente ao potencial do aquecimento global, observa-se que para a produção de 1m³ de betão, as emissões totais de GEE são de 217 kgCO₂eq (ver tabela 3)

Tabela 3. Análise de ciclo de vida do betão. Adaptado de Molins (2024).

FRONTEIRAS DO SISTEMA (X = INCLuíDO NA LCA; ND = NÃO DECLARADO)															
Fase do produto			Fase do processo de construção		Fase de utilização							Fase de fim de vida			
Fornecimento de matérias primas	Transporte	Fabrico	Transporte	Processo de instalação da construção	Uso	Manutenção	Reparação	Remodelação	Substituição	Utilização de energia operacional	Utilização operacional da água	Demolição de construção	Transporte	Tratamento de resíduos	Eliminação
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
X	X	X	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Benefícios e cargas para além do limite do sistema															
Fornecimento de matérias primas/fertilização - Recuperação - Reciclagem - Potenciais															
D															
ND															
INDICADORES PRINCIPAIS DE IMPACTO AMBIENTAL: 1 m³ de betão															
Parâmetros												Unidades		Produção	
														A1-A3	
Potencial de aquecimento global total												kg CO2 eq.		2,17E+02	
Potencial de aquecimento global fóssil												kg CO2 eq.		2,17E+02	
Potencial de aquecimento global biogénico												kg CO2 eq.		2,40E-01	
Potencial de empobrecimento da camada de ozono estratosférico												kg CFC 11 eq.		1,38E-05	
Potencial de acidificação, excedência acumulada												mol H+ eq.		3,28E-01	
Potencial de eutrofização, fração de nutrientes que atinge o compartimento final de água doce												kg P eq.		6,67E-03	
Potencial de eutrofização, fração de nutrientes que atinge o compartimento final marinho												kg N eq.		1,26E-01	
Potencial de eutrofização, excedência acumulada												mol N eq.		1,02E+00	
Potencial de formação do ozono troposférico												kg NMVOC eq.		4,32E-01	
Potencial de esgotamento abiótico dos recursos não fósseis												kg Sb eq.		1,61E-04	
Potencial de esgotamento abiótico dos recursos fósseis												MJ, net calorific value		1,15E+03	
Potencial de privação de água (utilizador), consumo de água ponderado pela privação												m³ world eq. deprived		8,73E+01	

1.2.3. Madeiras Transformadas

Apesar dos materiais mais utilizados na construção serem o betão e o aço, as alterações climáticas têm levado a considerar o uso da madeira como material de construção.

Consideram-se nesta análise madeiras estruturais do tipo Cross Laminated Timber (CLT), Glued Laminated Timber (GLT) ou outros tipo de componentes associados ao *Mass Timber*

De acordo com a EPD da empresa Schilliger Holz (2020), referente à produção de CLT, observa-se que para a produção de 1m³ de CLT, as emissões totais correspondentes são de 623 kgCO₂eq (Ver tabela 4).

Tabela 4. Análise de ciclo de vida do CLT. Adaptado de Schilliger Holz (2020).

DESCRIÇÃO DA FRONTEIRA DO SISTEMA (X = INCLUÍDO NA LCA; ND = MÓDULO OU INDICADOR NÃO DECLARADO; MNR = MÓDULO NÃO RELEVANTE)																																	
Fase do produto			Fase do processo de construção		Fase de utilização							Fase de fim de vida				Benefícios e cargas para além do limite do sistema																	
Fornecimento de matérias primas			Transporte		Fabrico		Transporte		Processo de instalação da construção		Uso		Manutenção		Reparação		Remodelação		Substituição		Utilização de energia operacional		Utilização operacional da água		Demolição de construção		Transporte		Tratamento de resíduos		Eliminação		Fornecimento de matérias primasReutilização - Recuperação - Reciclagem - Potencial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D																	
X	X	X	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND																	

RESULTADOS DA ACV - IMPACTO AMBIENTAL: 1 m³ de madeira laminada cruzada Schilliger estrutural		
Parâmetros	Unidades	A1-A3
Potencial de aquecimento global total	kg CO2 eq.	-6,23E+02
Potencial de empobrecimento da camada de ozono estratosférico	kg CFC 11 eq	9,40E-06
Potencial de eutrofização, excedência acumulada	kg SO2-eq.	4,18E-01
Potencial de eutrofização, fração de nutrientes que atinge o compartimento final de água doce	kg PO4 eq.	9,42E-02
Potencial de formação do ozono troposférico	kg ethene-eq.	1,05E-01
Potencial de esgotamento abiótico dos recursos não fósseis	kg Sb eq.	1,49E-04
Potencial de esgotamento abiótico dos recursos fósseis	MJ, net calorific value	1,02E+03

Analisando a EPD emitida pela empresa Schilliger Holz (2020), referente à produção de GLT, observa-se que para a produção de 1m³ de GLT, as emissões totais correspondentes são de 615 kgCO₂eq (Ver tabela 5).

Tabela 5. Análise de ciclo de vida do GLT. Adaptado de Schilliger Holz (2020).

DESCRIÇÃO DA FRONTEIRA DO SISTEMA (X = INCLUÍDO NA LCA; ND = MÓDULO OU INDICADOR NÃO DECLARADO; MNR = MÓDULO NÃO RELEVANTE)																
Fase do produto			Fase do processo de construção		Fase de utilização							Fase de fim de vida				Benefícios e cargas para além do limite do sistema
Fornecimento de matérias primas	Transporte	Fabrico	Transporte	Processo de instalação da construção	Uso	Manutenção	Reparação	Remodelação	Substituição	Utilização de energia operacional	Utilização operacional da água	Demolição de construção	Transporte	Tratamento de resíduos	Eliminação	Fornecimento de matérias primas Reutilização - Recuperação - Reciclagem - Potencial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RESULTADOS DA ACV - IMPACTO AMBIENTAL: 1 m³ de glulam (424 kg/m³)																
Parâmetros												Unidades		A1-A3		
Potencial de aquecimento global total												kg CO2 eq.		-6,15E+02		
Potencial de empobrecimento da camada de ozono estratosférico												kg CFC 11 eq		5,24E-06		
Potencial de eutrofização, excedência acumulada												kg SO2-eq.		4,39E-01		
Potencial de eutrofização, fração de nutrientes que atinge o compartimento final de água doce												kg PO4 eq.		9,42E-02		
Potencial de formação do ozono troposférico												kg ethene-eq.		1,23E-01		
Potencial de esgotamento abiótico dos recursos não fósseis												kg Sb eq.		2,20E-05		
Potencial de esgotamento abiótico dos recursos fósseis												MJ, net calorific value		1,10E+03		

1.2.4. Comparação

Comparando os três tipos de materiais de construção, conseguimos perceber que têm diferentes valores de pegada carbónica, sendo a madeira o único material que possui carbono sequestrado. Através da comparação da pegada carbónica dos três materiais, é possível compreender que a madeira transformada tem emissões baixas em relação aos restantes materiais (ver tabela 6). Isto deve-se ao facto de a madeira conter carbono biogénico que entra como um valor negativo inicial (ver tabela 6), por m³, significa que o carbono biogénico que está sequestrado num m³ de madeira transformada se fosse libertado para a atmosfera, representaria 6,15E+02 kgCO₂eq. Este valor apresenta-se como negativo, representando o "mealheiro" de carbono, ou seja, um depósito que é gradualmente consumido até que o balanço se inverta, tornando o valor positivo. O carácter negativo refere-se a uma comparação relativa com outros valores, não a uma negatividade em termos absolutos.

Tabela 6. Potencial de aquecimento global total (aço, betão e madeira) nas fases A1-A3.

COMPARAÇÃO DA PEGADA CARBÓNICA			
Materiais	Parâmetros	Unidades	A1-A3
Aço ¹	Potencial de aquecimento global total	kg CO ₂ eq.	2.53E+03
Betão ²	Potencial de aquecimento global total	kg CO ₂ eq.	8,03E+02
Madeira Transformada (CLT) ³	Potencial de aquecimento global total	kg CO ₂ eq.	-6,23E+02
Madeira Transformada (GLT) ⁴	Potencial de aquecimento global total	kg CO ₂ eq.	-6,15E+02

1. EPD Structural Steel: Heavy Plates, Bauforumstahl 2023
2. EPD Portland Cement (CEM I), Cembureau 2023
3. EPD Schilliger cross laminated timber, Schilliger Holz 2020
4. EPD Schilliger glued laminated timber (Glulam), Schilliger Holz 2020

1.3. Sequestro do carbono

A mitigação do aquecimento global, resultante da emissão de GEE, pode ser feita através de dois processos, reduzir as emissões e sequestrar carbono.

Conforme refere Martins (2003), os meios de libertação de CO₂ na atmosfera passam pela respiração das plantas, queimadas e incêndios, processos de decomposição, queima de combustíveis fósseis e erupções vulcânicas (ver figura 4). A forma de absorver e fixar o CO₂ não se baseia apenas na sua dissolução nos oceanos, mas também é feita através da absorção e armazenamento de CO₂ nas plantas e no solo (Martins, 2003).

O sequestro de carbono refere-se ao processo principal para retirar o carbono da atmosfera, armazenando-o nos materiais. Um dos grandes desafios do sequestro carbónico é de que forma conseguimos assegurar o armazenamento de forma (Sasaki & Kim, 1966-2012).

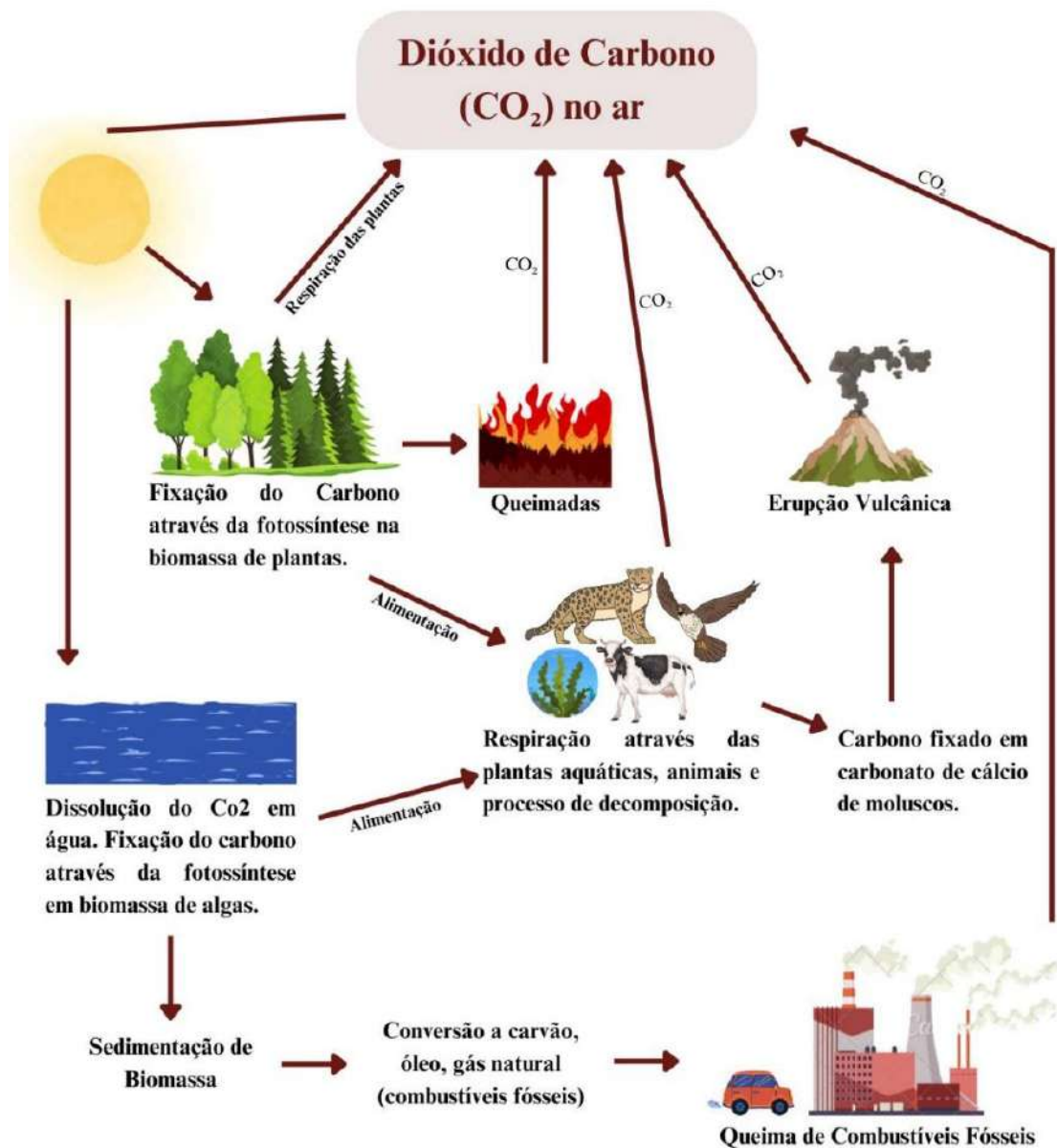


Figura 4. Ciclo global do carbono. Adaptado de Martins (2003).

As árvores desempenham um papel fundamental no sequestro de carbono, graças à sua elevada capacidade de absorver e fixar este elemento na sua biomassa. Durante o seu crescimento, as árvores capturam CO₂ da atmosfera através do processo de fotossíntese, armazenando o carbono no seu tecido lenhoso. Quando a madeira é extraída das árvores e utilizada em diferentes aplicações, o carbono nela retido permanece sequestrado ao longo de todo o seu ciclo de vida, contribuindo para a mitigação das alterações climáticas e para redução da pegada carbónica.

Segundo a EPD emitida pela empresa Schilliger (2020), cada m³ de CLT contém aproximadamente 190 kg de carbono biogénico. Se este carbono fosse libertado, iria equivaler à emissão de 696 kgCO₂eq.

De acordo com a EPD emitida pela empresa Schilliger (2020), cada m³ de GLT contém aproximadamente 203 kg de carbono biogénico. Se este carbono fosse libertado, iria equivaler à emissão de 744 kgCO₂eq.

É neste contexto que surge o *Mass Timber* como um sistema construtivo inovador que combina eficiência, sustentabilidade e um elevado potencial para contribuir significativamente para a mitigação das alterações climáticas.

2. Mass Timber

2. *Mass Timber*

2.1. O conceito de *Mass Timber*

A madeira tem uma longa história como um dos materiais de construção mais antigos, valorizada pela sua abundância e propriedades mecânicas favoráveis. Como um material natural e renovável, ela alinha-se bem com os esforços para reduzir a pegada ecológica da construção. Os avanços tecnológicos em produtos de madeira transformada, como é o caso do CLT, GLT, Laminated Veneer Lumber (LVL), entre outros, incluindo melhorias nos métodos de produção e ligações, superaram as limitações anteriores da madeira como material estrutural, estendendo a sua aplicação a edifícios em altura, resultando num novo conceito construtivo que é o *Mass Timber*.

Conforme Kumar et al. (2024) *Mass Timber*, é um conjunto de produtos de madeira transformada, que reúne grandes volumes de madeira em componentes estruturais compostos.

Os componentes em *Mass Timber* podem ser pré-fabricados com elevada precisão em fábrica, contribuindo para uma melhoria significativa na qualidade da obra e para a redução do desperdício de materiais. A introdução da fabricação digital no *Mass Timber* permite a preparação de componentes, cortados com precisão, facilitando a montagem no local. Além disso, os elementos em *Mass Timber* apresentam-se como uma alternativa sustentável em comparação com o aço e o betão (Sayigh, 2022)

A fabricação digital refere-se a um conjunto de tecnologias de controlo numérico computadorizado (CNC), que permitem a transferência de dados gerados por programas de modelação tridimensional (3D) para máquinas CNC, viabilizando a produção em duas (2D) ou três dimensões (3D). Este processo introduz o conceito de *mass customization*, possibilitando o desenvolvimento de sistemas construtivos não padronizados e controlados digitalmente. O CNC permite que ferramentas como fresas operem com um grau de precisão incomparável (Pupo & Celani, 2008).

A aplicação da fabricação digital está intrinsecamente ligada às técnicas utilizadas na materialização de modelos físicos. As técnicas seleccionadas para cada projeto influenciam diretamente a modelação e a definição geométrica dos modelos tridimensionais, orientando os processos subsequentes de manufatura e montagem dos componentes, culminando na produção do protótipo final (Barros, 2011).

Os métodos aplicados na fabricação digital podem ser classificados em três categorias principais:

- Subtrativos,
- Aditivos
- Formativos.

Os sistemas subtrativos envolvem a remoção de material da matéria-prima por meio de ferramentas. Os sistemas aditivos baseiam-se na deposição ou solidificação da matéria-prima em camadas sucessivas. Por fim, os sistemas formativos utilizam processos de deformação da matéria-prima, recorrendo à aplicação de forças ou calor (Dunn, 2012).

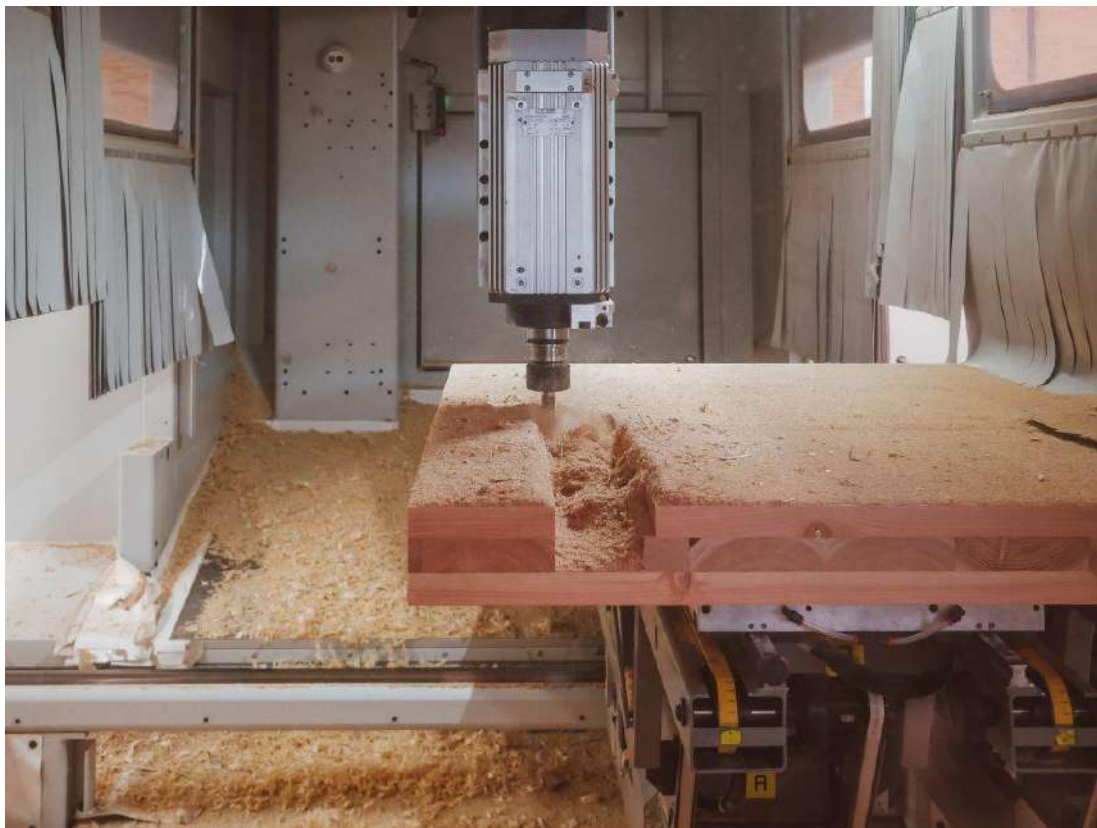


Figura 5. Fabricação Digital em *Mass Timber*. Fonte: TimberLab (2024).

A fabricação digital, em combinação com diferentes sistemas estruturais, ampliam significativamente as diversas possibilidades no processo de design e construção.

2.2. Componentes Estruturais

A construção em *Mass Timber* recorre a um conjunto de componentes de novos materiais estruturais que podem substituir os materiais tradicionais, como o betão armado e o aço estrutural (Kumar et al., 2024). Estes elementos incluem:

- Cross Laminated Timber (CLT);
- Glued Laminated Timber (GLT);
- Laminated Veneer Lumber (LVL);
- Nail Laminated Timber (NLT);
- Dowel Laminated Timber (DLT).

No entanto, atualmente o *Mass Timber* utiliza essencialmente os componentes CLT e GLT.

2.2.1. Cross Laminated Timber

De acordo com Brandner et al. (2016), o CLT foi desenvolvido na década de 1990 pela indústria de carpintaria, com o objetivo de valorizar tábuas consideradas desperdício à época. Este material é um derivado da madeira constituído por lamelas coladas de forma cruzada (ver figura 6). Esta disposição cruzada das lamelas reduz a anisotropia característica da madeira, promovendo a uniformização do comportamento estrutural nas duas direções principais do painel.

Segundo a norma europeia EN 16351:2015 *Timber structures - Cross laminated timber - Requirements*, o CLT é produzido a partir de laminações de madeira provenientes das seguintes espécies: Abeto, Sequoia do pinheiro silvestre, Abeto Douglas, Cicuta do Oeste, Pinheiro Córsega, Pinheiro Austríaco, Lariço Europeu, Lariço Siberiano, Lariço Dahuriano, Choupo, Pinheiro Bravo, Pinheiro Radiata, Abeto de Sitka, Pinheiro amarelo do Sul, Cedro Vermelho Ocidental e Cedro Amarelo.

Os painéis de CLT são compostos por 3, 5 ou 7 camadas, embora, em casos específicos, possam ser produzidos com um número superior de camadas, dependendo das exigências e particularidades do projeto. De forma geral, os painéis de 3 ou 5 camadas, com espessuras compreendidas entre 80 e 120 mm, são frequentemente aplicados em paredes, enquanto os painéis de 5 ou 7 camadas, com espessuras entre 140 e 200 mm, são utilizados em lajes. Contudo, tanto a espessura quanto o número de camadas podem variar

em função das especificidades de cada projeto. Podem ter um comprimento até 14,8 m e uma largura até 4,8 m.

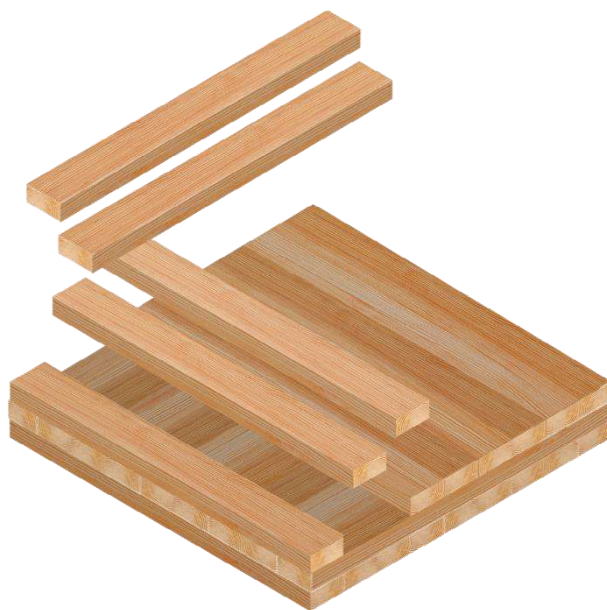


Figura 6. Configuração do painel CLT. Fonte: Luthi (2022).

Pelas suas características mecânicas, os painéis CLT são aplicados em paredes estruturais e em lajes de piso e coberturas. Estes elementos têm alta resistência, quando comparado com o seu peso, boa capacidade de isolamento térmico e bom comportamento ao fogo (Brandner et al., 2016).

2.2.2. Glued Laminated Timber

O GLT começou a ser desenvolvido no início do século XX na Alemanha por Otto Hetzel em 1906, tendo sido produzido em massa a partir de 1920. Como a denominação sugere, trata-se de camadas ou lamelas coladas justapostas topo a topo, isto é, quando termina a peça de madeira cola-se a próxima peça (ver figura 7). A fixação pode ser feita verticalmente, dando origem a vigas com inércias variáveis, ou horizontalmente (Wei et al., 2019). Pode ser curvado devido às características do seu processo de fabricação e composição estrutural. Este material é constituído por várias lâminas de madeira coladas entre si com adesivos estruturais de alta resistência, que permitem moldá-lo em formas curvas de forma precisa e controlada.



Figura 7. Finger joints. Fonte: Sviták et al. (2014).

De acordo a norma europeia EN 14080:2019 *Timber structures – Glued laminated timber - Requirements*, o GLT é produzido a partir de laminações de madeira provenientes das seguintes espécies: Abeto, Larício e Pinho.

De acordo com as suas características mecânicas, os painéis GLT são aplicados em vigas, pilares, estruturas de pavimentos e coberturas. As lamelas apresentam, em geral, uma espessura que varia entre 80 mm e 280 mm e um comprimento compreendido entre 27 m e 42 m em casos especiais. Estas são unidas longitudinalmente por meio de juntas dentadas (*Finger Joints*), dispostas de forma aleatória ao longo do eixo da peça, assegurando a continuidade estrutural e o desempenho mecânico adequado (Hasslacher, 2024).

As *finger joints*, constituem um sistema de ligação utilizado para a união de peças em madeira com o objetivo de melhorar a resistência mecânica e otimizar a eficiência estrutural da ligação, assim como acrescentam uma melhoria da resistência da peça, devido à sua capacidade de distribuir as tensões ao longo de uma maior área de contacto entre as superfícies unidas.

De acordo com Sciomenta et al. (2024), as *finger joints* desempenham um papel crucial no desempenho do GLT, sendo frequentemente consideradas o fator dominante na capacidade de carga dos elementos estruturais (ver figura 8). Estas conexões representam um dos aspetos mais desafiantes, uma vez que influenciam significativamente a resistência à tração e à flexão das lamelas. O comprimento dos "dedos" utilizado é, geralmente, de 20 mm, embora comprimentos superiores sejam também adequados. Assim, quanto mais longas e finas forem as *finger joints*, maior será a resistência mecânica resultante.

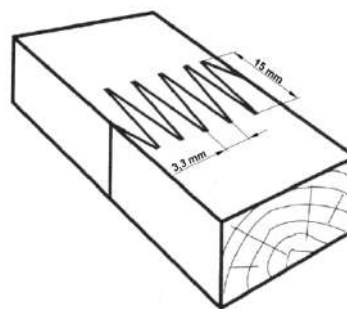


Figura 8. Finger joints. Fonte: Sviták et al. (2014).

2.2.3. Laminated Veneer Lumber

O LVL é produzido através da colagem de folhas finas de madeira obtidas pelo desenrolamento dos troncos, estas folhas são dispostas paralelamente entre si, de forma a minimizar o impacto destas na resistência estrutural das placas (ver figura 9) (Cachim, 2014).

A particularidade de o LVL ser fabricado a partir de folheados confere-lhe um desempenho superior em comparação com a madeira maciça. A sua constituição limita os potenciais defeitos da madeira à espessura de cada camada de folheado, promovendo uma distribuição uniforme dessas imperfeições ao longo do material. Como resultado, trata-se de um produto estruturalmente uniforme e de elevada resistência, com a vantagem adicional de poder ser produzido a partir de madeira proveniente de árvores jovens e de qualidade inferior (Almeida, 2009).



Figura 9. Painel LVL. Fonte: Whywood (2024).

Segundo o catálogo da empresa Kerto (2020), os painéis têm uma espessura que varia entre 27 mm e 75 mm e um comprimento mínimo de 2 m e máximo de 25 m. Estas são unidas longitudinalmente por meio de juntas dentadas, dispostas de forma aleatória ao longo do eixo da peça, assegurando a continuidade estrutural e o desempenho mecânico adequado.

De acordo com as suas características mecânicas, os painéis LVL são aplicados em vigas, treliças, caixilharias e em componentes de elementos de coberturas, pavimentos e paredes (Kerto, 2020).

2.2.4. Nail Laminated Timber

De acordo com Luthi (2022), o NLT é um material de construção centenário. É produzido através de madeira dimensional empilhada, fixada através de pregos ou parafusos de forma a formar um elemento estrutural sólido (ver figura 10). Estes pregos e parafusos concedem ao NLT uma resistência e durabilidade.

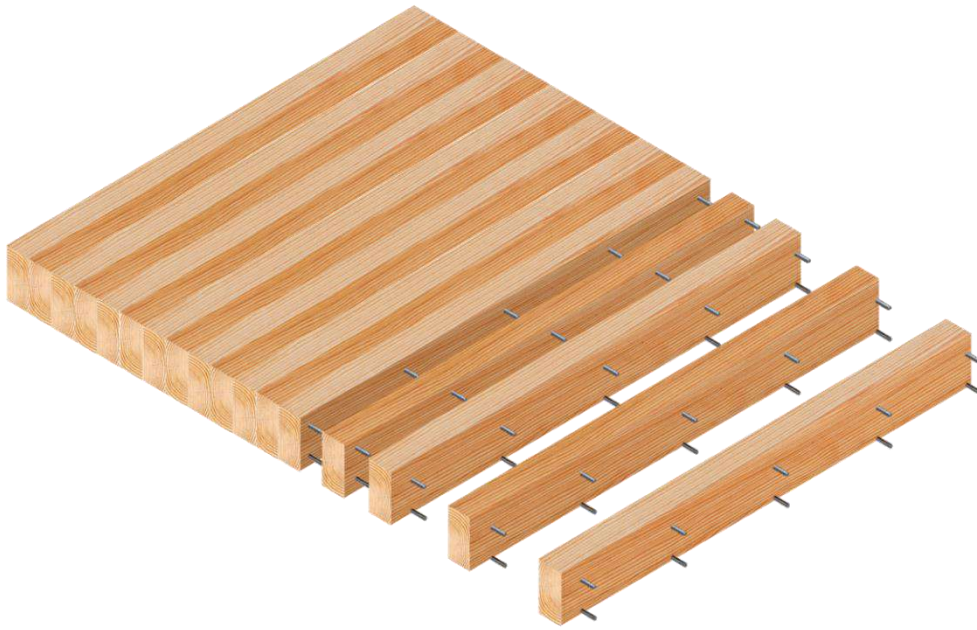


Figura 10. Configuração do painel NLT. Fonte: Luthi (2022).

Estes painéis podem ser utilizados como lajes, decks, paredes e escadas. A adição de contraplacado ou revestimento de placa de fibra orientada numa face do painel proporciona capacidade de suporte de carga, o que permite que este tipo de painel seja utilizado como parede de cisalhamento ou diafragma estrutural.

2.2.5. Dowel Laminated Timber

De acordo com Luthi (2022), os painéis DLT são compostos por tábuas de madeira empilhadas nas extremidades e ajustadas por fricção com cavilhas (ver figura 11). Semelhante ao NLT, estes painéis podem ser utilizados como paredes, lajes e escadas. É um componente totalmente feito de madeira, sem conectores metálicos, o que significa que pode ser facilmente processado e cortado através da fabricação digital.

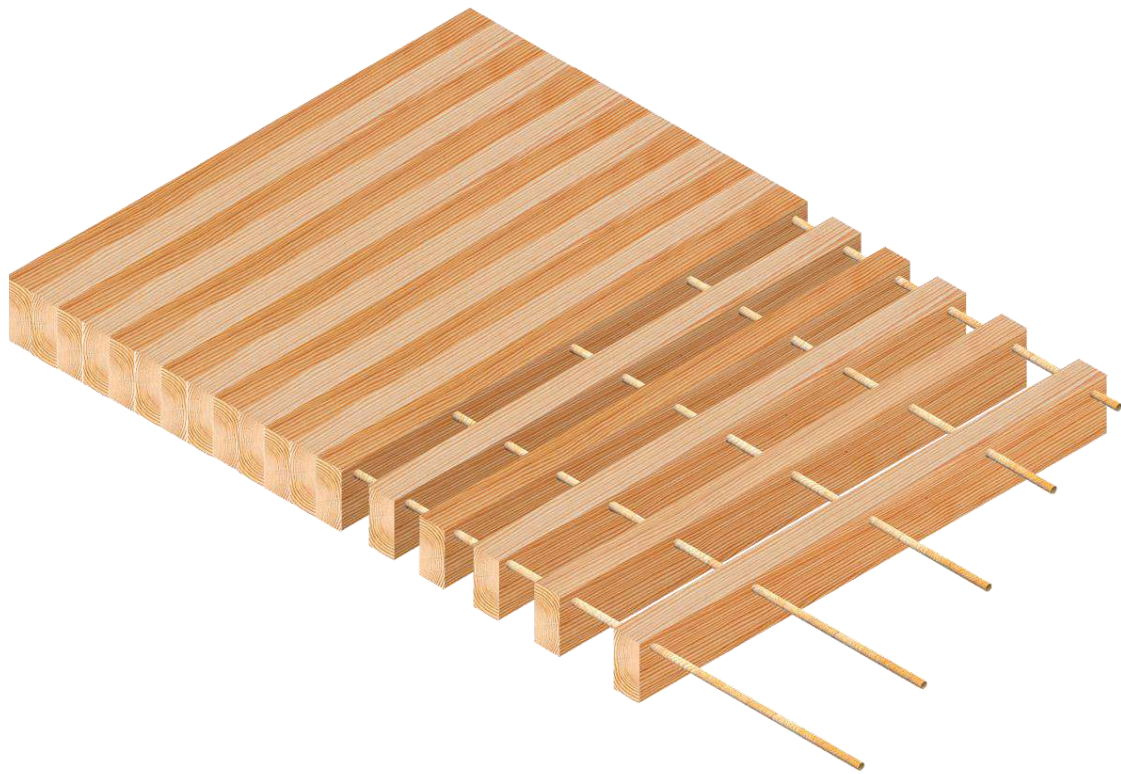


Figura 11. Configuração do painel DLT. FonteLuthi (2022)

2.3. Ligações no sistema *Mass Timber*

A madeira, enquanto material de construção, caracteriza-se pela sua facilidade de manuseio, permitindo uma ampla diversidade de métodos para a conexão de elementos, tanto entre si como com outros materiais. As ligações estruturais em madeira podem ser classificadas em três categorias principais:

- Ligações mecânicas;
- Ligações adesivas;
- Sambladuras.

2.3.1. Ligações mecânicas

As ligações mecânicas são as mais utilizadas no *Mass Timber*. Constituem um sistema de dispositivos de união que utiliza fixadores metálicos para conectar componentes de madeira. Os elementos de fixação penetram nas superfícies da madeira, contribuindo para a estabilização da estrutura e para o aumento da sua resistência global (TRADA Technology, 2012). Este conjunto de ligações mecânicas dividem-se em duas categorias

principais, as ligações reversíveis e as ligações não reversíveis (ver figura 12). No entanto, as ligações reversíveis podem ser classificadas em 3 grupos:

- Ligações ocultas;
- Ligações semiocultas;
- Ligações não ocultas.

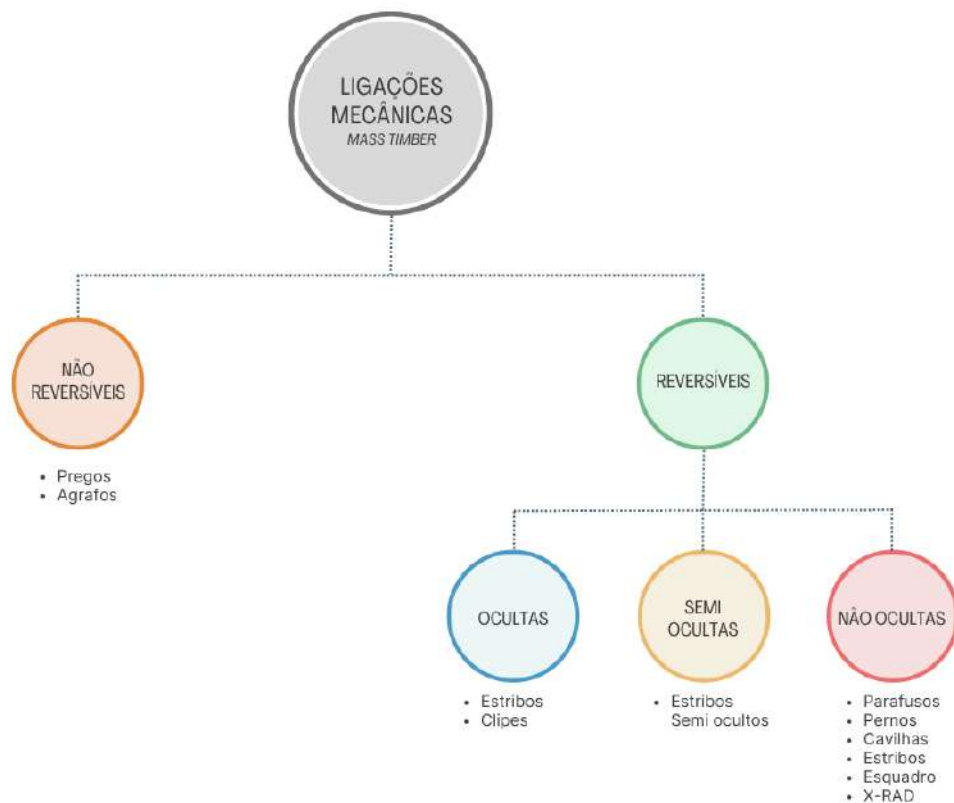


Figura 12. Diagrama das ligações mecânicas empregues nos sistemas *Mass Timber*.

2.3.1.1. Ligações mecânicas – não reversíveis

As ligações classificadas como não reversíveis são aquelas em que a remoção do elemento de ligação implica a destruição parcial do componente associado e o comprometimento da sua integridade. Como exemplos de ligações deste tipo, destacam-se os pregos, os agrafos e os rebites.

2.3.1.2. Ligações mecânicas - reversíveis

As ligações classificadas como reversíveis são aquelas em que a remoção do elemento de ligação não compromete a integridade do componente associado. Como exemplos de ligações deste tipo, destacam-se os parafusos, as cavilhas, os estribos, as

ligações angulares, as ligações em T, as chapas de reforço estrutural, os conectores em anel e os conectores de superfícies e contraventamento (ver tabelas 7).

Tabela 7. Ligações não ocultas.

Ligação pilar/lage
Rothoblaas ®



**Ligação
fundação/pilar**
Rothoblaas ®



X-RAD
Rothoblaas ®



**Esquadro
Estrutural**
Simpson ®



Tabela 7. Ligações não ocultas (continuação).

Estribo Suporte
Viga
Rothoblaas ®



Parafuso
Rothoblaas ®



Tabela 8. Ligações ocultas.

Estribo
Simpson ®



Chapa de engate
Rothoblaas ®



Tabela 8. Ligações ocultas (continuação).

Estribo
Wovar ®



2.3.2. Ligações Adesivas

Este tipo de ligação baseia-se na utilização de colas e resinas aplicadas entre dois elementos de madeira, formando, após o endurecimento do adesivo, uma ligação forte e duradoura. Um dos aspetos mais relevantes desta abordagem é a capacidade das cargas serem distribuídas por uma ampla área de superfície do adesivo. Este fator reduz significativamente o risco de falhas relacionadas com o corte nos pontos de concentração de tensões, um problema frequentemente associado às ligações mecânicas, como às juntas aparafusadas ou rebitadas.

Contudo, é imprescindível um controlo rigoroso de todo o processo de fabrico, o qual deve ser conduzido em conformidade com os padrões específicos do produto em questão. Existem três principais tipos de adesivos utilizados na colagem de madeira: formaldeído, resina epóxi e poliuretano. Destes, apenas as resinas epóxi são empregues em aplicações especializadas (TRADA Technology, 2012). Este tipo de ligação pode ser empregue em simultâneo com as ligações mecânicas, permitindo uma integração eficiente entre os diferentes sistemas de fixação. No entanto, não é reversível.

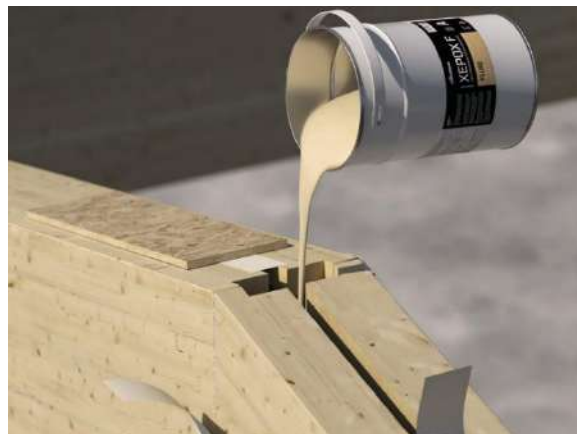


Figura 13. Adesivo epoxídico bicomponente. Fonte: Rothoblaas (2024).

2.3.3. Sambladuras

A madeira é um material com propriedades marcadamente direcionais, sendo que a resistência de uma ligação é, geralmente, condicionada pelas propriedades da madeira na sua direção mais fraca, seja em compressão ou em flexão. A capacidade de suporte de um pilar sobre uma viga, por exemplo, é determinada pela resistência à compressão na direção da fibra. De forma semelhante, a resistência de uma espiga em cunha pode ser limitada pela resistência ao cisalhamento na secção adjacente ao encaixe (ver figura 14).

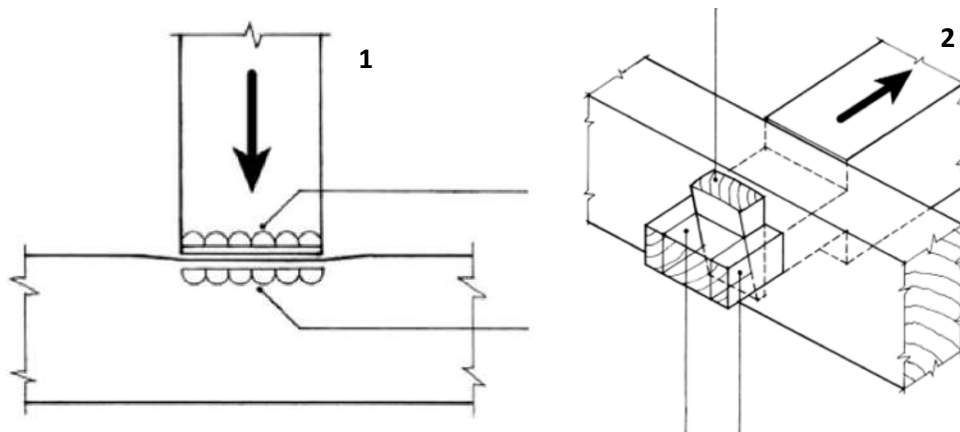


Figura 14. Resistência à compressão (1) e resistência ao cisalhamento (2). Adaptado de TRADA Technology (2012).

As sambladuras permitem a conexão de elementos estruturais por meio de dois tipos principais de juntas, proporcionando diferentes soluções construtivas consoante as exigências do projeto (TRADA Technology, 2012).

Os tipos de juntas principais são:

- Juntas de entalhe;
- Juntas cruzadas.

2.3.3.1. Juntas de emechadas

As juntas de entalhe são executadas por meio de uma respiga, ou seja, uma lingueta que se projeta de um dos elementos e se encaixa numa mecha correspondente no outro elemento. Este tipo de junta pode, igualmente, ser utilizado em configurações de contraventamento angular. Para garantir a eficácia desta solução, é necessária a aplicação

de pinos cónicos, que asseguram um contacto firme entre os elementos, evitando deformações indesejadas nas peças.

O reforço da ligação é utilizado quando existe a necessidade de aumentar a capacidade de carga dos elementos, o que implica diretamente o aumento da capacidade de carga da ligação, uma vez que a ligação está sujeita a maior concentração de esforços. O reforço pode ser obtido através de cunhas em madeira, pregos e parafusos (Barbosa, 2015).

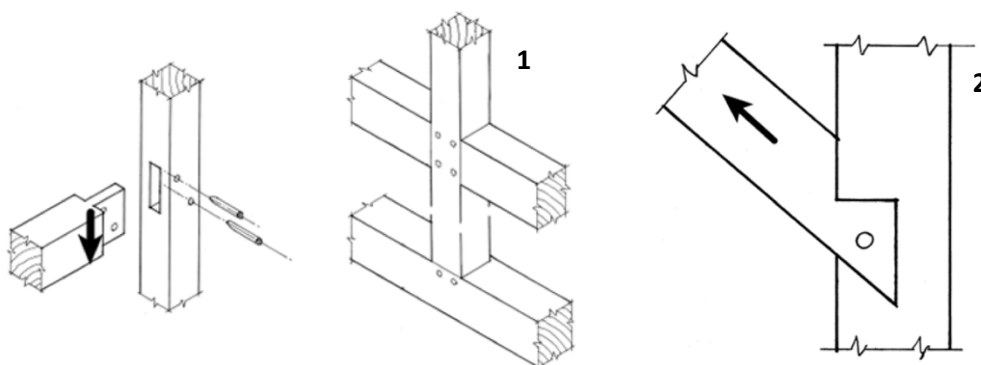


Figura 15. Ligações de encaixe (1) e encaixe por contraventamento (2). Adaptado de TRADA Technology (2012).

Um exemplo arquitetónico que recorre a este tipo de juntas é o Museu Ponte de Madeira Yusuvara (ver figura 16), projetado por Kengo Kuma no Japão, em 2010. Este edifício destaca-se pelo uso inovador da madeira e pela sua abordagem estrutural baseada em sistemas de encaixe tradicionais. A solução de ligação utilizada neste projeto reflete uma interpretação contemporânea da carpintaria japonesa, combinando técnicas ancestrais de união com reforço, utilizando elementos metálicos visíveis, favorecendo a resistência mecânica e a expressividade do material.



Figura 16. Museu Ponte de Madeira Yusuhara, Kengo Kuma 2010. Fonte: Kengo Kuma Associates (2010b).

As ligações estruturais seguem a lógica do sistema de encaixes modulados que permite a conexão eficiente de vigas e pilares, criando uma estrutura coesa sem comprometer a estética do espaço (ver figura 17). Este método possibilita a absorção de cargas e tensões ao distribuir uniformemente os esforços ao longo das peças de madeira. Além disso, este sistema permite futuras modificações ou desmontagens, alinhando-se aos princípios da arquitetura sustentável e reversível.

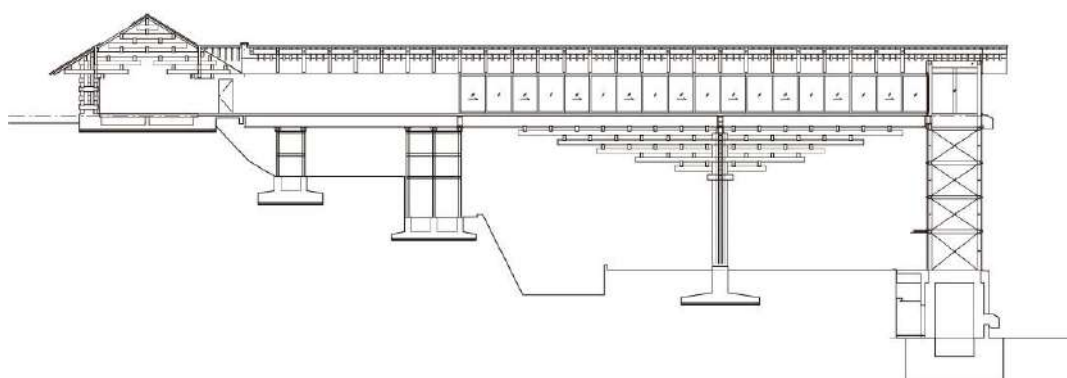


Figura 17. Corte construtivo do Museu Ponte de Madeira Yusuhara, Kengo Kuma 2010. Fonte: Kengo Kuma Associates (2010b).

No teto do edifício, observa-se um padrão geométrico de elementos em consola, reforçado por encaixes múltiplos que criam um efeito visual dinâmico e garantem resistência estrutural. Esta solução não apenas enfatiza a plasticidade do material, mas também maximiza a integração entre os componentes da estrutura.

A escolha de uma abordagem modular nas ligações evidencia a influência da construção pré-fabricada e da montagem com precisão milimétrica, características centrais na obra de Kengo Kuma.

2.3.3.2. Juntas cruzadas

As juntas cruzadas oferecem um grau limitado de resistência à tração, resultante da capacidade de corte no ponto de interseção. No caso específico da ligação por cruzamento em cunha, esta solução confere também resistência à tração, apresentando um poder de aperto considerável, que pode mobilizar de forma significativa a flexão das peças envolvidas. Um exemplo característico encontrado em estruturas tradicionais é o cruzamento de uma peça com corte em forma de cauda com outra peça dotada de respiga. Nesta configuração, uma viga suporta uma treliça do telhado, enquanto a estabilidade lateral é garantida pela parede adjacente.

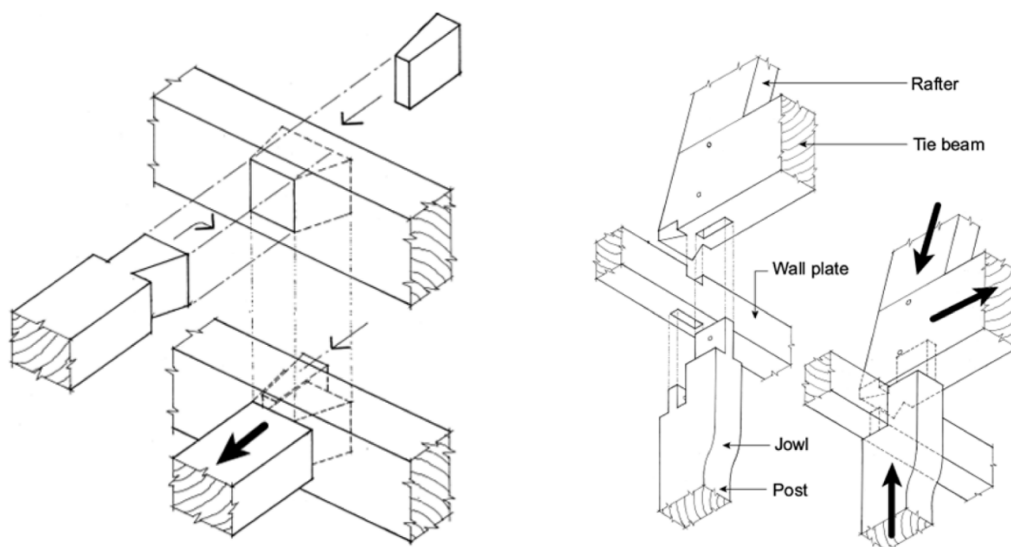


Figura 18. Ligação por cunha. Adaptado de TRADA Technology (2012).

Um exemplo arquitetônico que recorre a este tipo de juntas é GC Prostho Museum Research Center (ver figura 19), projetado por Kengo Kuma & Associates no Japão, em 2010. É um exemplo paradigmático da fusão entre técnicas tradicionais de carpintaria japonesa e inovação contemporânea no uso da madeira como material estrutural.



Figura 19. GC Prostho Museum Research Center, Kengo Kuma 2010. Fonte: Kengo Kuma Associates (2010a).

O projeto emprega um sistema de encaixes cruzados onde as peças de madeira se interligam ortogonalmente, formando uma malha tridimensional autoportante (ver figura 20). Esta técnica, inspirada na carpintaria tradicional japonesa, permite a montagem da estrutura sem a necessidade de pregos ou parafusos visíveis. Neste sistema, as peças de madeira entrelaçam-se em diferentes direções, formando uma malha tridimensional interconectada. Esta abordagem permite criar uma estrutura autoportante, onde a distribuição uniforme das cargas reduz a necessidade de elementos verticais adicionais, proporcionando uma sensação de leveza e transparência espacial.

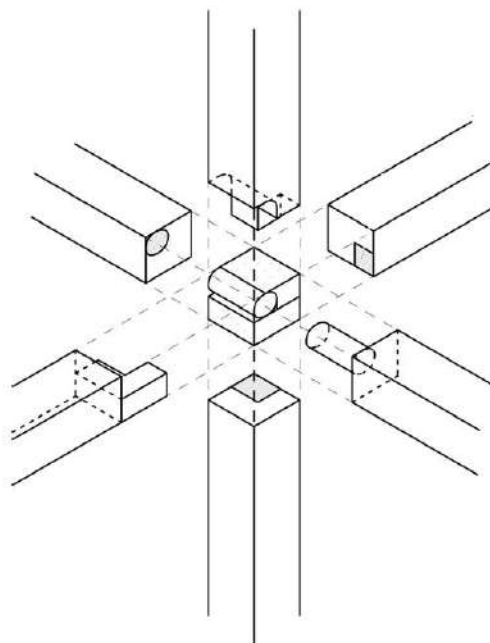


Figura 20. Pormenor construtivo do GC Prostho Museum Research Center, Kengo Kuma 2010. Fonte: Kengo Kuma 2010. Fonte: Kengo Kuma Associates (2010a).

O uso das juntas cruzadas neste projeto reforça a abordagem de Kengo Kuma na desmaterialização da arquitetura, promovendo um jogo de transparências, sombras e texturas, ao mesmo tempo que garante resistência e estabilidade estrutural.

O projeto que representa um marco na aplicação de técnicas tradicionais de sambladura à construção contemporânea em madeira, é o Tamedia Office, concebido por Shigeru Ban em 2013. O edifício, localizado em Zurique, destaca-se pelo seu sistema estrutural inovador, no qual os elementos de *Mass Timber* foram projetados para se interligarem sem necessidade de fixações metálicas ou adesivos estruturais (ver figura 21). Em vez disso, recorreu-se à utilização de sambladuras da tradição da arquitetura japonesa, um método de encaixe preciso que permite a conexão dos componentes exclusivamente através da sua geometria.



Figura 21. Tamedia Office, Shigeru Ban 2013. Fonte: Montilha et al. (2014).

A conceção estrutural do edifício baseia-se na utilização de GLT e no princípio de encaixe, onde as vigas e pilares se interligam de forma eficiente, otimizando a transferência de cargas e melhorando o desempenho global da estrutura (ver figura 22). A ausência de ligações metálicas não só reforça o carácter sustentável da construção, ao reduzir a pegada de carbono associada à produção e transporte de materiais adicionais, mas também evidencia a viabilidade das técnicas tradicionais na arquitetura contemporânea.



Figura 22. Sistema de ligação do edifício Tamedia Office, Shigeru Ban 2013. Fonte: Archdaily (2014)

A conceção estrutural do Tamedia Office foi inteiramente desenvolvida e executada por meio de processos de fabricação digital (ver Figura 23).



Figura 23. Fabricação digital do edifício Tamedia Office, Shigeru Ban 2013. Fonte: Archdaily (2014)

Uma característica do sistema adotado no Tamedia Office é a configuração oval das vigas, que impede a sua rotação e, consequentemente, confere maior estabilidade ao edifício. Esta solução estrutural permite uma absorção eficiente das forças laterais, mitigando uma das principais limitações associadas às ligações por encaixe em estruturas de madeira. Desta forma, a estabilidade do edifício é garantida sem comprometer a estética minimalista e a expressão formal do material, características essenciais na abordagem arquitetónica de Shigeru Ban.

Além dos benefícios estruturais, o uso de ligações por sambladura no Tamedia Office reflete um compromisso com a sustentabilidade e a eficiência construtiva. A estratégia de pré-fabricação, aliada à montagem sem necessidade de utilizar adesivos ou ligações metálicas, reduz significativamente o impacto ambiental da obra e reforça a durabilidade e a reversibilidade da estrutura. Assim, o edifício não apenas materializa a fusão entre tradição e inovação, como também estabelece um novo paradigma para o uso da madeira na arquitetura do século XXI.

3. Pré-fabricação em *Mass Timber*

3. Pré-fabricação em *Mass Timber*

3.1. Evolução da pré-fabricação

A pré-fabricação, enquanto metodologia construtiva, transcende as práticas convencionais da construção ao integrar os processos industriais sistematizados com a conceção arquitetónica. Esta abordagem emergiu em contextos de pressão social, como a Revolução Industrial e os esforços da reconstrução pós-guerra, quando soluções habitacionais de alta eficiência eram necessárias (Hogan-O'Neill, 2021).

A pré-fabricação tem as suas primeiras manifestações no século XIX, particularmente impulsionadas pela necessidade de habitações rápidas e acessíveis durante a expansão colonial britânica. Um dos primeiros exemplos significativos foi a exportação de casas pré-fabricadas para a Austrália e a América do Norte, onde os pioneiros necessitavam de estruturas leves e de rápida montagem, conforme descrito por Kronenburg (1996), que destaca a eficiência da montagem de edifícios modulares e a redução do tempo de construção na arquitetura industrializada.

Durante a Revolução Industrial, o aparecimento de materiais padronizados e a mecanização permitiram que a pré-fabricação evoluísse, criando modelos replicáveis de habitação. A utilização de elementos modulares foi facilitada pela disponibilidade de novos materiais como o ferro fundido e, posteriormente, o betão e o aço (Kronenburg, 1996).

No início do século XX, a arquitetura pré-fabricada britânica evoluiu significativamente, particularmente após a Primeira e a Segunda Guerra Mundial, quando a escassez de habitação levou à adoção de soluções rápidas e eficientes. Os "Prefabs", casas pré-fabricadas introduzidas pelo governo britânico no pós-guerra, foram um marco na industrialização da construção. Estas habitações eram produzidas em fábrica e montadas rapidamente no local, oferecendo uma solução de curto prazo para a crise habitacional da época (Kronenburg, 1996).

A pré-fabricação surgiu como uma resposta às limitações das técnicas construtivas tradicionais. Ao longo do século XX, o desenvolvimento da indústria e o crescimento demográfico impulsionaram a procura por soluções habitacionais mais rápidas e economicamente acessíveis. A industrialização possibilitou a padronização de componentes construtivos, permitindo a produção em larga escala de elementos como painéis de parede, lajes e estruturas modulares (Staib et al., 2008).

De acordo com Hogan-O'Neill (2021), a pré-fabricação ou *off-site manufacturing* (OSM), implica a produção de elementos estruturais em fábricas especializadas, promovendo a padronização e a precisão técnica. É um processo que minimiza os desafios logísticos e os desperdícios característicos dos métodos convencionais, como também reduz as atividades realizadas na obra. É uma abordagem que resulta de soluções que aliam agilidade construtiva a garantia de qualidade.

Na construção pré-fabricada, é fundamental maximizar o potencial da produção industrial. Este processo permite alcançar um nível superior de qualidade, uma vez que a totalidade do trabalho é executada em condições controladas, reduzindo significativamente o desperdício. Além disso, a necessidade de adaptações ou ajustamentos em obra é minimizada, possibilitando a reciclagem eficiente dos resíduos gerados durante o processo de pré-fabricação (Herzog, 2004).

Buckminster Fuller constitui um exemplo paradigmático de pré-fabricação. Através das Dymaxion Houses, 1946, em particular a Wichita House (ver figura 24 e 25), Fuller demonstra que o edifício pode ser completamente pré-fabricado no que diz respeito aos seus módulos funcionais. O conceito subjacente à habitação é o de que, caso algum módulo necessite de reparação ou até mesmo substituição, este pode ser facilmente efetuado, uma vez que sempre existirão peças de reposição e processos de reparação disponíveis em fábrica.



Figura 24. Dymaxion Houses – Wichita House, Buckminster Fuller 1946. Fonte: C20 Society (2024).

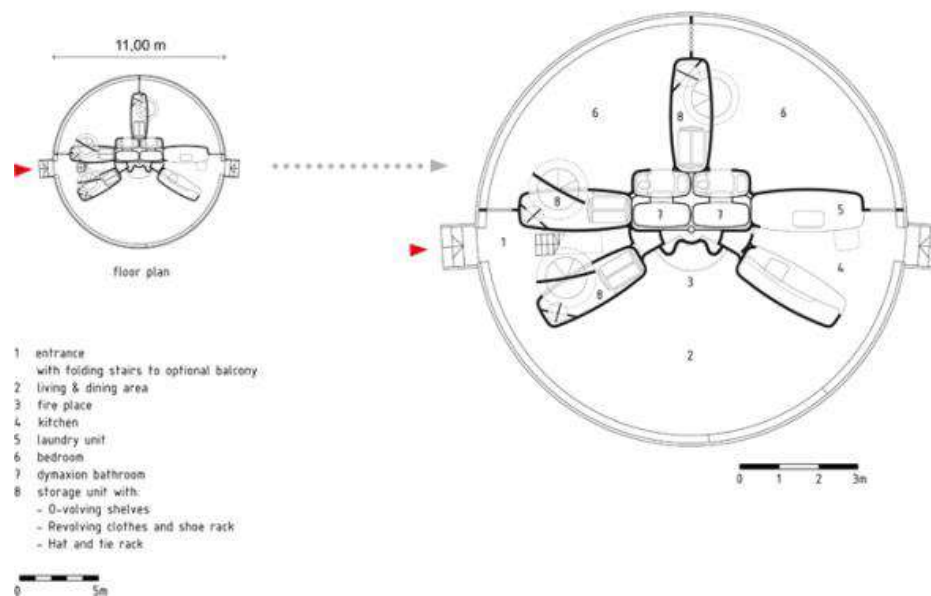


Figura 25. Dymaxion Houses – Wichita House, Buckminster Fuller 1946. Fonte: C20 Society (2024).

Buckminster Fuller via a Dymaxion House como a materialização da sua filosofia de design, baseada em eficiência, sustentabilidade e industrialização. Ele defendia que as casas do futuro deveriam ser leves, eficientes, fáceis de montar e autossuficientes. Fuller acreditava que a arquitetura precisava abandonar a ineficiência dos métodos tradicionais e abraçar a inovação. Para ele, a Dymaxion House era um exemplo de como era possível construir casas mais leves, resistentes e econômicas, usando menos materiais e menos energia.



Figura 26. Montagem da Dymaxion Houses – Wichita House, Buckminster Fuller. Fonte: uckminster Fuller (2023).

Apesar das suas vantagens evidentes, a pré-fabricação enfrentou historicamente uma resistência significativa, em grande parte devido à percepção de inferioridade estética e à sua associação com soluções temporárias de baixo custo. Exemplos como os abrigos Uni-SECO (ver figura 27), desenvolvidos no Reino Unido no período pós-guerra, ilustram como a primazia da funcionalidade frequentemente se sobrepôs às considerações arquitetônicas. Os avanços tecnológicos, aliados à integração de práticas de design nos processos industriais, têm progressivamente transformado esta percepção. Atualmente, a pré-fabricação é reconhecida como uma abordagem especializada, capaz de gerar espaços que conciliam criatividade e eficiência (Hogan-O'Neill, 2021).



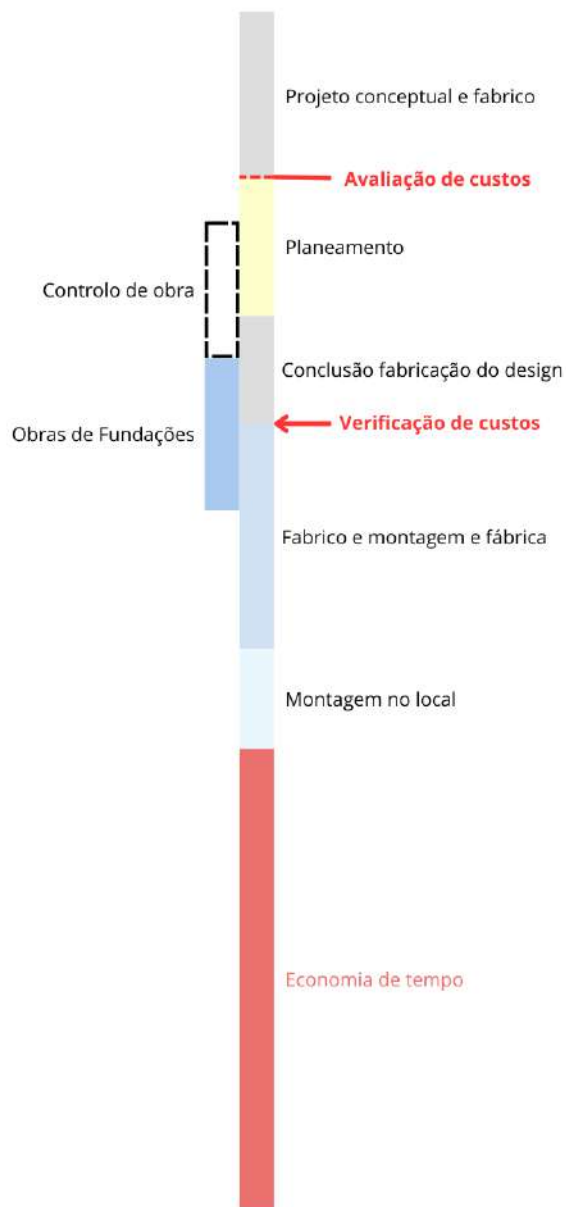
Figura 27. Casa pré-fabricada SECO – Catford, Londres. Fonte: Hogan-O'Neill (2021)..

A implementação da pré-fabricação enfrenta diversos desafios, nomeadamente questões logísticas associadas ao transporte e à montagem de componentes de grande dimensão, bem como a resistência cultural à adoção de sistemas construtivos não tradicionais. (Staib et al., 2008).

De acordo com Hogan-O'Neill (2021), a metodologia da pré-fabricação permite que a produção modular seja realizada em ambiente fabril simultaneamente ao

desenvolvimento dos trabalhos preliminares no local, tais como a execução das infraestruturas e fundações. Após a conclusão da produção, os módulos são transportados para o local da obra e montados de forma expedita, resultando numa significativa redução do tempo total de construção. Em contraste, a construção convencional segue uma sequência distinta de etapas. Após a fase de concepção do projeto, verifica-se um período prolongado dedicado ao planeamento e ao desenvolvimento técnico, antecedendo o início da obra. Apenas após a finalização dessa etapa é possível dar início aos trabalhos preliminares, como a execução das infraestruturas e fundações. Além disso, a construção ocorre integralmente no local, o que prolonga o processo e o torna mais suscetível a imprevistos (ver figura 28).

Construção Pré-Fabricada:



Construção Convencional:

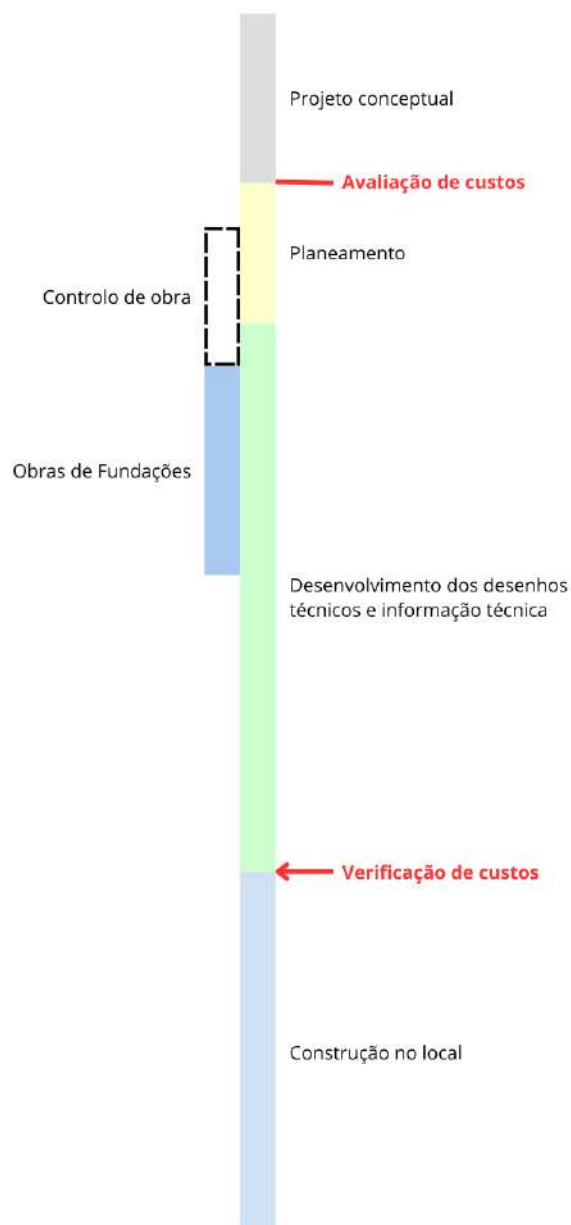


Figura 28. Cronogramas de construção pré-fabricada e construção convencional. Adaptado de Hogan-O'Neill (2021).

Após a análise da figura 29, conclui-se que a construção pré-fabricada oferece vantagens significativas na redução do tempo de execução, na otimização da eficiência operacional e na maior previsibilidade de custos. Estas características consolidam a pré-fabricação como uma solução cada vez mais pertinente para responder aos desafios contemporâneos do setor da construção.

A modularidade constitui um elemento fundamental na metodologia da pré-fabricação, sendo fundamental para a racionalização do processo construtivo e para a otimização dos recursos envolvidos. Esta abordagem assenta na subdivisão da construção em unidades independentes, as quais podem ser classificadas em componentes modulares e módulos. Embora estes conceitos possam, à primeira vista, parecer similares, apresentam distinções essenciais no seu papel e aplicação dentro do processo de construção modular.

A principal diferença entre os dois conceitos reside, assim, na escala e no grau de autonomia funcional. Esta distinção reflete-se diretamente na estratégia de projeto e na abordagem construtiva, influenciando a flexibilidade, o transporte, a montagem e a adaptabilidade da edificação ao longo do seu ciclo de vida.

3.2. Componentes modulares em *Mass Timber*

De acordo com Hogan-O'Neill (2021), os componentes modulares referem-se a elementos individuais ou sistemas que, apesar de fabricados separadamente, são projetados (paredes, lajes e vigas) para funcionar em conjunto dentro de um sistema maior (ver figura 29).



Figura 29. Construção pré-fabricada através de componentes modulares. Fonte: Tamarack Media (2024).

Os componentes têm assumido um papel de destaque na pré-fabricação devido à sua versatilidade e eficiência. São concebidos para serem produzidos de forma padronizada e montados no local da construção, minimizando a necessidade de adaptações significativas (Staib et al., 2008).

Os avanços tecnológicos na produção de componentes modulares, nomeadamente a automação em ambiente fabril e a utilização de técnicas de modelação digital, como o *Building Information Modeling* (BIM), têm ampliado o potencial da pré-fabricação, ao viabilizar uma integração mais estreita entre o design e a manufatura. Esta sinergia permite um planeamento detalhado de cada componente, reduzindo inconsistências na fase de montagem em obra e promovendo uma utilização mais eficiente dos materiais (Hogan O'Neill, 2021).

Um exemplo arquitetónico que recorre a este sistema é o edifício Brock Commons Tallwood House, projetado por Acton Ostry Architects em Vancouver, 2017, representando um marco na construção modular pré-fabricada em *Mass Timber* (ver figura 30).



Figura 30. Brock Commons Tallwood House, Acton Ostry Architects. Fonte: Archdaily (2018).

A estrutura do edifício foi concebida através de um sistema híbrido que integra componentes modulares em *Mass Timber*, que foram pré-fabricados fora do local e montados rapidamente on site e elementos tradicionais em betão (ver figura 31). A modularidade do projeto revelou-se fundamental para a sua eficiência construtiva. Os painéis de CLT e os elementos estruturais foram fabricados com precisão milimétrica em ambiente controlado, garantindo qualidade, minimizando desperdícios e facilitando a logística de montagem.



Figura 31. Módulo estrutural, Brock Commons Tallwood House. Fonte: Archdaily (2018).

3.3. Módulo pré-fabricado em *Mass Timber*

De acordo com Hogan-O'Neill (2021), os módulos representam unidades tridimensionais completas, que podem ser entregues no local da construção já equipadas com acabamentos, sistemas hidráulicos, elétricos e até móveis instalados (ver figura 32). São estruturas volumétricas que integram diversos elementos numa única unidade coesa.

Os módulos são unidades de maior dimensão e caráter autónomo, concebidos para serem transportados e montados de forma eficiente, acelerando o processo construtivo. A agregação destes módulos individuais dá origem a um edifício. Estes podem ser classificados em diferentes tipologias, tais como:

- Módulos estruturais;
- Módulos de serviço;
- Módulos habitacionais completos.

Os módulos estruturais desempenham um papel fundamental na composição e estabilidade do sistema modular. São concebidos para suportar cargas e garantir a integridade estrutural do edifício. Dependendo da configuração do sistema modular, os módulos estruturais podem assumir diversas formas sendo otimizados para facilitar a montagem e desmontagem, reforçando a lógica de construção reversível. Os módulos de serviço integram sistemas hidráulicos e elétricos. Os módulos habitacionais completos são aplicáveis tanto em edifícios temporários, como em edifícios permanentes (Staib et al., 2008).



Figura 32. Construção pré-fabricada através de módulos em *Mass Timber*. Edifício Sara Cultural Center, Skellefteå. Fonte: Archdaily (2023).

O projeto Revier Mountain Lodge, projetado por Carlos Martinez Architekten em 2017, é um exemplo da aplicação de módulos pré-fabricados em *Mass Timber* na arquitetura residencial sustentável. (ver figura 33).



Figura 33. Revier Mountain Lodge, Carlos Martinez Architekten, Suíça 2017. Fonte: Lins (2017).

O Revier Mountain Lodge, localizado em Lenzerheide na Suíça, foi desenvolvido para proporcionar eficiência e sustentabilidade, este hotel adota um sistema modular baseado em unidades de CLT, pré-fabricadas em fábrica e transportadas para o local de instalação.

A abordagem modular do Revier Mountain Lodge permitiu uma montagem extremamente rápida, reduzindo os custos e minimizando os resíduos de construção. Os módulos foram concebidos para maximizar o conforto térmico e acústico, proporcionando uma experiência de alojamento eficiente e sustentável. A utilização de *Mass Timber* como principal material estrutural reforça o compromisso ambiental do projeto, reduzindo significativamente a pegada de carbono associada à construção.



Figura 34. Módulo em *Mass Timber* do edifício Revier Mountain Lodge, Carlos Martinez Architekten 2017. Fonte: Lins (2017).

Além disso, a flexibilidade modular do Revier Mountain Lodge permite futuras expansões e reconfigurações, adaptando-se às necessidades do turismo sustentável e promovendo uma abordagem inovadora à hotelaria. Este projeto demonstra como a construção modular em *Mass Timber* pode oferecer soluções rápidas, eficientes e ambientalmente responsáveis para o setor da hospitalidade, estabelecendo um modelo replicável para futuras iniciativas de alojamento sustentável.

3.3.1. Sistema Híbrido

Paralelamente ao sistema de módulos pré-fabricados em *Mass Timber*, têm surgido sistemas híbridos.

Conforme Barbosa (2023), o sistema híbrido combina vários sistemas, podendo variar dependendo da escolha dos sistemas e do edifício. São produzidos em fábrica os elementos mais simples, como lajes, paredes e algumas infraestruturas e as partes mais complexas do edifício são elaboradas em obra.

Na pré-fabricação em *Mass Timber*, o sistema híbrido consiste na integração de componentes estruturais em *Mass Timber* com sistemas estruturais compostos por outros materiais, como o betão ou o aço. Um exemplo de um sistema híbrido é o sistema CREE, desenvolvido pela empresa austríaca CREE Buildings.

O sistema CREE permite a construção de edifícios híbridos em madeira de grande escala, caracterizados pela eficiência no uso de recursos e energia, sendo a sua montagem realizada no local. Através da combinação de *Mass Timber* com elementos estruturais em aço e betão, este sistema tira partido de materiais renováveis para oferecer uma solução construtiva sustentável e altamente eficiente para edifícios de múltiplos andares (ver figura 35).



Figura 35. Sistema híbrido CREE. Fonte: CREE Buldings (2021).

A laje de piso do sistema CREE consiste numa rede de painéis de lajes pré-fabricados híbridos de madeira. As dimensões totais do edifício consistem em múltiplas lajes em cada direção. A largura do painel de laje pode variar entre 2,50 e 3,00 m, enquanto o comprimento do painel é idealmente duas ou três vezes a sua largura (CREE Buldings, 2021).

Um exemplo que aplica o sistema CREE é o edifício The First Guimarães, projetado pelo arquiteto Mário Fernandes, em 2023 (ver figura 36), construído em parceria com a empresa Casais. Este edifício é o primeiro na Península Ibérica a ser

construído com esta abordagem híbrida, tornando-se um marco na construção modular e sustentável.



Figura 36. Sistema CREE, The First Guimarães, Grupo Casais 2023. Fonte: CREE Buldings (2021).

O The First Guimarães demonstra como o CREE System pode ser aplicado a projetos de grande escala. É um exemplo de como a arquitetura modular pré-fabricada em *Mass Timber* pode contribuir para a evolução da arquitetura sustentável em Portugal.

4. *Plug-in*

4.1. *Plug-in* na arquitetura

O conceito de *plug-in* na arquitetura permite que sistemas e componentes sejam removidos, adicionados ou substituídos sem comprometer a integridade estrutural do edifício, proporcionando um ambiente construído capaz de responder rapidamente às mudanças nas necessidades dos utilizadores (Schneider & Till, 2007). Esta abordagem potência um processo dinâmico e contínuo de transformação, permitindo que os espaços interiores respondam de forma flexível às alterações nas funções e atividades ao longo do tempo.

A arquitetura *plug-in* possibilita tanto a adição de novas estruturas como a modificação de estruturas existentes sem a necessidade de intervenções dispendiosas, promovendo uma abordagem que reconhece a incerteza e a mudança como fatores centrais na configuração do espaço habitado (Schneider & Till, 2007). Este paradigma permite a adaptação contínua dos ambientes interiores, assegurando a sua resposta às necessidades evolutivas dos utilizadores.

Para além da flexibilidade proporcionada pela arquitetura *plug-in*, a modularidade constitui um elemento fundamental deste conceito. A utilização de unidades modulares pré-fabricadas revela-se essencial para a promoção da eficiência energética e da sustentabilidade, permitindo uma gestão otimizada dos recursos e a redução das necessidades energéticas. Através da criação de módulos autónomos, é possível que cada módulo funcione de forma independente, ao mesmo tempo que se integra no sistema construtivo como um todo (Smith, 2010).

A adaptabilidade é um elemento central na arquitetura *plug-in*. Os edifícios modulares, concebidos com esta abordagem, operam quase como “organismos vivos”, ajustando-se ao contexto e às exigências do momento (Lawson et al., 2014). Esta abordagem não apenas reforça o conceito de uma arquitetura evolutiva, mas também promove a sustentabilidade, ao minimizar a necessidade de demolições e, consequentemente, a geração de resíduos.

A arquitetura *plug-in* configura um modelo inovador que incorpora os princípios da flexibilidade, sustentabilidade e personalização, promovendo a adaptação contínua dos espaços às necessidades dos utilizadores.

De forma a contextualizar o conceito de arquitetura *plug-in* enquanto abordagem inovadora, capaz de responder aos desafios de um ambiente construído que não apenas se ajusta às necessidades dos utilizadores, mas também repensa o papel do espaço na vida humana através da flexibilidade e da sustentabilidade, apresentam-se, a seguir, exemplos relevantes para o tema.

É essencial destacar o projeto *Plug-in City*. A *Plug-In City*, concebida pelo arquiteto Peter Cook e pelo grupo Archigram em 1964, constitui um dos exemplos mais visionários da aplicação do conceito *plug-in* na arquitetura (ver figura 37).

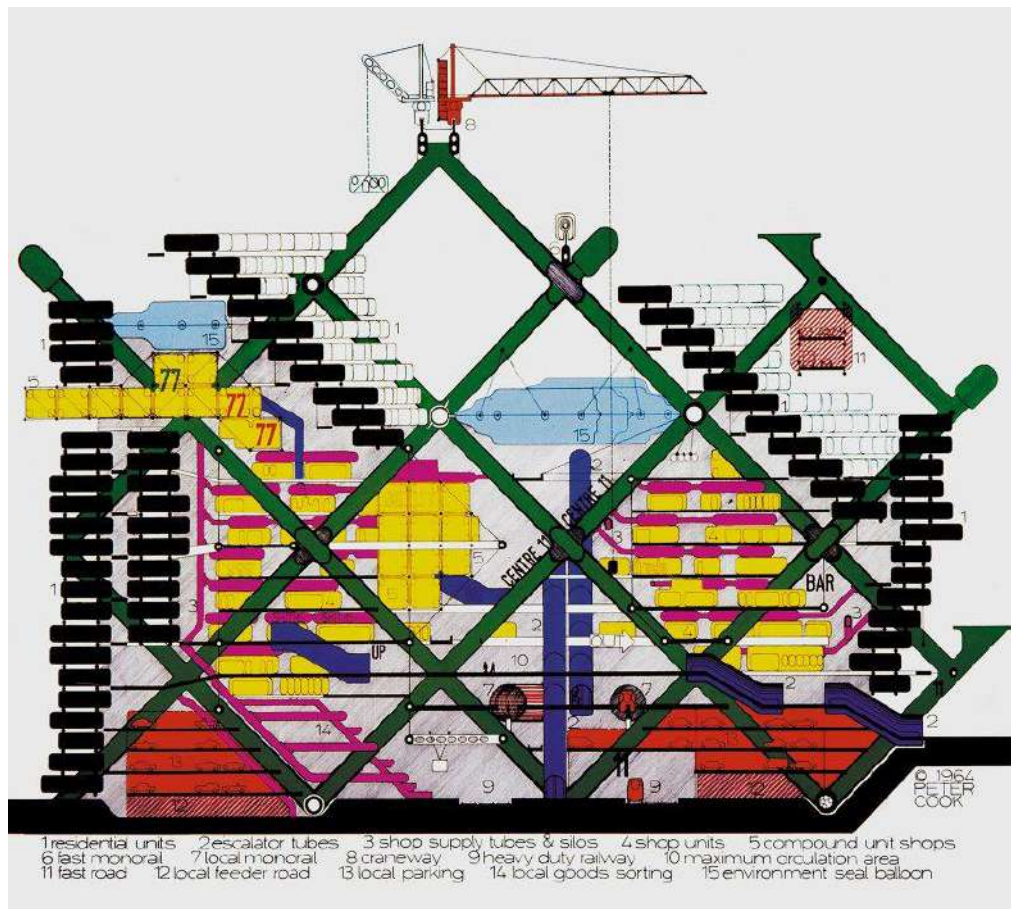


Figura 37. *Plug-in City*, Archigram 1964. Fonte: Toit (2020).

Embora nunca tenha sido construída, esta proposta revolucionária desafiou os paradigmas tradicionais da urbanização ao imaginar uma cidade em constante transformação, onde os componentes modulares poderiam ser adicionados, removidos ou substituídos conforme as necessidades da sociedade (Banham, 1969). A *Plug-In City* refletia uma crítica ao modernismo rígido e promovia uma visão de arquitetura flexível, efêmera e tecnologicamente integrada (Sadler & Archigram Group, 2005).

Na *Plug-In City*, o conceito *plug-in* era levado ao extremo, propondo uma infraestrutura urbana composta por uma megaestrutura fixa que servia de suporte a módulos habitacionais, comerciais e industriais, todos interligados por sistemas tecnológicos avançados.

A ideia de *plug-in*, aqui, ganha um caráter quase cibernético: os módulos residenciais e comerciais não são apenas móveis, mas pensados para interagir com a infraestrutura da cidade como se fossem dispositivos conectáveis. Se, nos anos 60, esta visão era apenas especulativa, hoje com o avanço da tecnologia digital e dos sistemas modulares de construção, a *Plug-In City* ressurge como um modelo de reflexão sobre a evolução das cidades inteligentes e da arquitetura responsiva.

Apesar de nunca ter sido construída, a *Plug-In City* teve um impacto duradouro no pensamento arquitetônico e urbanístico. Antecipou debates atuais sobre urbanismo sustentável e resiliência urbana, propondo soluções para a densificação habitacional e a integração de tecnologias emergentes no ambiente construído. O trabalho dos Archigram e de Peter Cook continua a ser uma referência.

O projeto experimental *Dockable Dwelling*, 2003, concebido por Matias Creimer, representa uma abordagem inovadora dentro da arquitetura *plug-in*, explorando a modularidade e a flexibilidade espacial como resposta à necessidade crescente de habitações adaptáveis (ver figura 38).

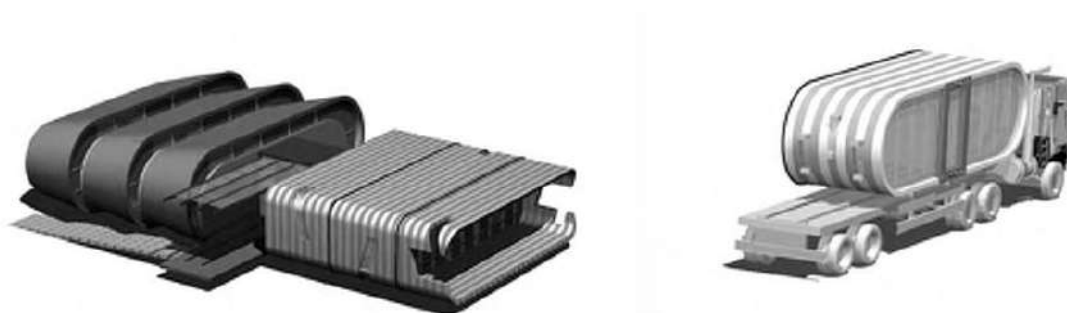


Figura 38. *Dockable Dwelling*, Matias Creimer 2003. Fonte: Kronenburg and Klassen (2006).

Mais do que um exercício técnico de pré-fabricação, este projeto propõe uma nova relação entre o espaço habitacional e os seus utilizadores, permitindo que a arquitetura evolua ao ritmo das mudanças individuais e coletivas.

A essência *plug-in* desta proposta reside na sua capacidade de encaixe modular, inspirada na lógica dos sistemas de acoplamento utilizados pela NASA em estações

espaciais. A ideia de um "porto de encaixe universal" sugere que diferentes módulos habitacionais podem ser adicionados, substituídos ou removidos, criando um habitat dinâmico e personalizável. Este conceito questiona diretamente a natureza estática da arquitetura tradicional, onde o espaço é concebido como um elemento fixo e definitivo, frequentemente incapaz de responder a novas exigências sem intervenções dispendiosas e complexas.

O sistema proposto por Creimer tem um potencial significativo para aplicações em habitação temporária, urbanismo reversível e ocupação flexível do solo, podendo ser explorado tanto em contextos urbanos como em cenários emergenciais.



Figura 39. Dockable Dwelling, Matias Creimer 2003. Fonte: Kronenburg and Klassen (2006).

O Dockable Dwelling insere-se numa linha de pensamento arquitetónico que entende a arquitetura não como um objeto inerte, mas como um sistema em constante evolução. Se o século XX nos habituou a edifícios que permanecem inalterados por décadas, o século XXI exige uma mudança de paradigma, onde o espaço construído deve ser capaz de acompanhar a velocidade das mudanças sociais, tecnológicas e ambientais.

Outro exemplo, localizado em Le Havre, França, é o projeto A Docks, 2010, concebido pelo atelier Cattani Architectes, representa uma abordagem inovadora ao conceito de arquitetura *plug-in*, através da reutilização de contentores marítimos como módulos habitacionais pré-fabricados (ver figura 40).

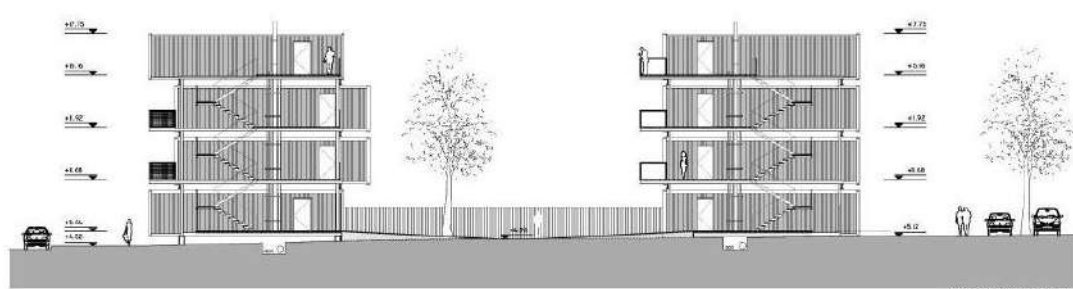


Figura 40. Docks, Cattani Architectes 2010. Fonte: Atelier Cattani (2010).

Este edifício residencial foi projetado para responder a uma crescente procura por soluções construtivas sustentáveis e flexíveis, enquadrando-se na lógica de sistemas arquitetónicos adaptáveis e reversíveis.

A estratégia modular de A Docks baseia-se no encaixe de contentores marítimos numa estrutura pré-montada, configurando um sistema de habitação que pode ser desmontado, reconfigurado ou ampliado conforme necessário. Este princípio *plug-in* permite a criação de unidades habitacionais independentes, que podem ser facilmente transportadas e reinstaladas em diferentes locais, reforçando a mobilidade e a flexibilidade espacial do projeto.

O conceito *plug-in* de A Docks demonstra o potencial da reutilização de contentores na habitação contemporânea, enfatizando a economia circular, a rapidez construtiva e a

possibilidade de futuras expansões ou reconfigurações sem necessidade de intervenções invasivas.

Por fim, o projeto *City of the Sun*, 2013, Denis Svirid, assenta no paradigma da arquitetura *plug-in*, ao explorar uma abordagem modular e adaptável ao espaço urbano contemporâneo (ver figura 41).



Figura 41. City of the Sun, Denis Svirid 2013. Fonte: Svirid (2013).

A essência *plug-in* manifesta-se, antes de mais, na autonomia dos módulos enquanto unidades habitacionais independentes, mas interligadas por uma infraestrutura comum. Cada módulo pode ser adicionado, removido ou substituído sem comprometer a estrutura global do conjunto, um princípio que remete diretamente para a visão metabolista da cidade como organismo em constante mutação. Esta flexibilidade construtiva traduz-se numa habitação que escapa ao convencional e se afirma como um sistema vivo, capaz de responder a diferentes ciclos de uso e estilos de vida.

Contudo, apesar do seu potencial inovador, *City of the Sun* também levanta questões sobre a real aplicabilidade do conceito *plug-in* na prática arquitetónica contemporânea. Se, por um lado, a modularidade e a flexibilidade prometem soluções habitacionais mais

eficientes e sustentáveis, por outro, a dependência de uma estrutura de suporte pode criar limitações ao longo do tempo, tanto do ponto de vista técnico como social (ver figura 42).



Figura 42. City of the Sun, Denis Svirid 2013. Fonte: Svirid (2013).

4.2. As vantagens e desvantagens do *plug-in*

A arquitetura *plug-in* surge como uma abordagem inovadora na construção, permitindo a flexibilidade e a adaptabilidade dos espaços através da adição ou remoção de módulos conforme as necessidades dos utilizadores. Esta estratégia construtiva tem sido explorada como uma solução para os desafios contemporâneos da habitação, nomeadamente a necessidade de espaços reconfiguráveis, a otimização de recursos e a redução do impacto ambiental.

No entanto, apesar das suas potencialidades, a arquitetura *plug-in* apresenta também desafios e limitações. A dependência de uma estrutura base para o encaixe dos módulos, a complexidade das ligações entre os elementos e as condicionantes técnicas e logísticas são aspetos que podem comprometer a sua aplicabilidade em determinados contextos. Assim, a análise das vantagens e desvantagens desta abordagem torna-se essencial para compreender o seu real contributo para a arquitetura contemporânea e o seu potencial enquanto modelo construtivo sustentável e eficiente.

4.2.1. Vantagens do *plug-in*

O conceito de arquitetura *plug-in* permite que os edifícios sejam expandidos, reduzidos ou modificados de acordo com as necessidades dos seus utilizadores. Kronenburg, (2007) afirma que a arquitetura transformável possibilita a adaptação contínua do ambiente construído às mudanças de uso e às exigências do futuro, sem necessidade de grandes intervenções.

A abordagem *plug-in* na arquitetura está alinhada com os princípios da construção sustentável, pois permite a reutilização de módulos, evitando demolições desnecessárias e promovendo a economia circular. De acordo com Lawson et al., (2014), a adoção de sistemas modulares e pré-fabricados reduz o desperdício de materiais e melhora a eficiência energética do ciclo de vida dos edifícios.

4.2.2. Desvantagens do *plug-in*

Embora a flexibilidade seja uma das grandes vantagens do sistema *plug-in*, a sua implementação pode ser complexa quando se trata da integração com estruturas existentes. Muitos edifícios não foram projetados para receber componentes modulares adicionais, o que pode gerar dificuldades técnicas. A adaptação de edifícios existentes para sistemas

plug-in pode exigir reforços estruturais, o que poderá comprometer a viabilidade financeira e técnica da intervenção (Kieran & Timberlake, 2004).

O uso de componentes padronizados pode restringir a criatividade arquitetônica, resultando em espaços que podem parecer genéricos ou pouco inovadores. Kronenburg (2007) afirma que a repetição de módulos pré-fabricados pode resultar numa monotonia visual e numa sensação de falta de identidade arquitetônica.

A necessidade permanente de uma estrutura de suporte na arquitetura *plug-in* impõe certas limitações, constituindo, assim, uma desvantagem no seu desenvolvimento e aplicação. Esta dependência estrutural reduz a autonomia do sistema e pode restringir a liberdade de configuração espacial. Além disso, a flexibilidade do sistema pode ser condicionada pela estrutura de suporte, uma vez que a expansão e a modificação dos módulos estão sujeitas às limitações impostas pela base existente. Esta circunstância pode dificultar a reconfiguração dos espaços ao longo do tempo, exigindo intervenções estruturais adicionais.

5. Protótipo

Face ao aumento global da emissão de gases com efeito de estufa, tornou-se necessário repensar o modo de construção dos edifícios, em particular, dos edifícios habitacionais. As metas de descarbonização impostas pela necessidade da mitigação das alterações climáticas não passam apenas por incrementar a autossuficiência e eficiência energéticas, mas pela mudança do paradigma dos sistemas construtivos mais utilizados, como o betão armado, alvenarias e aço.

A necessidade imperativa de construir habitação nova, dado o aumento populacional das áreas urbanas, impõe explorar as vantagens da utilização dos sistemas em *Mass Timber* para uma resposta ecológica a este desafio. Nesta perspetiva, o protótipo desenvolvido tem como objetivo criar um sistema de construção de unidades habitacionais compostas por módulos pré-fabricados, recorrendo a componentes em *Mass Timber*. Este sistema assenta no princípio de planear, pré-fabricar, transportar e montar, apontando para uma redução significativa da pegada ecológica quando comparado com os sistemas correntes em betão armado ou em aço. Acresce que a montagem dos módulos habitacionais, sendo reversível, permite a reutilização dos módulos, no melhor dos cenários de fim de vida, ou a reciclagem da madeira, num caso menos favorável.

Com base na análise do estado da arte, o sistema modular desenvolvido assenta na conceção de uma modulação de painéis em CLT, cuja transformação se processa através da subtração e adição de elementos. Esta estratégia permite uma elevada adaptabilidade às necessidades funcionais e espaciais, promovendo soluções arquitetónicas dinâmicas e evolutivas. O carácter flexível do sistema não só contribui para a racionalização dos recursos, mas também minimiza o desperdício do material, contrastando com os métodos convencionais de construção, frequentemente marcados por ineficiências no uso de matéria-prima.

Além disso, a modularidade e a replicabilidade dos elementos conferem ao sistema uma abordagem alinhada com os princípios do *Design for Disassembly* (DfD), permitindo que os componentes possam ser desmontados, reutilizados ou reorganizados ao longo do ciclo de vida da edificação. Desta forma, a conceção baseada em módulos simples e replicáveis não apenas viabiliza um modelo construtivo mais eficiente e sustentável, mas também reforça a ideia de um sistema que privilegia a economia de recursos e a minimização do impacto ambiental. Ao adotar esta lógica, mantém-se o conceito de

“desperdício zero”, assegurando que cada elemento incorporado na estrutura possa ter um novo uso, promovendo a circularidade e a longevidade da construção.

Neste enquadramento, o protótipo desenvolvido assume como eixos estruturantes três princípios fundamentais: a pré-fabricação, o plug-in e o DfD. A pré-fabricação permite a otimização de recursos e redução significativa do tempo de construção em obra e a redução do desperdício de materiais. A lógica do *plug-in* introduz a abordagem à organização espacial e técnica do edifício, possibilitando a inserção e substituição de módulos funcionais de forma rápida, reversível e adaptável, sem comprometer a estrutura base. Por fim, o conceito de DfD garante que todos os componentes foram concebidos com vista à desmontagem futura, promovendo a reutilização ou reciclagem dos materiais, em alinhamento com os princípios da economia circular e da sustentabilidade a longo prazo. Em conjunto, estes três pilares conferem ao sistema proposto um elevado grau de flexibilidade, resiliência e responsabilidade ambiental, posicionando-o como uma alternativa viável face aos modelos construtivos convencionais.

5.1. Conceito

O projeto *Multiply*, desenvolvido pelo estúdio Waugh Thistleton Architects em colaboração com a ARUP e o American Hardwood Export Council, constitui uma referência relevante no campo da construção modular pré-fabricada em *Mass Timber*, oferecendo uma abordagem inovadora à problemática da descarbonização no domínio da arquitetura (ver figura 43). Esta instalação efémera, concebida para o London Design Festival em 2019, distingue-se pela sua natureza experimental e pelo propósito explícito de demonstrar o potencial estrutural e ambiental da *Mass Timber*, em particular do CLT.



Figura 43. Estrutura Multiply, 2019 – Waugh Thistleton Architects. Fonte: Architects (2018).

Ainda que não tenha sido concebido com fins habitacionais, o *Multiply* revela-se um ponto de partida inspirador para a reflexão em torno da arquitetura modular em CLT, especialmente no contexto de sistemas habitacionais com o sistema *plug-in*. A flexibilidade do seu sistema construtivo, assente na repetição e justaposição de volumes modulares autoportantes, evidencia o potencial do CLT para originar diferentes composições espaciais (ver figura 44). Esta qualidade demonstra-se particularmente compatível com uma abordagem baseada em pré-fabricação e em estratégias de DfD.

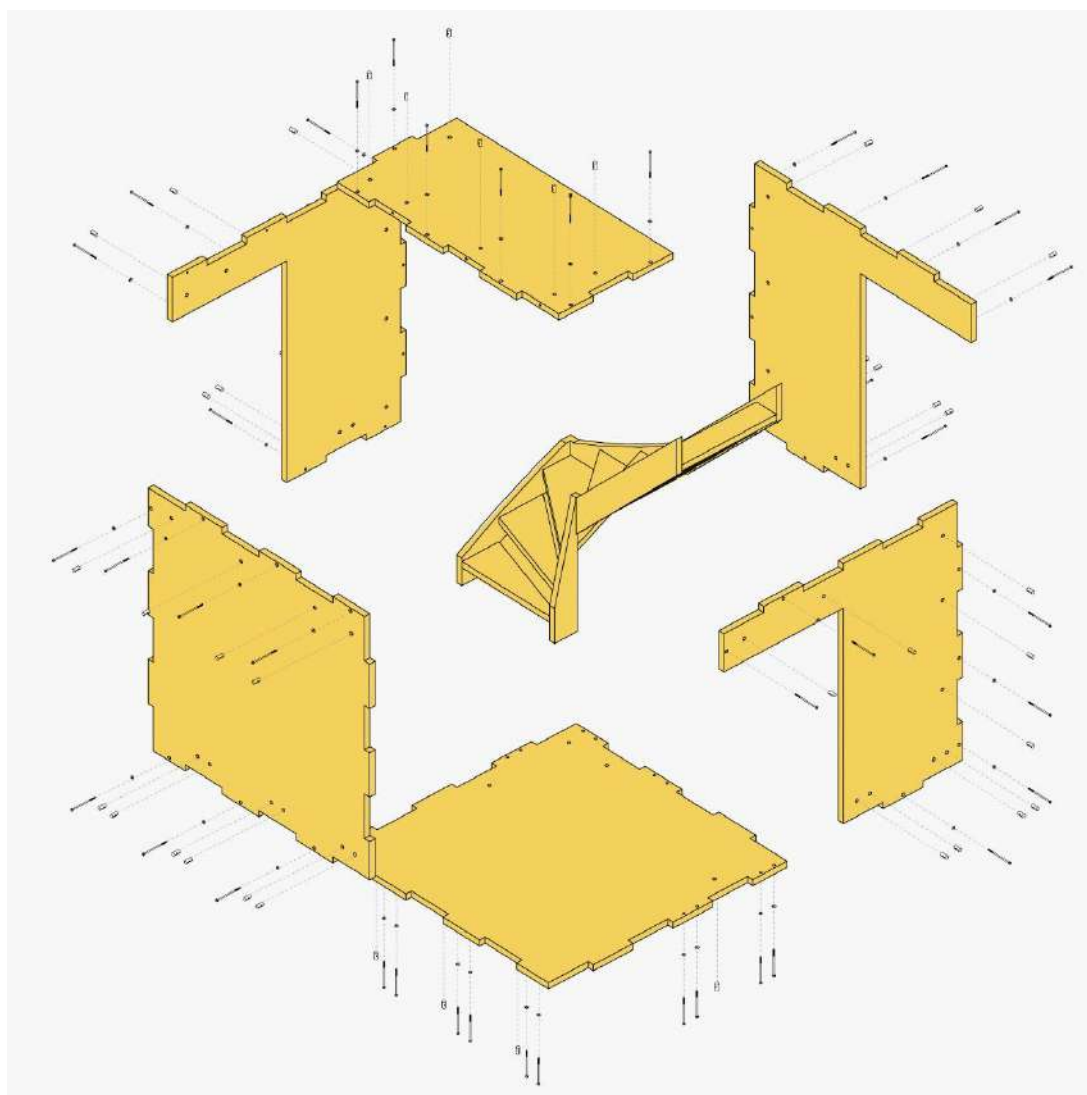


Figura 44. Diagrama estrutural do edifício Multiply, 2019 – Waugh Thistleton Architects. Fonte: Architects (2018).

Todavia, importa sublinhar que, apesar do seu valor enquanto exercício conceitual, o *Multiply* apresenta limitações inerentes à sua condição de instalação artística e temporária. Não sendo esse o seu objetivo primordial, o projeto não resolve plenamente os desafios técnicos, funcionais e regulamentares que caracterizam a construção de habitação. A ausência de infraestruturas integradas, bem como de soluções para conforto térmico, acústico e requisitos normativos, evidencia as fronteiras entre a proposta expositiva e uma proposta habitacional aplicável em contexto real.

Neste sentido, o conceito apresentado procura retomar os princípios positivos do *Multiply*, como ser modular, autoportante e o uso de CLT, reconfigurando-os de forma a responder às exigências da habitação. A proposta habitacional modular desenvolvida

baseia-se em componentes pré-fabricados passíveis de transporte, montagem e desmontagem simplificados, prevendo igualmente ligações mecânicas que facilitam a sua desmontabilidade e reutilização, conforme os princípios da economia circular.

Adicionalmente, o sistema habitacional em análise propõe uma malha estrutural capaz de acomodar múltiplas configurações programáticas, abrangendo tipologias como a habitação convencional, a residência temporária e o *co-living*. Esta flexibilidade estrutural e funcional remete para a lógica *plug-in*, em que os módulos são concebidos como unidades autónomas, adaptáveis e intermutáveis, permitindo respostas evolutivas às necessidades habitacionais ao longo do tempo.

Assim, o protótipo procura operar uma transposição crítica do seu conceito, assumindo a ambição de transformar uma instalação com potencial inspirador numa solução arquitetónica eficaz e operacional. Esta transformação implica não apenas uma reinterpretação formal e técnica dos módulos, mas também a sua integração numa lógica habitacional sustentável, com soluções construtivas e infraestruturais que garantam o conforto, a durabilidade e a eficiência dos edifícios.

5.2. Caracterização do Protótipo

O protótipo é constituído por três elementos estruturais distintos: a megaestrutura, que assume a função de suporte principal e garante a estabilidade global do sistema; as infraestruturas, que compreendem os sistemas técnicos e operacionais essenciais ao funcionamento do conjunto e as boxes, unidades modulares concebidas para acolher diferentes funcionalidades específicas (ver figura 45).



Figura 45. Conceito do protótipo.

5.2.1 Sistema estrutural

A estrutura vertical do edifício é composta por pilares e vigas em madeira laminada colada GLT, elementos que asseguram a resistência estrutural e a estabilidade do sistema modular.

A estrutura modular do edifício é concebida com uma malha de 3,00 m por 3,40 m, dimensionada especificamente para acomodar diversos conjuntos de módulos (figura 46 e 48). A modelação desta estrutura é pensada para que as boxes se encaixem na estrutura.

Para garantir a estabilidade e a coerência estrutural, os pilares e as vigas possuem dimensões uniformes de 400 mm x 400 mm. Este design modular não só facilita a montagem e desmontagem dos componentes, mas também assegura uma flexibilidade máxima na configuração dos espaços habitacionais.

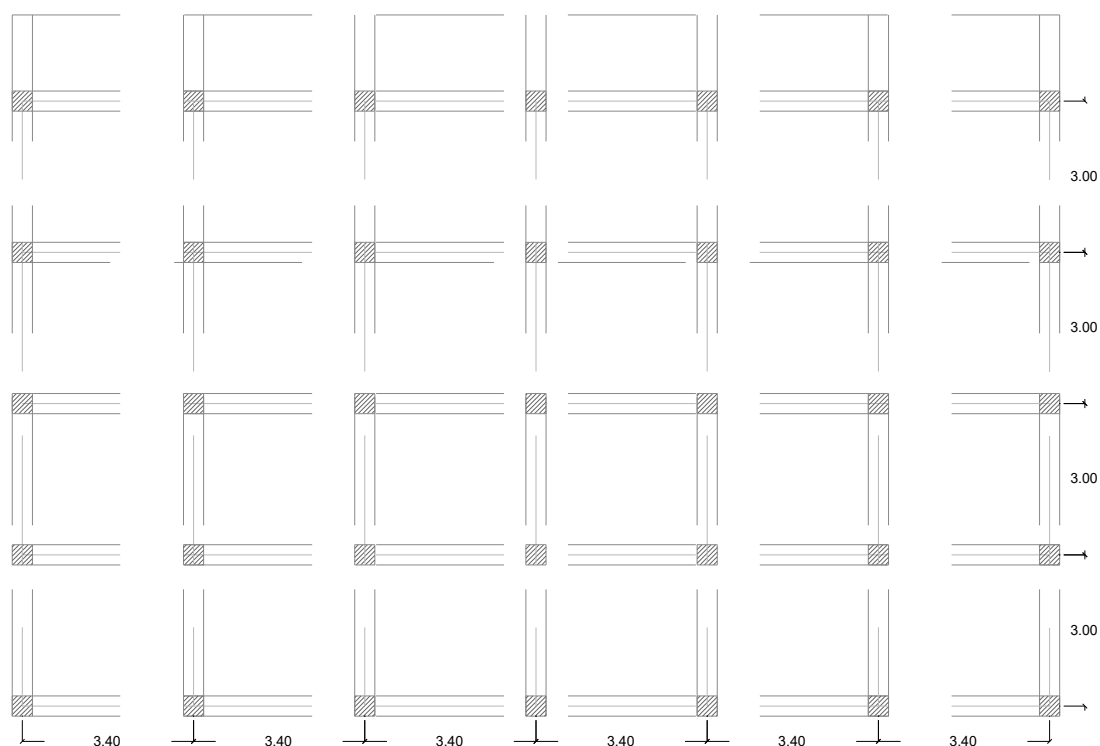


Figura 46. Estrutura modular.

Apesar da presença de componentes modulares na estrutura, a implementação de sistemas de contraventamento continua a ser fundamental para garantir a estabilidade global da construção. Os módulos, por si só, podem não assegurar resistência suficiente às forças horizontais. Assim, o contraventamento temporário assegura a rigidez necessária e o controlo dos deslocamentos estruturais durante o processo de instalação.

Numa fase posterior, o contraventamento é progressivamente substituído pelas boxes. Estas boxes incorporam os requisitos de rigidez e resistência necessários, assegurando a continuidade da estabilidade estrutural a longo prazo.

Desta forma, o contraventamento assume um papel estratégico no planeamento da construção modular, funcionando como um garante da segurança estrutural nas fases iniciais e sendo posteriormente integrado ou substituído por elementos permanentes com desempenho equivalente ou superior.

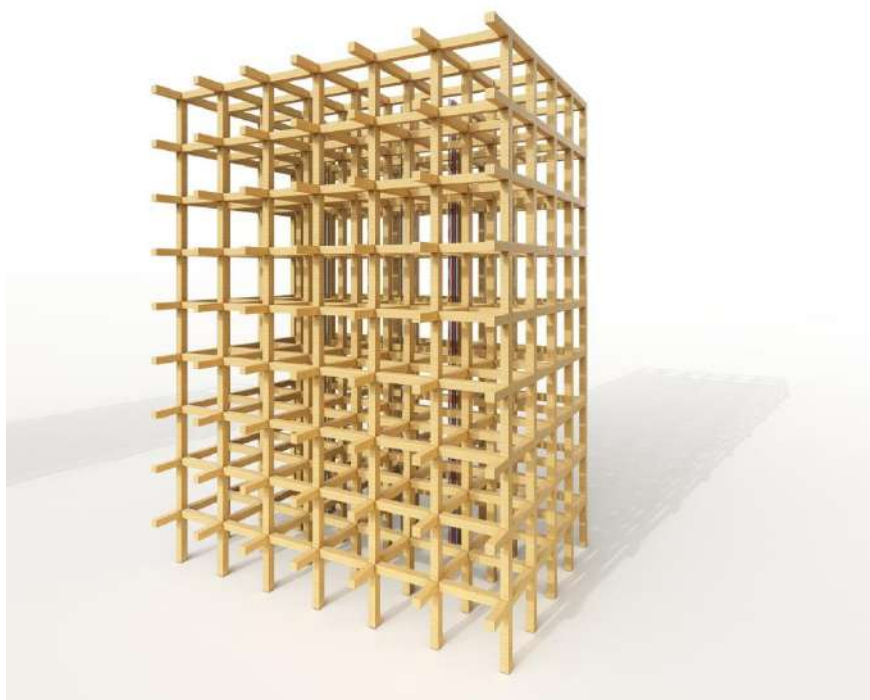


Figura 47. Estrutura modular.

Com base na estrutura do edifício e os diferentes módulos previamente analisados, estes permitem a criação de diversas configurações habitacionais, tornando o modelo versátil e adaptável a distintas necessidades de quem possa vir a ocupá-lo. Sendo uma construção modular, permite adaptações à estrutura já existente, facilitando a montagem e desmontagem dos componentes, mas também assegura uma flexibilidade máxima na configuração dos espaços habitacionais. Assim, os módulos que compõem a habitação podem não só ajustar-se às necessidades imediatas dos seus habitantes, como também acomodar futuras alterações.

5.2.2. Infraestruturas

As infraestruturas foram concebidas com o objetivo de não interferirem com a compartimentação interior dos módulos, nem com o sistema estrutural principal. Esta estratégia visa preservar a flexibilidade espacial e a integridade estrutural do conjunto, permitindo futuras adaptações ou reorganizações funcionais sem comprometer o desempenho técnico do edifício.

Para tal, optou-se por posicionar as infraestruturas na prumada da estrutura, de forma a assegurar uma distribuição eficiente dos sistemas técnicos, como as redes de abastecimento de água, eletricidade, ventilação e esgotos, sem atravessar ou condicionar os elementos estruturais ou os espaços interiores. Esta solução favorece não só a manutenção e atualização das instalações ao longo do tempo, como também contribui para uma lógica construtiva mais limpa, racional e sustentável, alinhada com os princípios da arquitetura modular e pré-fabricada.

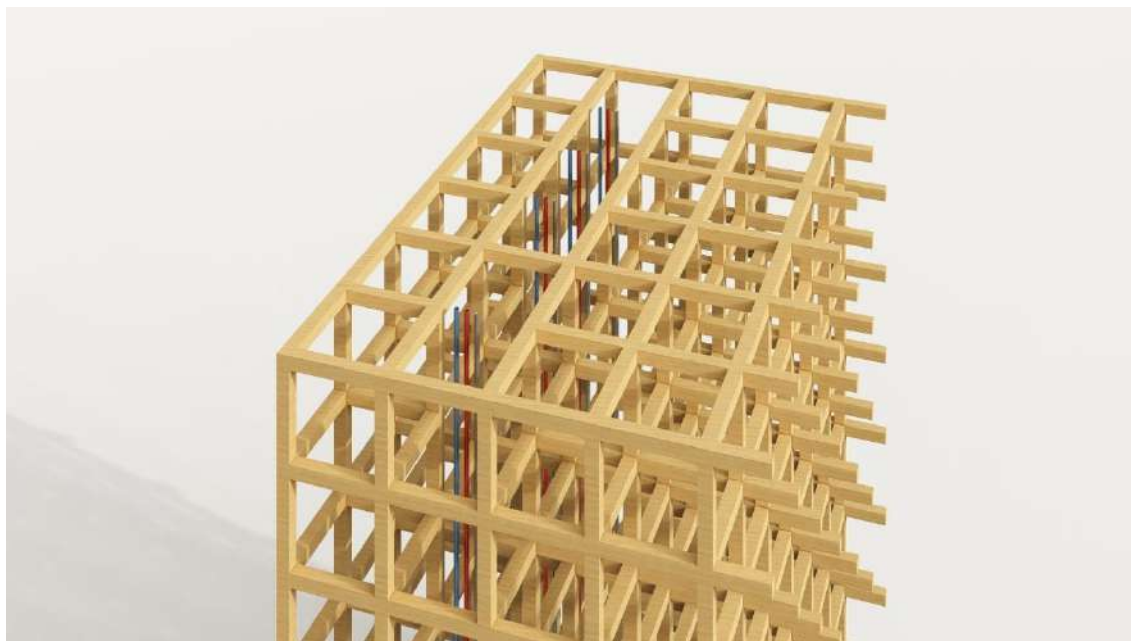


Figura 48. Infraestruturas.

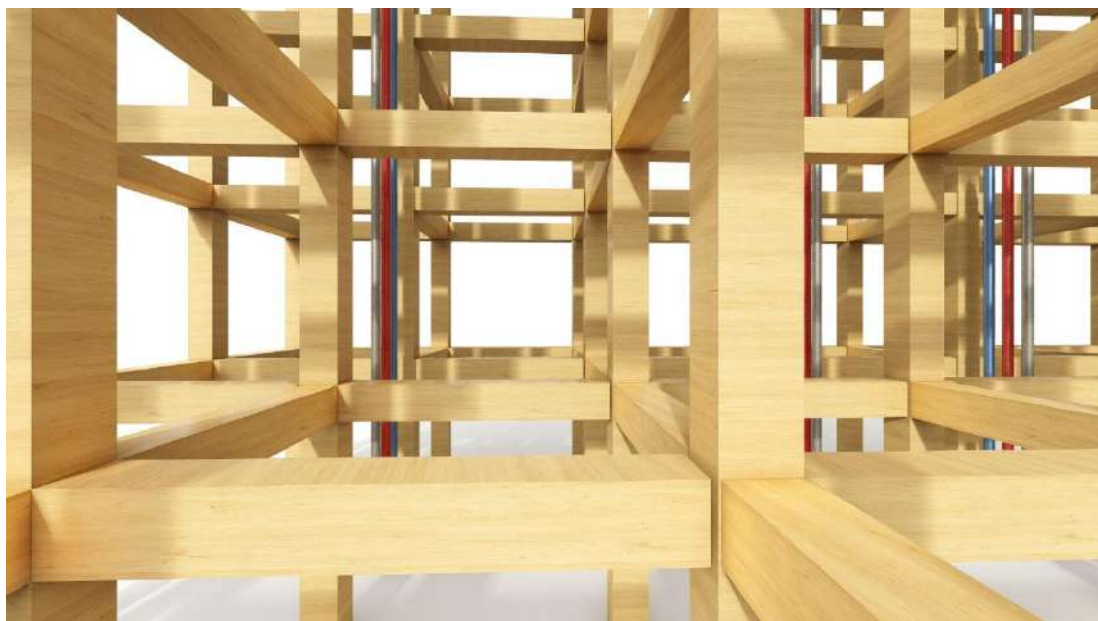


Figura 49. Infraestruturas.

5.2.3. Boxes

Os componentes modulares constituem os elementos centrais da solução proposta para o caso de estudo, desempenhando um papel determinante na configuração espacial e na adaptabilidade do sistema construtivo. A sua forma tem como referência um quadrado base com dimensões de 3,00m por 3,00m, permitindo variações dimensionais tanto por adição como por subtração, sempre em múltiplos e submúltiplos de 3 (ver figura 50). Assim, definem-se diferentes componentes, nomeadamente:

- B1: 3,00m x 3,00m;
- B2: 3,00m x 6,00m
- B3: 3,00m x 4,50m;
- B4: 3,00m x 2,10m;
- B5: 3,00m x 1,50m;
- B6: 3,00m x 0,90m;
- B7: 3,00m x 0,40m.

Estes componentes apresentam a versatilidade de poderem ser aplicados tanto na constituição de paredes como na composição de pavimentos, conferindo maior flexibilidade à solução arquitetónica. São construídas em CLT, com uma espessura de 120 mm.

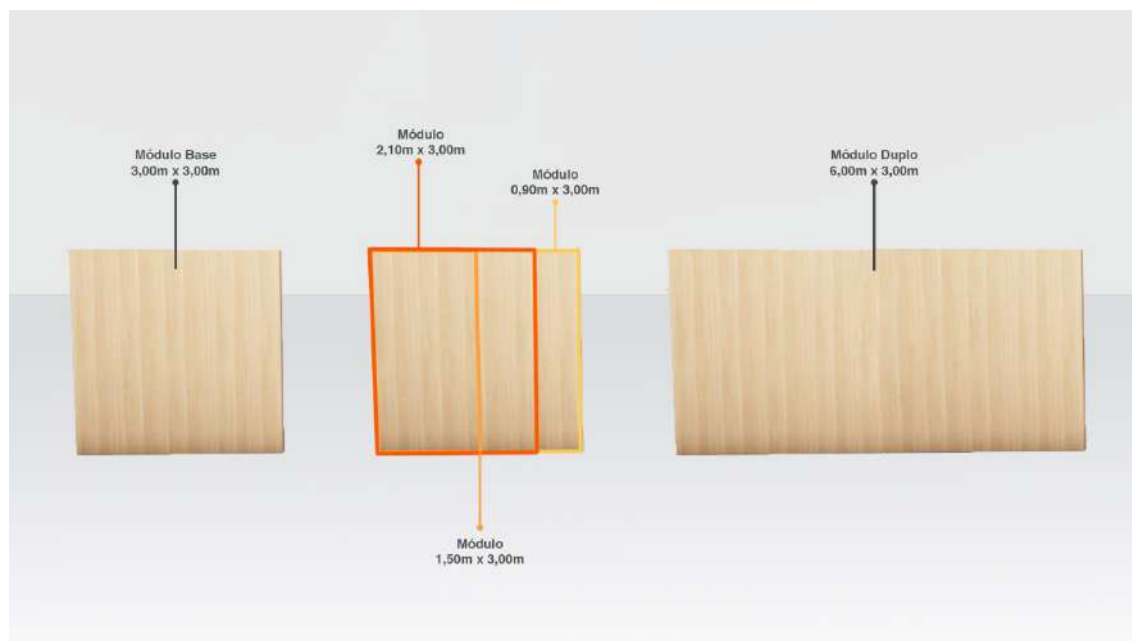


Figura 50. Componente modular em *Mass Timber*.

Tabela 09. Características dos componentes modulares.

Componente modular	Dimensão	Volume estimado (m³)	Peso (kg /m³)	GWP Fases A1 - A5 (kg CO ₂ e/m³)	GWP (kg CO ₂ eq)
B1	3,00 x 3,00	1,08	915,84	-6,14E+02*	- 568,52
B2	3,00 x 6,00	2,16	457,92	-6,14E+02*	-284,26
B3	3,00 x 4,50	0,76	322,24	-6,14E+02*	- 807,89
B4	3,00 x 2,10	0,54	228,96	-6,14E+02*	-1137,04
B5	3,00 x 1,50	0,32	135,68	-6,14E+02*	-1918,75
B6	3,00 x 0,90	1,62	686,88	-6,14E+02*	-379,01
B7	2,60 x 0,40	0,12	50,88	-6,14E+02*	-5095,47

* Valores retirados da EPD Schilliger cross laminated timber, Schilliger Holz 2020

O componente modular base B1 pode ser posicionado na vertical, formando uma parede, ou na horizontal, funcionando como uma laje de piso ou de cobertura. A sua geometria permite ainda a criação de vãos através da subtração de elementos, tanto ao baixo, criando aberturas no nível do solo, como ao alto, criando vãos elevados. Os componentes B3 e B4 resultam da subtração de B1. Quando posicionados na vertical ou na horizontal, estes módulos possibilitam formar vãos, podendo, em algumas configurações, ser utilizados apenas como paredes, conforme as necessidades espaciais e estruturais. O componente B5, tal como os módulos B2 e B6, também é derivado da subtração do módulo base e permite

a criação de vãos. Contudo, apresenta a particularidade de poder ser utilizado como guarda nas varandas, oferecendo uma solução adicional de segurança e delimitação espacial. Por fim, o módulo B2, por sua vez, resulta da combinação de dois módulos B1. Este módulo oferece a possibilidade de criar vãos de pé direito duplo quando posicionado na vertical. Semelhante ao módulo B1, o módulo B2 pode ser utilizado para formar lajes de piso convencionais, lajes de piso em consola ou lajes de cobertura, adaptando-se assim a diversas configurações espaciais e estruturais.

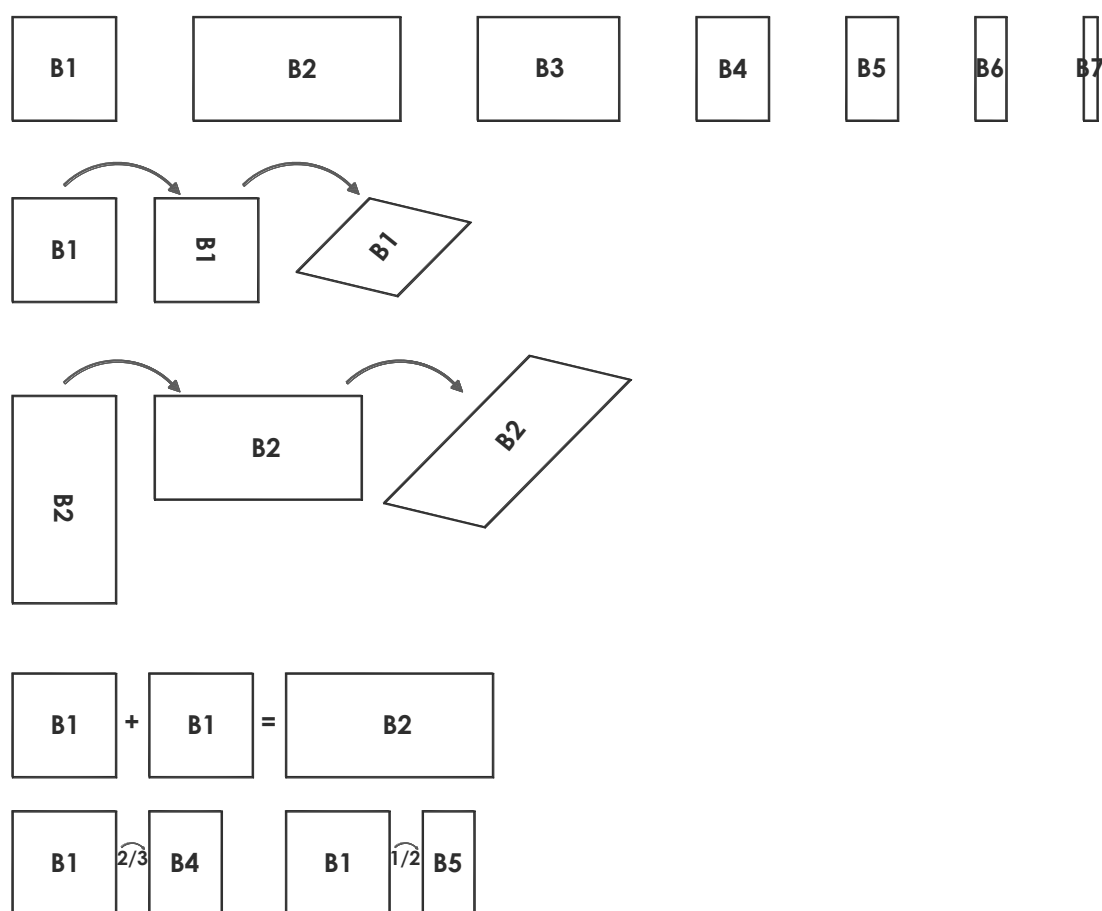


Figura 51. Adição e subtração do componente modular em *Mass Timber*.

Os módulos são concebidos em CLT, uma escolha que contribui significativamente para a sustentabilidade da solução arquitetónica, dado o carácter renovável da matéria-prima, a sua capacidade de sequestrar carbono e a eficiência energética associada ao seu desempenho térmico. Além disso, a adoção de um módulo base com dimensões padrão de 3,00m por 3,00m assegura uma otimização no uso dos recursos, eliminando desperdícios de material durante a produção e montagem, em conformidade com os princípios da eficiência e da economia circular na construção modular.

Os módulos podem ser utilizados de forma autónoma, explorando as qualidades estruturais, térmicas e estéticas do material. No entanto, a sua versatilidade permite também a integração de sistemas complementares, como painéis fotovoltaicos ou soluções de coberturas e fachadas verdes, potenciando a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental do conjunto (ver figura 52).

Esta possibilidade de acoplagem de sistemas adicionais confere aos módulos um elevado grau de adaptabilidade, permitindo que cada utilizador personalize a sua unidade em função das suas necessidades, preferências ou valores individuais. Ao permitir diferentes configurações e aparências, este modelo promove a identidade e apropriação do espaço habitado, reforçando a relação entre o indivíduo e o seu ambiente construído, dentro de uma lógica de arquitetura modular evolutiva e participativa.



Figura 52. Versatilidade do módulo.

Estes componentes, quando considerados isoladamente, não possuem a capacidade de configurar uma habitação completa, sendo necessária a sua articulação com outros elementos para a criação de um conjunto habitável. Através da sua agregação, os componentes individuais originam módulos funcionais que, por sua vez, operam de forma integrada dentro de um sistema modular mais amplo, permitindo a organização espacial e estrutural da edificação de acordo com os princípios da modularidade e da flexibilidade construtiva (ver figura 53).

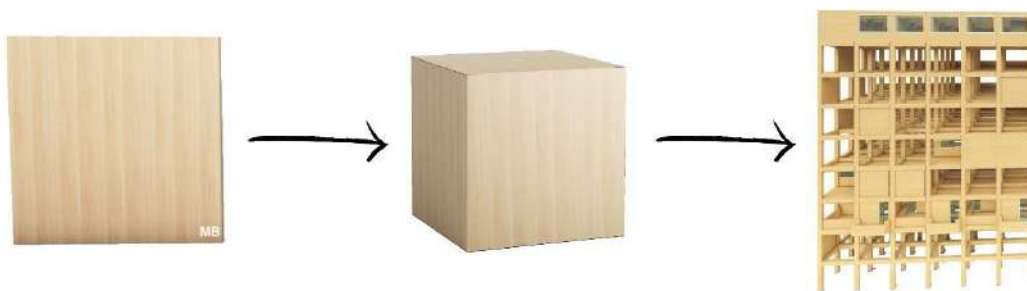


Figura 53. Diagrama componente modular.

Para além dos elementos modulares principais, tornou-se necessário conceber componentes complementares, designados por peças de acerto, com a função específica de assegurar a ligação entre os módulos dispostos na laje de piso e na laje de teto. Esta necessidade resulta da descontinuidade gerada pela presença das vigas estruturais, que criam um afastamento entre os módulos e inviabilizam uma junção direta e contínua entre os seus limites. As peças de acerto funcionam, assim, como elementos de transição e adaptação, permitindo colmatar os espaços entre os módulos e garantir a continuidade física e estrutural da solução construtiva. Estes componentes são dimensionados de acordo com os intervalos criados pelas vigas (2,60m por 0,40m). A sua integração é essencial para assegurar a coesão do sistema construtivo, facilitando não só a estabilidade global da edificação, mas também a eficiência no processo de montagem e a adaptabilidade do sistema a diferentes configurações modulares.

5.2.4. Ligações entre componentes modulares

As ligações estruturais adotadas no sistema construtivo baseiam-se em ligações mecânicas, privilegiando-se soluções que garantam a reversibilidade e, consequentemente, a reutilização futura dos componentes. A principal preocupação na seleção das ligações prende-se com a necessidade de assegurar a reversibilidade do sistema, de forma a permitir que os elementos estruturais em madeira fossem ser reutilizados ou reconvertidos em novos contextos, alinhando-se com os princípios do DfD.

No caso específico do protótipo, opta-se por ligações mecânicas ocultas, que, para além de responderem aos requisitos técnicos de resistência e estabilidade, contribuem para uma limpeza formal da linguagem arquitetónica, mantendo a leitura contínua dos elementos em madeira sem interrupções visuais. A solução adotada consiste no uso de esquadros estruturais, uma ligação que garantem robustez estrutural e facilidade de montagem e desmontagem (ver figura 54).

Este tipo de ligação, amplamente reconhecido pela sua eficiência e discrição, permite não só uma forte coesão entre os elementos modulares, como também assegura a integridade estrutural da construção durante a sua vida útil, sem comprometer a possibilidade de separação dos componentes no final do ciclo de uso. A escolha do alumínio, material leve, resistente à corrosão e reciclável, reforça o compromisso com uma abordagem sustentável e de baixo impacto ambiental no desenvolvimento do sistema modular em *Mass Timber*.

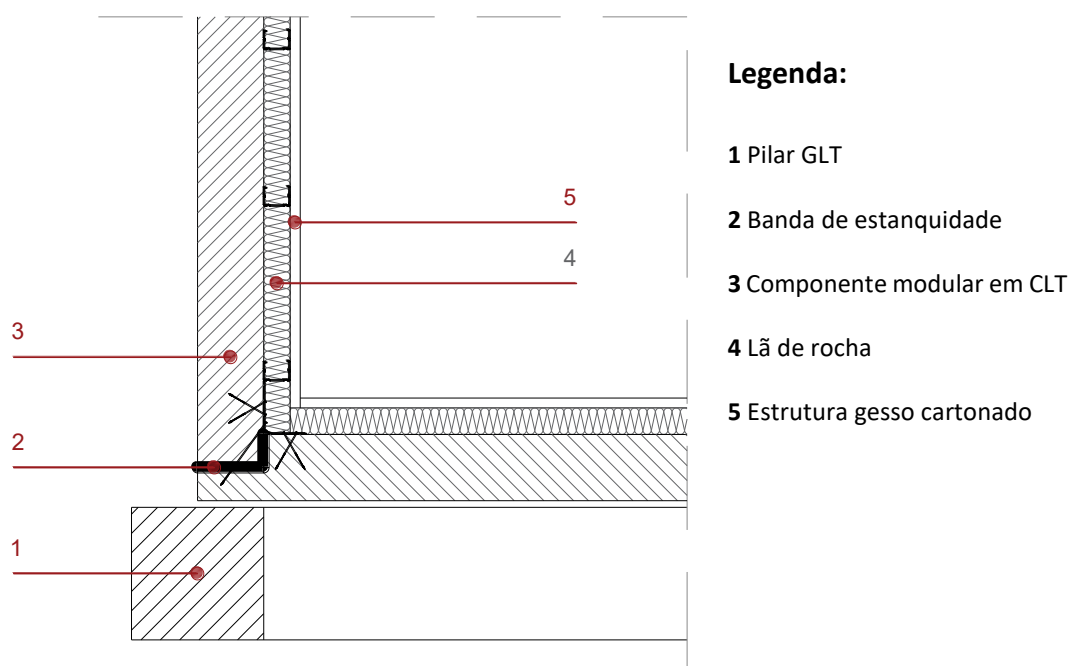


Figura 54. Ligação entre módulos CLT – corte horizontal.

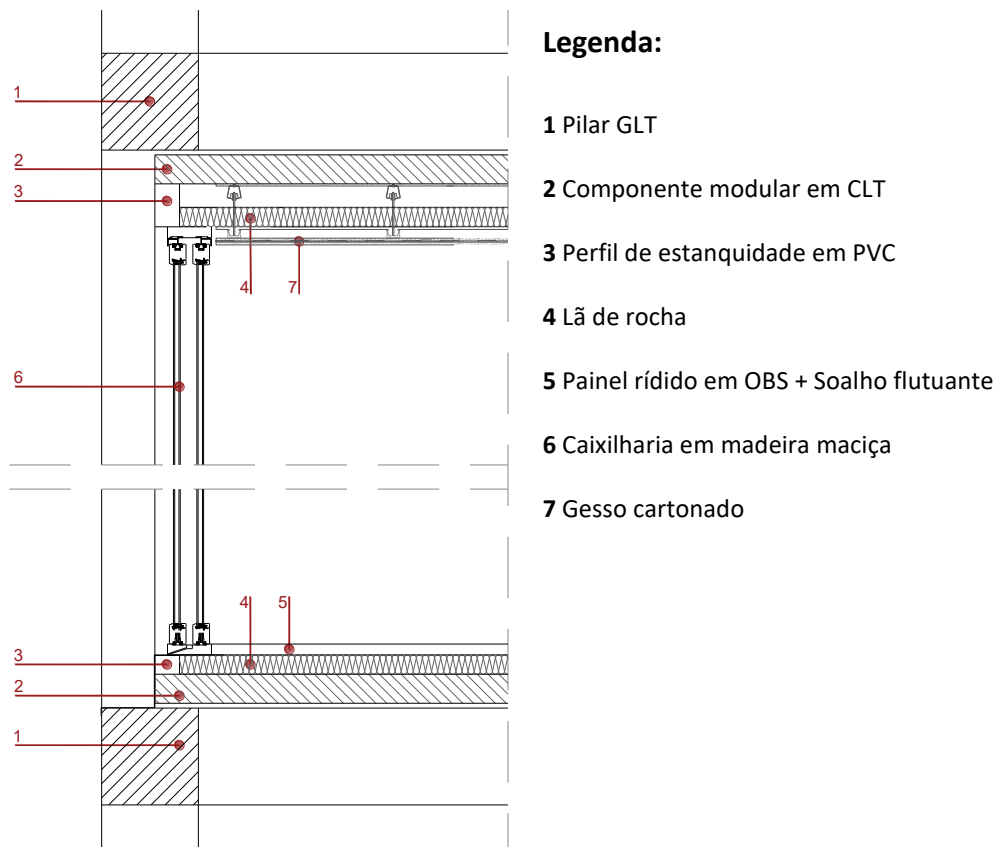


Figura 55. Ligação entre módulos CLT – corte vertical.

A ligação entre a box e a estrutura é assegurada através da aplicação de esquadros metálicos estruturais especificamente dimensionados para sistemas em CLT. Estes elementos de fixação garantem a transferência eficiente de cargas e proporcionam estabilidade ao conjunto, respeitando os princípios da construção modular em *Mass Timber*.

Por sua vez, a ligação entre os pilares em GLT e as fundações em betão é realizada por meio de uma solução mecânica, composta por pés de prumo em formato de “U” em aço. Esta configuração permite ancorar firmemente os pilares às fundações, assegurando a resistência às ações verticais e horizontais, bem como a durabilidade e segurança estrutural da edificação.

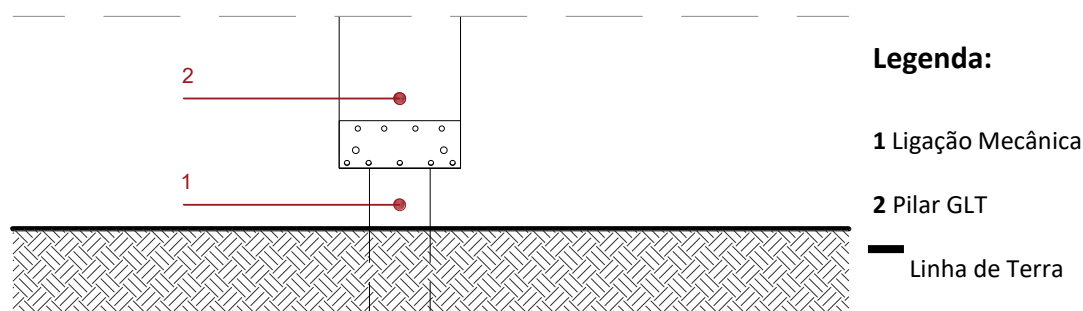


Figura 56. Ligação entre pilar GLT e fundações.

5.3. Desempenho térmico e acústico

No que respeita ao desempenho térmico e acústico da envolvente opaca das boxes, a solução construtiva adotada revela uma abordagem orientada para o conforto dos utilizadores e para a eficiência energética do edifício. A aplicação de isolamento térmico em lã de rocha nas paredes e pavimentos contribui de forma significativa para a minimização das perdas térmicas, uma vez que este material apresenta elevada resistência à difusão de calor, baixa condutividade térmica. Estas características tornam a lã de rocha particularmente eficaz em ambientes onde se pretende garantir uma envolvente térmica contínua e durável, reduzindo a dependência de sistemas de climatização ativa e, consequentemente, os consumos energéticos associados. Acresce ainda o facto de a lã de rocha apresentar boas propriedades de absorção acústica, o que reforça a sua aptidão para aplicações em edifícios que visem simultaneamente o conforto térmico e acústico.

A condutividade térmica é uma propriedade física fundamental dos materiais que determina a sua capacidade de conduzir calor. Assume um papel crucial na eficiência energética das edificações. Materiais com baixa condutividade térmica são preferencialmente utilizados em sistemas de isolamento térmico, uma vez que contribuem significativamente para a redução das perdas ou ganhos de calor através dos elementos da envolvente opaca (paredes, coberturas e pavimentos). Esta redução tem um impacto direto no desempenho energético do edifício, permitindo manter temperaturas interiores mais estáveis e confortáveis, com menor recurso a sistemas de climatização ativa.

Para além do conforto térmico, a utilização de materiais com condutividade térmica reduzida permite diminuir o consumo energético associado ao aquecimento e arrefecimento

dos espaços, contribuindo para uma menor emissão de gases com efeito de estufa e, consequentemente, para a mitigação dos impactos ambientais do setor da construção.

Neste contexto, tornou-se necessário realizar o cálculo individualizado do coeficiente de condutividade térmica (U) de cada box, com o objetivo de avaliar o desempenho térmico global da habitação. Esta análise permite identificar de forma precisa o contributo de cada componente para a eficiência energética do edifício, assegurando uma abordagem mais informada e fundamentada na definição das soluções construtivas.

Tabela 10. Coeficiente de condutividade térmica (U) da envolvente opaca exterior – Paredes.

Paredes			
Material	λ (w/m.k)	espessura d (m)	R (m ² .k/w)
CLT	0,130	0,120	0,923
Lã de Rocha 40 kg/m ²	0,036	0,080	2,222
Gesso Cartonado	0,250	0,013	0,050
Rse (m ² .k/w)			0,040
Rsi (m ² .k/w)			0,130
R total (m ² .k/w)			3,365
U (w/m ² .K)			0,297

De acordo com o Guia SCE – Parâmetros de Cálculo (Direção Geral de Energia e Geologia, 2020), a resistência térmica superficial interior (Rsi) não é um valor fixo, mas sim uma variável que depende do sentido do fluxo de calor (horizontal, vertical ascendente ou descendente), o qual está diretamente condicionado pelas condições sazonais predominantes, nomeadamente o inverno ou o verão. Esta dependência está relacionada com os mecanismos de troca de calor por convecção que ocorrem nas superfícies internas dos elementos construtivos, influenciados pela diferença de temperatura entre o interior e o exterior. Assim, a avaliação correta do desempenho térmico da envolvente requer a consideração dos valores específicos de Rsi para cada estação do ano, conforme estipulado nas tabelas de referência definidas pelo Despacho n.º 15793-K/2013 e pelas publicações do LNEC (nomeadamente o ITE 50), assegurando a precisão do cálculo do coeficiente de transmissão térmica global (U) dos elementos opacos.

Tabela 11. Coeficiente de condutividade térmica (U) da envolvente opaca exterior – Laje teto.

Laje teto - Inverno			
Material	λ (w/m.k)	espessura d (m)	R (m2.k/w)
CLT	0,130	0,120	0,923
Lã de Rocha 40 kg/m2	0,036	0,080	2,222
Gesso Cartonado	0,250	0,013	0,050
Rse (m2.k/w)			0,040
Rsi (m2.k/w)			0,100
R total (m2.k/w)			3,335
U (w/m2.K)			0,300

Laje teto - Verão			
Material	λ (w/m.k)	espessura d (m)	R (m2.k/w)
CLT	0,130	0,120	0,923
Lã de Rocha 40 kg/m2	0,036	0,080	2,222
Gesso Cartonado	0,250	0,013	0,050
Rse (m2.k/w)			0,040
Rsi (m2.k/w)			0,170
R total (m2.k/w)			3,405
U (w/m2.K)			0,294

Tabela 12. Coeficiente de condutividade térmica (U) da envolvente opaca exterior – Laje Piso.

Laje Piso - Inverno			
Material	λ (w/m.k)	espessura d (m)	R (m2.k/w)
CLT	0,130	0,120	0,923
Lã de Rocha 40 kg/m2	0,036	0,080	2,222
Soalho Flutuante - Bétula	0,160	0,024	0,150
Rse (m2.k/w)			0,040
Rsi (m2.k/w)			0,100
R total (m2.k/w)			3,435
U (w/m2.K)			0,291

Laje Piso - Verão			
Material	λ (w/m.k)	espessura d (m)	R (m2.k/w)
CLT	0,130	0,120	0,923
Lã de Rocha 40 kg/m2	0,036	0,080	2,222
Soalho Flutuante - Bétula	0,160	0,024	0,150
Rse (m2.k/w)			0,040
Rsi (m2.k/w)			0,170
R total (m2.k/w)			3,505
U (w/m2.K)			0,285

5.5. Impermeabilização

Numa lógica de construção sustentável e de elevado desempenho, a impermeabilização deve ser entendida não como um elemento isolado, mas como parte integrante de um sistema construtivo estratificado, onde cada camada colabora na obtenção de um envelope eficiente.



Figura 57. Acabamento hidrofóbico. Fonte: StoraEnso (2025).

O acabamento exterior dos módulos em CLT e da estrutura em GLT consiste na aplicação de um tratamento hidrofóbico UV, que consiste na utilização de um verniz acrílico incolor, de base aquosa e com propriedades repelentes. Este acabamento permite a permeabilidade ao vapor de água, garantindo a respiração natural da madeira, ao mesmo tempo que impede a penetração de água e sujidade na superfície e no grão do material, contribuindo assim para a durabilidade, proteção à água e ao sol e valorização estética dos elementos estruturais (ver figura 58).



Figura 58. Acabamento hidrofóbico UV. Fonte: StoraEnso (2025).

A cobertura, por sua vez, é executada com uma placa de CLT com pendente de 2%, e incorpora múltiplas camadas técnicas de elevada performance, nomeadamente a manta mecânica Tyvek UV FAÇADE (ver figura 59). Estas membranas técnicas garantem não apenas a estanquidade à água e à entrada de poeiras, mas também uma eficaz barreira contra a radiação UV e a ação de agentes atmosféricos, contribuindo para a durabilidade do sistema e para a manutenção das características térmicas e acústicas da cobertura ao longo do tempo.

Legenda:

- 1 Ligação Mecânica
- 2 Pilar GLT - Cross Laminated Timber
- 3 Viga GLT – Glued Laminated Timber
- 4 Parede modular pré-fabricada em CLT
- 5 Caixilharia em madeira maciça
- 6 Lã de Rocha
- 7 Placa de Gesso Cartonado 12,5mm
- 8 Placa em CLT - Cross Laminated Timber com pendente de 2%
- 9 Tela Mecânica - DUPUNT TYVEC UV FACADE

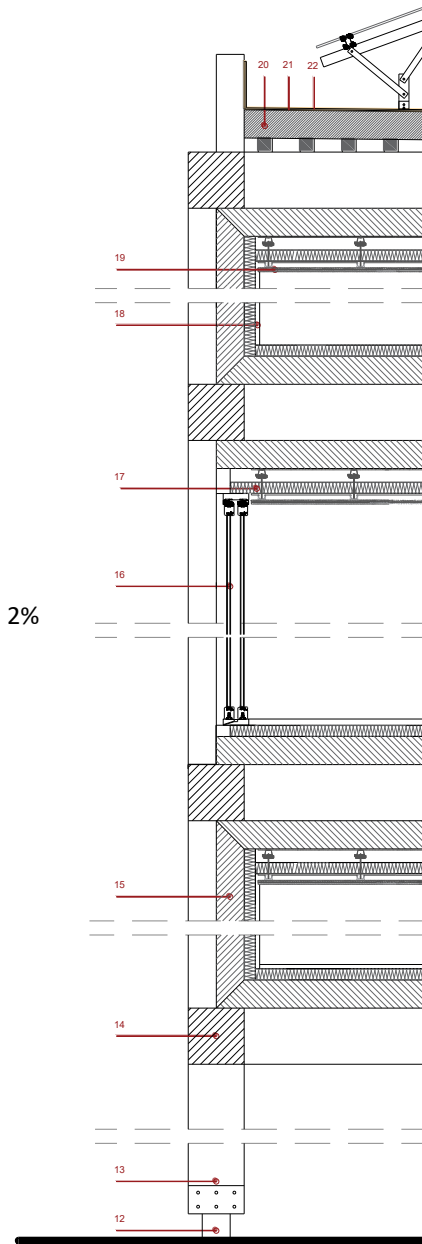


Figura 59. Corte Construtivo Tipo.

5.5. Estanquidade

A estanquidade garantida neste sistema refere-se à permeabilidade ao ar. Para assegurar a vedação nas juntas dos componentes modulares, são aplicadas bandas de estanquidade, de forma a evitar infiltrações e perdas de ar. No que respeita ao controlo do vapor de água, é essencial impedir que o vapor de água chegue à lã de rocha, comprometendo assim as suas propriedades térmicas e a durabilidade do material. Assim torna-se necessário colocar membranas de estanquidade ao vapor de água.

5.6. Transporte da box

Para viabilizar o transporte do módulo até ao local de implantação, onde será posteriormente acoplado à estrutura de suporte, é fundamental incorporar no próprio módulo um sistema que possibilite a sua elevação e movimentação em segurança. Este sistema baseia-se na aplicação de pontos de elevação estrategicamente distribuídos, através da incorporação de ancoragem metálicos, que são elementos de fixação embutidos na estrutura do módulo. Estes ancoragem são dimensionados e posicionados de forma a garantir uma distribuição homogénea das cargas durante as operações de elevação, prevenindo esforços concentrados que possam comprometer a integridade do sistema construtivo. A escolha do número e localização destes pontos obedece a critérios de engenharia que consideram o centro de gravidade, o peso total do módulo e as suas características geométricas, de forma a assegurar um transporte estável e isento de deformações indesejadas. Esta solução técnica permite não apenas a movimentação segura durante o transporte e instalação, mas também reforça a viabilidade da construção modular enquanto sistema flexível, eficiente e passível de desmontagem ou realocação futura (ver figura 58).



Figura 60. Transporte de placas CLT. Fonte: Rothoblaas (2024).

5.7. Inserção do módulo na estrutura

A colocação das boxes na estrutura de suporte requer a implementação de um sistema técnico eficaz que assegure a mobilidade controlada e precisa dos mesmos, sem comprometer a integridade estrutural de nenhum dos elementos envolvidos. Equaciona-se a possibilidade da instalação de um perfil metálico em formato de “U” ao longo da estrutura fixa, o qual funcionam como carril guia para o deslizamento dos módulos. Estes, por sua vez, poderão ser equipados com roldanas devidamente dimensionadas e posicionadas, permitindo que o módulo seja inserido e movimentado de forma linear ao longo do percurso definido. Este mecanismo facilitaria a colocação dos módulos no interior da estrutura, conferindo simultaneamente flexibilidade e segurança ao processo de montagem. Após o posicionamento adequado do módulo, torna-se importante garantir a sua fixação. Neste sentido, serão definidos pontos de ancoragem estratégicos que permitam travar e estabilizar o módulo na sua localização final, assegurando a resistência mecânica necessária e evitando deslocamentos involuntários resultantes de cargas dinâmicas, tais como, ações do vento ou outros fatores externos. Este sistema permitia, assim, uma montagem eficaz, segura e potencialmente reversível, contribuindo para a adaptabilidade e evolutividade do conjunto arquitetónico.

No entanto, a colocação do módulo constitui um aspeto que carece ainda de um desenvolvimento técnico mais aprofundado.

6. Caso de Estudo

6. Caso de Estudo

6.1. Contextualização

Considerando os dados previamente apresentados para caracterizar o protótipo, foi feita a sua transposição para o caso de estudo, de modo a estabelecer uma correlação entre os princípios teóricos analisados e a sua aplicação prática. Este processo visa não apenas validar as informações obtidas, mas também compreender de que forma os elementos identificados nos dados podem ser adaptados e interpretados no contexto específico do estudo em questão.

O presente projeto, implantado numa área de transição entre o meio rural e o tecido urbano na cidade de Barcelos, foi concebido com uma visão estratégica de longo prazo, contemplando o desenvolvimento do território nas próximas cinco décadas. A intervenção visa criar uma base sólida que permita expansões futuras de forma orgânica, evitando que estas se tornem entraves ao crescimento sustentável. O projeto procura consolidar uma zona periurbana, propondo um modelo habitacional inovador, especificamente pensado para territórios rurais em transformação. Esta proposta alia os princípios da sustentabilidade, mobilidade, inclusão social, acessibilidade económica e adaptabilidade ao longo do tempo. Embora a intervenção tenha como foco o contexto barcelense, o seu conceito apresenta um elevado potencial de replicação, desde que sejam asseguradas as condições ambientais necessárias à preservação das propriedades da madeira utilizada, garantindo a sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo.

Por fim, a intervenção proposta procura valorizar os aspetos espaciais e funcionais da área, promovendo um equilíbrio que assegure a sua unidade, ordem e hierarquia. Assim, estabelece-se uma base estruturante para futuras expansões, garantindo a continuidade e o desenvolvimento harmonioso tanto do tecido urbano como das áreas rurais envolventes.



Figura 61. Planta de implantação – caso de estudo.

6.2. Conceito

Revisitando os conceitos visionários do futurismo arquitetônico, como a cidade plug-in dos Archigram e as cápsulas habitacionais idealizadas por Peter Cook, emerge uma nova abordagem de urbanismo modular. Esta proposta assenta na criação de um sistema de habitação flexível, baseado na integração por meio de um encaixe de unidades pré-fabricadas dentro de uma grelha tridimensional. Este esqueleto estrutural é suportado por um acesso vertical que facilita a circulação e a distribuição das diversas funções no edifício (ver figura 61).

Através da fabricação digital de componentes modulares multifuncionais, torna-se possível a personalização de cada unidade habitacional de acordo com as necessidades específicas, garantindo ao mesmo tempo a distinção entre diferentes módulos e o próprio edifício, proporcionando uma variabilidade arquitetônica única. Cada unidade pode ser adaptada ao pórtico estrutural, conferindo ao edifício um caráter dinâmico e flexível, onde a forma final resulta da interação entre os diferentes elementos modulares.



Figura 62. Modelo digital do edifício modular em *Mass Timber* – vista sul.

Em suma, a combinação de uma estrutura modular personalizável, apoiada por tecnologia de fabricação digital e por materiais sustentáveis, como os materiais que são utilizados no sistema *Mass Timber*, promete transformar a forma como concebemos e construímos edifícios, oferecendo soluções habitacionais inovadoras, flexíveis e ecologicamente responsáveis.

6.3. Módulos habitacionais

A flexibilidade que os componentes modulares em CLT oferecem, permite criar diversas variações nas habitações. Os modelos de habitação podem variar de acordo com as necessidades e preferências de quem os vai habitar. Assim sendo, para o caso de estudo são analisados dois tipos de modelos habitacionais, sendo eles habitação tipo e a habitação tipo-residência.

O edifício é constituído por uma estrutura principal em GLT, a qual desempenha a função de “esqueleto” do sistema construtivo, conferindo suporte e estabilidade ao conjunto edificado (ver Figura 61). Esta estrutura, além de assegurar a integridade mecânica do edifício, serve de matriz organizadora para a articulação dos restantes componentes construtivos. Integradas nesta estrutura encontram-se as infraestruturas técnicas do edifício, como sistemas de abastecimento, drenagem, ventilação e redes elétricas, cujo traçado e instalação se desenvolvem de forma integrada no corpo estrutural.

Os acessos verticais do edifício são compostos por uma caixa de escadas e um núcleo de elevador, ambos construídos em betão armado. Esta solução material contrasta intencionalmente com a leveza visual da estrutura principal em madeira e das boxes modulares em CLT, afirmando-se como elementos de ancoragem e estabilidade estrutural.

A escolha do betão responde simultaneamente a exigências funcionais, como a resistência ao fogo, a durabilidade e o comportamento estrutural, e a critérios formais, ao introduzir uma linguagem tectónica distinta no conjunto. Complementarmente, recorre-se ao aço e ao alumínio na execução das guardas, dos corrimãos e dos lanços de escadas, contribuindo para a segurança, a leveza visual e a coerência material do sistema de acessos.

A articulação entre betão, madeira, aço e alumínio resulta numa solução construtiva híbrida, onde o contraste matérico reforça a leitura entre elementos estáticos e modulares, entre robustez e leveza (ver figura 62).



Figura 63. Modelo digital do edifício modular em *Mass Timber* – vista norte.

O interior das habitações é predominantemente em CLT. As paredes são também em CLT, podendo ser revestidas com gesso cartonado, solução que se repete também nos tetos. Nas áreas destinadas às instalações sanitárias, o CLT é revestido por material cerâmico, garantindo maior resistência à humidade.

6.3.1. Habitação Tipo

A habitação tipo apresenta uma solução arquitetónica compacta e eficiente, com uma área total de 110,32 m², concebida a partir de um sistema modular pré-fabricado em *Mass Timber*. A proposta assenta na utilização de 51 componentes modulares que permitem uma montagem ágil, racionalizada e com elevado desempenho térmico e ambiental. Complementarmente, a solução inclui 4 peças de ligação — designadas como peças de acerto — cuja função consiste em preencher os intervalos entre os módulos principais, assegurando a continuidade física, estrutural e térmica da envolvente.

Tabela 13. Componentes modulares da Habitação Tipo

Componente modular	Quantidade	Volume componente (m³)	Peso componente (kg /m³)	Volume total (m³)	Peso total (kg /m³)
B1	27	1,08	453,60	28,10	12 247,20
B2	5	2,16	907,20	10,80	4 536,00
B3	4	1,62	680,40	3,80	2 721,60
B4	2	0,75	315,00	3,80	630,00
B5	4	0,54	226,80	1,60	907,20
B6	9	0,32	134,40	1,62	1 209,60
B7	4	0,14	58,80	1,70	235,20
Total	-	-	-	51,42	22 486,80

A entrada da habitação é marcada por um recuo estratégico que confere uma transição suave entre o espaço público e o espaço privado, promovendo uma sensação de resguardo e contribuindo para a redução do acesso direto e não autorizado. Este gesto arquitetônico simples, mas eficaz reforça a privacidade dos ocupantes e valoriza a experiência de entrada.

No interior, o espaço é organizado em planta livre (*open space*), integrando as funções de sala de estar, sala de jantar e cozinha num ambiente contínuo e fluido. Esta configuração favorece a convivência e a flexibilidade de uso, adaptando-se facilmente a diferentes estilos de vida. A habitação contempla ainda dois compartimentos amplos, passíveis de serem configurados como quartos ou áreas de trabalho, oferecendo conforto e versatilidade no uso do espaço (ver figura 63). Adicionalmente, inclui uma instalação sanitária completa, dimensionada de acordo com os padrões de habitabilidade e acessibilidade.

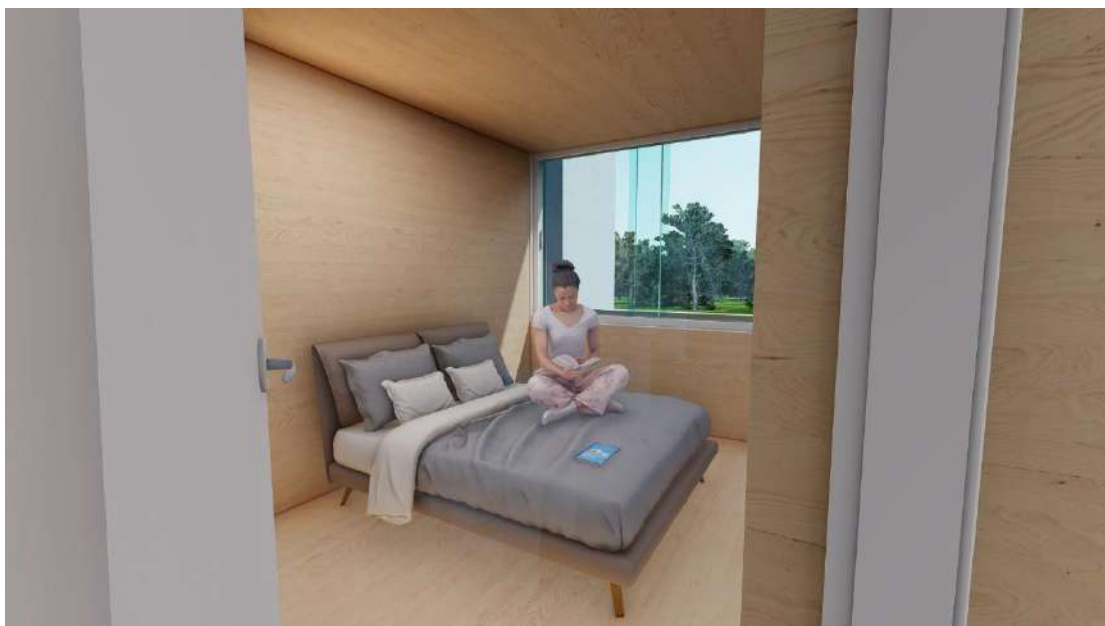


Figura 64. Habitação tipo.

O espaço exterior contíguo à habitação complementa a vivência doméstica, possibilitando o usufruto de áreas ao ar livre para lazer, descanso ou atividades recreativas, promovendo uma ligação direta com o ambiente natural.

Do ponto de vista ambiental e construtivo, a habitação foi projetada para responder aos desafios da sustentabilidade e da eficiência energética. A envolvente opaca apresenta um valor de transmissão térmica (U) de $0,242 \text{ W/m}^2\text{.K}$, evidenciando um desempenho térmico excepcional e contribuindo significativamente para a redução das necessidades

energéticas de aquecimento e arrefecimento. A envolvente opaca da habitação é, na sua configuração base, constituída por um sistema multicamada composto por um componente modular em CLT, isolamento térmico em lã de rocha e um segundo componente modular em CLT, aplicado uniformemente em todas as divisões, com exceção da instalação sanitária. Nesta, a composição difere ligeiramente, integrando CLT, lã de rocha e um revestimento final em material cerâmico, de modo a garantir maior resistência à humidade e facilidade de manutenção.

Importa referir que a envolvente opaca desta unidade habitacional admite variações conforme o desempenho térmico pretendido ou as exigências de projeto. Numa solução alternativa, a composição poderá ser adaptada através da substituição da camada final de CLT por um revestimento em gesso cartonado, mantendo-se inalterada a composição da instalação sanitária (CLT, lã de rocha e revestimento cerâmico). Esta solução alternativa proporciona um desempenho térmico ainda mais eficiente, atingindo um valor de transmissão térmica (U) de 0,297 W/m².K e de lajes 0,30 W/m².K no inverno e 0,294 W/m².K no verão, o que contribui significativamente para a otimização da eficiência energética do edifício.

Adicionalmente, esta habitação apresenta um GWP total de -31 571,88 kg CO₂eq.

Tabela 14. Pegada Carbónica da Habitação Tipo

Boxes	Volume estimado (m ³)	GWP Fases A1 - A5 (kg CO ₂ eq./m ³)	GWP (kg CO ₂ eq.)
B1	28,10	-6,14E+02 *	- 17 253,40
B2	10,80	-6,14E+02 *	- 6 631,20
B3	3,80	-6,14E+02 *	- 2 333,20
B4	3,80	-6,14E+02 *	- 2 333,20
B5	1,60	-6,14E+02 *	- 982,40
B6	1,62	-6,14E+02 *	- 994,68
B7	1,70	-6,14E+02 *	- 1 043,80
Total	51,42	-	- 31 571,88

* Valores retirados da EPD Schilliger cross laminated timber, Schilliger Holz 2020

Importa ainda salientar que esta unidade habitacional foi pensada com um elevado grau de adaptabilidade e evolutividade. A sua composição modular permite a ampliação futura, bem como a duplicação por espelhamento, possibilitando a criação de duas habitações tipo complementares e articuladas. Esta flexibilidade abre caminho para diversas configurações habitacionais, adaptáveis a diferentes contextos territoriais e necessidades familiares, promovendo um modelo de habitação sustentável, escalável e replicável.

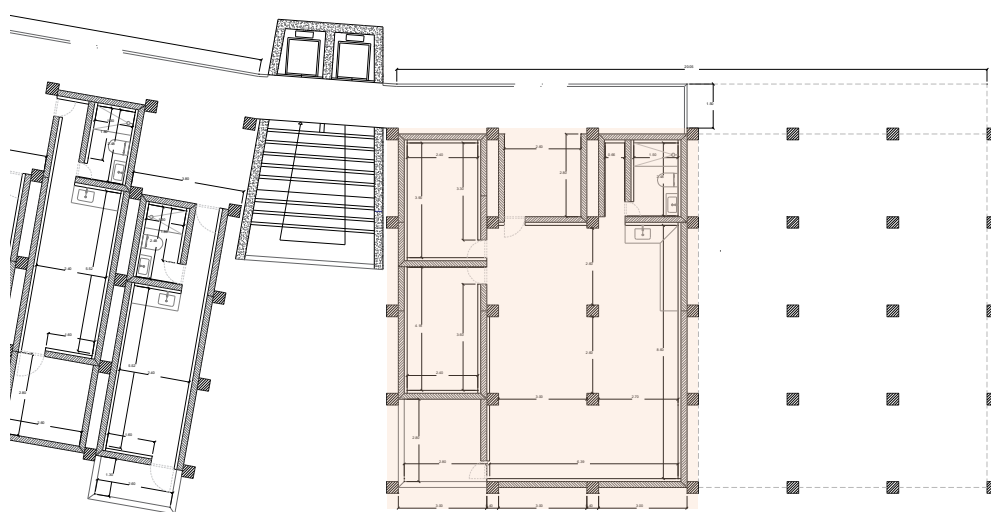


Figura 65. Planta habitação tipo.

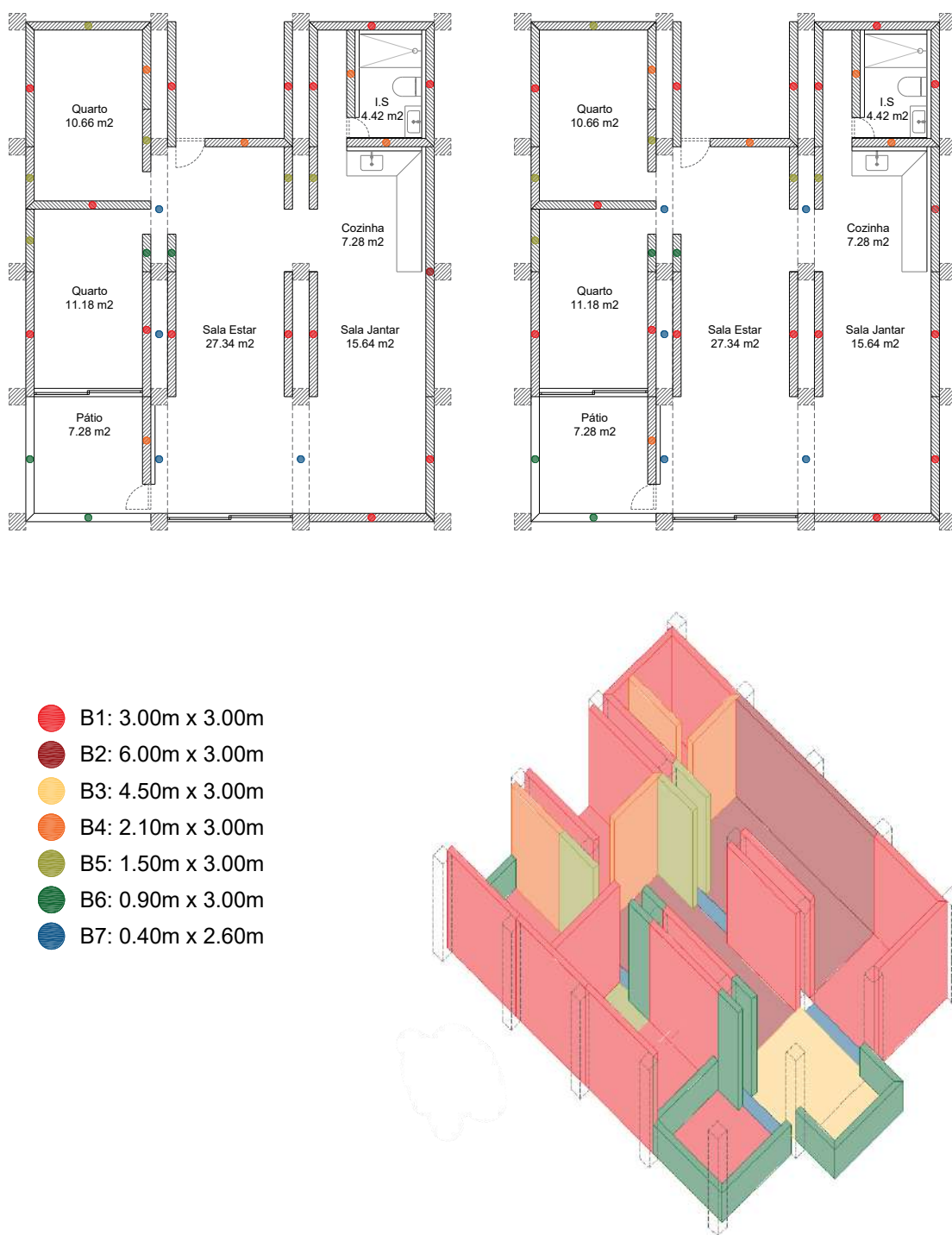


Figura 66. Proposta modular habitação tipo.

Os componentes modulares que compõem a habitação não se restringem exclusivamente à utilização de CLT, podendo ser concebidos a partir de uma diversidade de materiais, seleccionados em função das exigências funcionais, técnicas e ambientais de cada projeto.

Esta flexibilidade material e funcional permite a integração de módulos com características específicas, sejam estas estruturais, térmicas, acústicas ou tecnológicas, possibilitando a substituição ou reconfiguração dos elementos originais sem comprometer a integridade estrutural do conjunto nem a coerência do sistema construtivo. Deste modo, a abordagem modular promove uma elevada adaptabilidade e escalabilidade, favorecendo soluções construtivas mais eficientes, sustentáveis e ajustáveis às necessidades em constante evolução.

Tal como foi referido anteriormente, é possível integrar módulos que incorporem sistemas de parede verde, contribuindo para a melhoria do conforto ambiental, a promoção da biodiversidade urbana e a regulação térmica passiva. De igual modo, podem ser utilizados painéis fotovoltaicos modulares, com o intuito de gerar energia renovável, reforçando o desempenho energético da edificação e reduzindo a dependência de fontes externas.

Esta estratégia construtiva evidencia o carácter flexível e evolutivo da solução modular, permitindo a adaptação da habitação a diferentes contextos funcionais, ambientais e tecnológicos ao longo do tempo.



Figura 67. Parede com painel fotovoltaico, Habitação Tipo.



Figura 68. Parede verde, Habitação Tipo.



Figura 69. Habitação Tipo.

6.3.2. Habitação tipo - Residência

A habitação tipo – residência foi concebida com o propósito de acolher, de forma temporária, utilizadores com necessidades de estadia de curta duração, como estudantes, docentes deslocados e profissionais de instituições locais, nomeadamente do hospital da região. Com uma área total de 36 m², esta unidade recorre à montagem de 16 componentes modulares pré-fabricados em CLT, adotando uma lógica construtiva racional, eficiente e altamente sustentável.

Tabela 15. Componentes modulares da habitação tipo - Residência

Componente modular	Quantidade	Volume componente (m³)	Peso componente (kg /m³)	Volume total (m³)	Peso total (kg /m³)
B1	8	1,08	453,60	5,4	3 628,80
B2	2	2,16	907,20	6,5	1 814,40
B3	2	1,62	680,40	1,52	1 360,80
B4	0	0,75	315,00	1,08	0,00
B5	1	0,54	226,80	0,96	226,80
B6	3	0,32	134,40	1,62	403,20
B7	0	0,14	58,80	17,08	0,00
Total	-	-	-	34,16	7 434,00

A organização espacial pauta-se por uma clara distinção entre zonas de uso comum e espaços de transição. As entradas recuadas cumprem um papel fundamental na definição do limiar entre o domínio público e o semiprivado, garantindo maior controlo visual e reforçando a privacidade dos utilizadores. Este gesto arquitetónico proporciona não apenas um resguardo físico, mas também psicológico, fundamental numa tipologia de ocupação rotativa e temporária.

Cada unidade habitacional apresenta-se em formato open space, promovendo a fluidez espacial e a versatilidade de uso. Esta configuração integra uma área de descanso, uma pequena zona de estar e refeição, uma instalação sanitária privativa e um espaço exterior contíguo, pensado para melhorar a qualidade da habitação e proporcionar momentos de lazer e contacto com o exterior. Importa referir que, em determinados casos, este espaço exterior não está incluído na estrutura base da unidade, o que implica a posterior adição de varandas modulares ou plataformas elevadas, permitindo ajustar a solução arquitetónica às características do lote ou às exigências específicas do local de implantação (ver figura 69).

Do ponto de vista ambiental e construtivo, esta unidade habitacional foi concebida para responder de forma rigorosa aos atuais desafios da sustentabilidade, da eficiência energética e da redução do impacto ambiental associado ao setor da construção. A estratégia adotada na conceção da envolvente térmica reflete uma preocupação com o desempenho energético do edifício ao longo do seu ciclo de vida, promovendo simultaneamente o conforto térmico dos utilizadores e a minimização do consumo energético.



Figura 70. Habitação tipo - Residência.

A envolvente opaca apresenta um valor de U de $0,242 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, o que evidencia um bom desempenho térmico. Este valor reflete a elevada capacidade de isolamento da solução construtiva adotada, contribuindo significativamente para a redução das necessidades de aquecimento no inverno e de arrefecimento no verão, com evidentes benefícios em termos de eficiência energética e redução da pegada ambiental.

Na sua configuração base, a envolvente opaca é composta por um sistema multicamada que integra, de forma sequencial, um componente modular em CLT, uma camada de isolamento em lã de rocha e um segundo componente modular em CLT. Esta composição é aplicada de forma uniforme em todas as divisões da habitação, assegurando a continuidade térmica e a homogeneidade do desempenho construtivo.

A exceção verifica-se na instalação sanitária, onde a solução construtiva é adaptada às exigências específicas de resistência à humidade e facilidade de manutenção. Nesta zona, a envolvente é constituída por CLT, lã de rocha e um revestimento final em material cerâmico, garantindo durabilidade, higiene e proteção adicional face à exposição à água e ao vapor.

Importa referir que a envolvente opaca desta unidade habitacional admite variações conforme o desempenho térmico pretendido ou as exigências de projeto. Numa solução alternativa, a composição poderá ser adaptada através da substituição da camada final de CLT por um revestimento em gesso cartonado, mantendo-se inalterada a composição da

instalação sanitária (CLT, lã de rocha e revestimento cerâmico). Esta solução alternativa proporciona um desempenho térmico ainda mais eficiente, atingindo um valor de transmissão térmica (U) de 0,297 W/m².K de parede e de lajes 0,30 W/m².K no inverno e 0,294 W/m².K no verão, o que contribui significativamente para a otimização da eficiência energética do edifício.

Adicionalmente, esta habitação apresenta um GWP total de -20 974,24 kg CO₂eq.

Tabela 16. Pegada Carbónica da habitação tipo – Residência.

Boxes	Volume estimado (m ³)	GWP Fases A1 - A5 (kg CO ₂ eq/m ³)	GWP (kg CO ₂ eq)
B1	5,4	-6,14E+02 *	- 3 315,60
B2	6,5	-6,14E+02 *	- 3 991,00
B3	1,52	-6,14E+02 *	- 933,28
B4	1,08	-6,14E+02 *	- 663,12
B5	0,96	-6,14E+02 *	- 589,44
B6	1,62	-6,14E+02 *	- 994,68
B7	17,08	-6,14E+02 *	- 10 487,12
Total	34,16	-	- 20 974,24

* Valores retirados da EPD Schilliger cross laminated timber, Schilliger Holz 2020

Este modelo habitacional alia funcionalidade, conforto e sustentabilidade, promovendo uma resposta habitacional flexível, modular e replicável. A adaptabilidade do sistema construtivo permite adequar cada unidade às necessidades individuais dos utilizadores, mantendo a harmonia entre bem-estar e desempenho técnico, essencial numa solução pensada para contextos de habitação temporária.

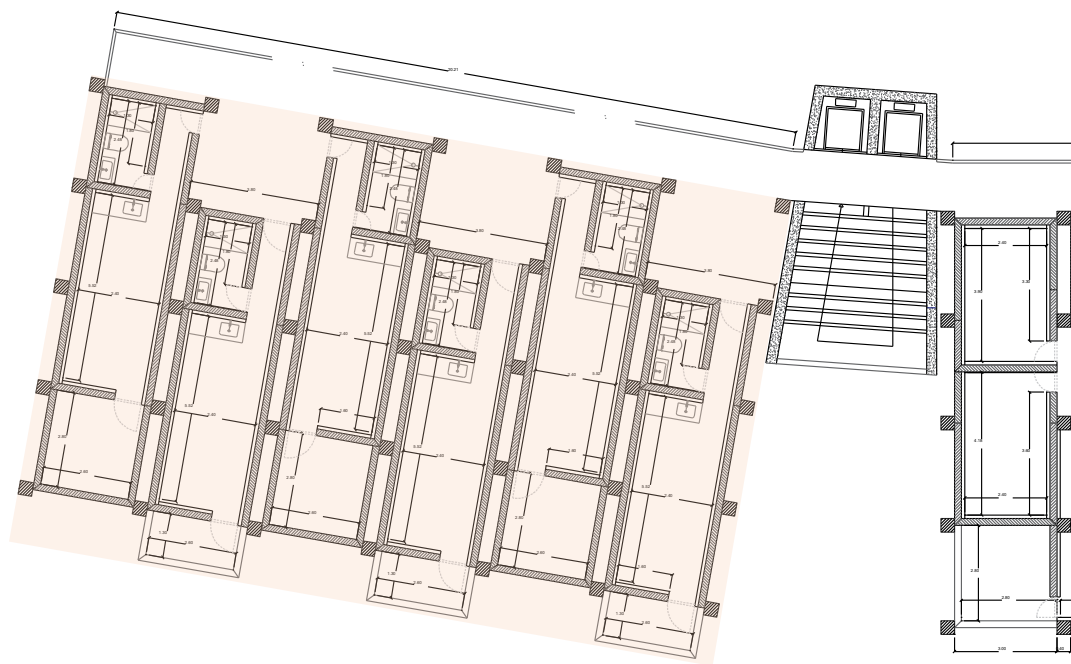


Figura 71. Planta habitação tipo - Residência.

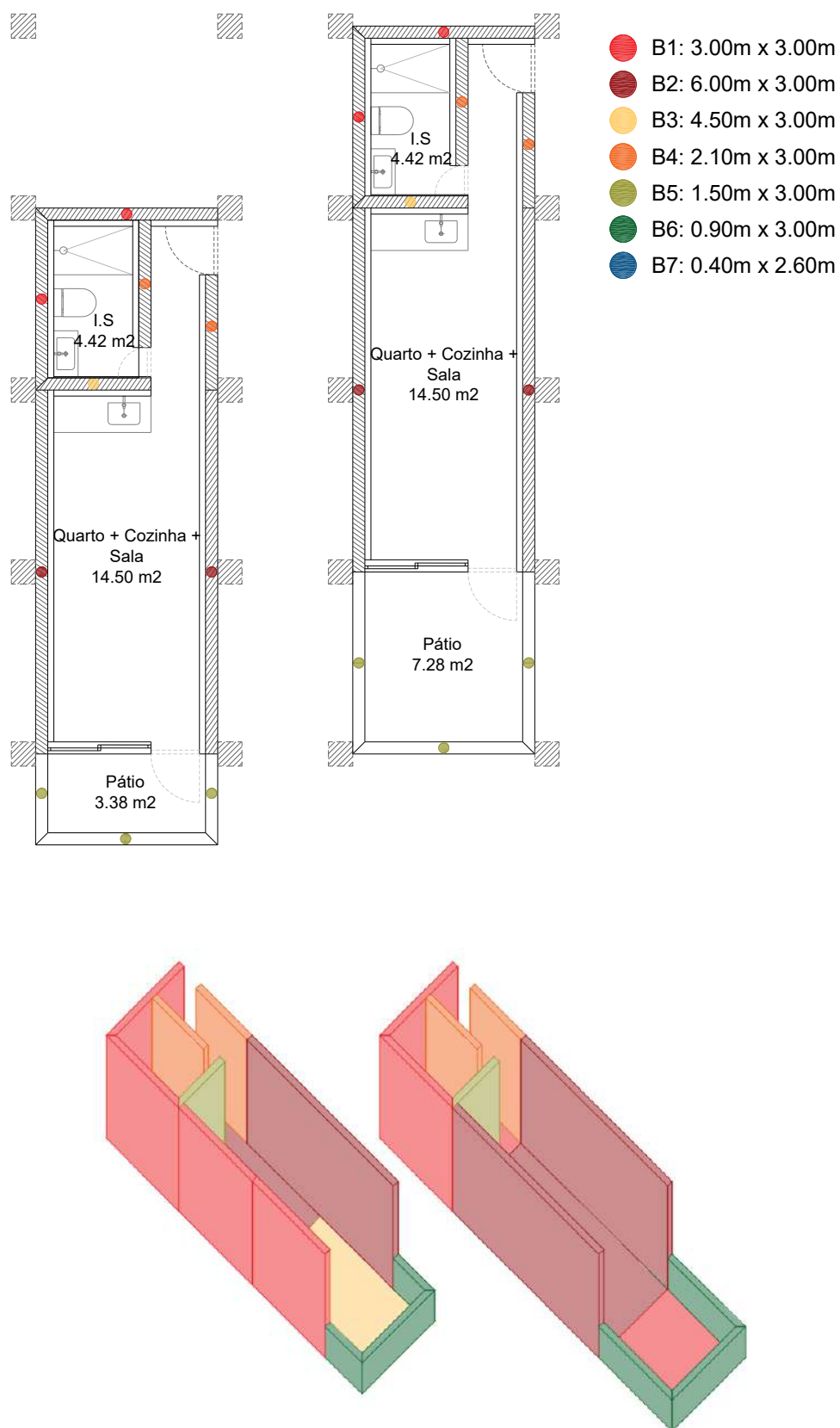


Figura 72. Proposta modular habitação tipo - Residência.

Os componentes modulares da habitação apresentam uma elevada flexibilidade no que diz respeito à sua composição e função, não sendo obrigatoriamente constituídos por painéis em CLT. Conforme demonstrado anteriormente, estes elementos podem ser substituídos por módulos com outras finalidades ou características técnicas, desde que compatíveis com o sistema construtivo e com os requisitos de desempenho da edificação.

Entre as alternativas possíveis destacam-se os módulos com sistemas de parede verde, que contribuem para a melhoria do microclima, a regulação térmica e a integração paisagística do edifício, bem como os painéis fotovoltaicos, que permitem a produção de energia renovável in situ, promovendo a eficiência energética e a redução da pegada ecológica da construção.



Figura 73. Parede verde, habitação tipo - Residência.



Figura 74. Parede com painel fotovoltaico, habitação tipo - Residência.

Esta abordagem modular e substituível permite adaptar a habitação às necessidades específicas do utilizador, às condições climáticas locais ou às estratégias de sustentabilidade adoptadas, conferindo à solução arquitectónica um carácter evolutivo e resiliente ao longo do tempo.



Figura 75. Habitação tipo - Residência.

Conclusões

Conclusões

Ao longo deste trabalho, aponta-se a necessidade urgente de reconfigurar os modos de construir perante os desafios impostos pelas alterações climáticas. A mitigação das emissões de carbono no setor da construção é um tema central, não apenas pela sua relevância ambiental, mas também pela responsabilidade que a arquitetura deve assumir no desenho de um futuro mais sustentável e consciente.

A análise dos diferentes materiais estruturais, como o aço, betão e madeira, permite perceber que a escolha dos sistemas construtivos tem um impacto direto na pegada carbónica dos edifícios. Neste contexto, a utilização de madeiras transformadas, em particular no sistema *Mass Timber*, como o CLT e o GLT, demonstram um elevado potencial de redução das emissões de GEE, posicionando-se como alternativas credíveis e responsáveis para um setor historicamente marcado por práticas intensivas na utilização de recursos não renováveis.

Mais do que uma simples troca de materiais, defende neste estudo uma mudança de paradigma. A introdução de soluções construtivas baseadas na pré-fabricação e na modularidade aponta para uma arquitetura mais eficiente, flexível e adaptável. Modelos como os sistemas híbridos e a abordagem *plug-in* oferecem não só vantagens ambientais, mas também uma capacidade real de resposta às necessidades em constante transformação da sociedade contemporânea. Ao permitir a substituição e adaptação de componentes sem comprometer a integridade do edifício, estes sistemas promovem a circularidade e prolongam o ciclo de vida útil da construção.

A arquitetura deve deixar de ser estática e começar a comportar-se como um organismo vivo capaz de crescer, adaptar-se e responder ao contexto. Projetos como o *Tamedia Office* ou o *Brock Commons* não são apenas edifícios eficientes, são manifestações claras de que é possível aliar tradição e inovação, sustentabilidade e qualidade arquitetónica.

Partindo da lógica da modularidade e pré-fabricação em *Mass Timber*, o protótipo desenvolvido no âmbito desta investigação foi desenhado com base numa estrutura racional e repetível, permitindo eficiência na produção e facilidade de montagem no local. Esta abordagem não só reduz drasticamente o tempo de obra, como também minimiza o desperdício de materiais, promovendo uma construção limpa, controlada e energeticamente eficiente. O uso do sistema *Mass Timber* não é apenas uma escolha técnica, mas uma decisão

consciente, com baixo impacto ambiental e alta capacidade de manter o sequestro de carbono, reforçando a coerência ecológica do projeto.

A estratégia *plug-in* adotada no protótipo permite desenvolver um sistema em que componentes habitacionais ou funcionais que podem ser encaixados, substituídos ou reposicionados ao longo do tempo. Esta característica garante que o edifício se mantenha atual perante mudanças nas necessidades dos seus ocupantes, permitindo prolongar o seu ciclo de vida útil e evitar intervenções invasivas.

O desenho do protótipo procura também responder a uma realidade habitacional, tendo como base um contexto urbano denso e em transformação. A forma compacta e vertical do modelo, aliada à flexibilidade de ocupação, mostra como é possível responder à escassez de solo nas cidades sem comprometer a qualidade do espaço habitado. A planta livre permite múltiplas configurações internas, desde unidades habitacionais compactas até soluções mais amplas ou interligadas, respeitando os diferentes estilos de vida, modelos familiares e referências culturais.

Além disso, o protótipo foi pensado como uma infraestrutura de acolhimento evolutiva, onde o espaço é compreendido como algo vivo, transformável, e profundamente ligado às experiências dos seus utilizadores. A arquitetura deixa de ser estática para passar a ser participativa.

Assim, esta dissertação reforça a ideia de que o futuro da construção passa por práticas que respeitem o ambiente, que integrem tecnologias digitais e que, acima de tudo, coloquem o ser humano e o planeta no centro do processo projetual. A madeira, enquanto material renovável, aliado a sistemas modulares e a uma lógica de pré-fabricação, representa um caminho possível e desejável para responder aos desafios do nosso tempo.

Projetar com consciência ecológica não é uma opção, é uma responsabilidade. Cabe à arquitetura abraçar essa responsabilidade com criatividade, rigor e sensibilidade. A construção de amanhã começa nas escolhas de hoje.

Referências

Referência

Almeida, P. (2009). Sistema construtivo de madeira em edifícios de habitação de baixa densidade em Portugal Universidade de Lisboa]. Lisboa – Portugal.

Archdaily. (2014). Prêmio Pritzker 2014: Edifício Comercial Tamedia / Shigeru Ban Architects. <https://www.archdaily.com.br/br/01-181822/premio-pritzker-2014-edificio-comercial-tamedia-slash-shigeru-ban-architects>

Archdaily. (2018). Inside Vancouver's Brock Commons, the World's Tallest Mass Timber Building.

Archdaily. (2023). 50 Projetos que mostram a ascensão da construção com madeira laminada cruzada.

Architects, W. T. (2018). 100 Projects UK CLT.

Atelier Cattani. (2010). Cité A'DOCKS. <https://divisare.com/projects/199910-atelier-cattani-vincent-fillon-cite-a-docks>

Banham, R. (1969). The architecture of the well-tempered environment. Architectural P.

Barbosa, A. C. d. M. (2023). A Pré-fabricação como Método Construtivo para uma Arquitetura Circular Universidade do Minho].

Barbosa, S. I. F. (2015). Reforço de ligações tradicionais de madeira Universidade do Minho].

Barros, A. M. D. (2011). Fabricação digital : sistematização metodológica para o desenvolvimento de artefatos com ênfase em sustentabilidade ambiental Universidade Federal do Rio Grande do Sul].

Brandner, R., G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, & Thiel, a. A. (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

Buckminster Fuller. (2023). Shelter. <https://www.buckminsterfuller.net/images/shelter.html>

C20 Society. (2024). Dymaxion House, Wichita, Kansas – Buckminster Fuller (1944-46). <https://c20society.org.uk/building-of-the-month/dymaxion-house-wichita-kansas#dismiss-cookie-notice>

Cachim, P. B. (2014). *Construção em Madeira – A Madeira como Material de Construção*. Publindústria.

CREE Buldings. (2021). The CREE System - An elegant and refined prefabricated timber-hybrid building system for versatile high-rise construction. <https://www.creebuildings.com/system/>

Dalemarken. (2023). Análise do Ciclo de Vida (ACV). Retrieved Novembro 2024 from <https://www.dalemarken.dk/services/>

Direção Geral de Energia e Geologia. (2020). Guia SCE - Parâmetros de Cálculo *Adene*.

Dunn, N. (2012). *Digital Fabrication in Architecture*. Laurence King.

European Commission. (2002). Life-cycle assessment (LCA) for steel construction : final report.

European Environment Agency. (2019). Pacto Ecológico Europeu. Retrieved Novembro, 2024 from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt

European Environment Agency. (2024). Greenhouse gas emissions from transport in Europe. Retrieved November 2024 from <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport>

Foxell, S. (2014). A carbon primer for the built environment. Routledge.

Hasslacher. (2024). Glued laminated timber - The engineered timber beam.

Herzog, T. (2004). Timber construction manual. Birkhäuser. Publisher description <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0827/2004275059-d.html>

Hogan-O'Neill, W. (2021). Prefabricated and Modular Architecture: Aligning Design with Manufacture and Assembly - Softcover. The Crowood Press.

IPCC. (2023). CLIMATE CHANGE 2023 3. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Kengo Kuma Associates. (2010). GC Prostho Museum Research Center.

Kengo Kuma Associates. (2010). Yusuhara Wooden Bridge Museum. <https://kkaa.co.jp/en/project/yusuhara-wooden-bridge-museum/>

Kerto. (2020). LVL - Fast, Light, Green. Metsa.

Kronenburg, R. (1996). Portable architecture. Architectural Press. Publisher description <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1117/96035761-d.html>

Kronenburg, R., & Klassen, F. (2006). Transportable environments 3. Taylor & Francis. Table of contents <http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip0511/2005010636.html>

Kumar, V., Lo Ricco, M., D. Bergman, R., Nepal, P., & C. Poudyal, N. (2024). Environmental impact assessment of mass timber, structural steel, and reinforced concrete buildings based on the

2021 international building code provisions. Building and Environment, 251.
<https://doi.org/https://doi.org/10.016/j.buildenv.2024.111195>

Lawson, M., Ogden, R., & Goodier, C. I. (2014). Design in modular construction. CRC Press, Taylor & Francis Group. Cover image
<http://images.tandf.co.uk/common/jackets/websmall/978041555/9780415554503.jpg>

Lins, M. (2017). Hotel Revier / Carlos Martinez Architekten.
https://www.archdaily.com/891200/hotel-revier-carlos-martinezarchitekten?ad_medium=office_landing&ad_name=article

Luthi, T. (2022). Mass Timber Design Manual (Vol. 2). WoodWorks and Think Wood.

Martins, C. R., Pereira, P. A. P., Lopes, W. A., & Andrade, J. B. (2003). Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: A importancia na química da atmosfera. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola.

& Celani, G. (2008). Implementando a fabricação digital e a prototipagem rápida em cursos de arquitetura: dificuldades e realidades. Gráfica Digital - Integración y Desarrollo.

Rothoblaas. (2024). <https://www.rothoblaas.pt/>

Sadler, S., & Archigram Group. (2005). Archigram : architecture without architecture (1st ed.). MIT Press,.

Sasaki, N., & Kim, S. (1966-2012). Biomass carbon sinks in Japanese forests.

(2022). The Importance of Wood and Timber in Sustainable Buildings.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-71700-1>

Schneider, T., & Till, J. (2007). Flexible housing (1st ed.). Architectural Press, an imprint of Elsevier. Publisher description <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0808/2007282780d.html>

Sciomenta, M., Vihmann, J. L., Tuhkanen, E., Just, A., & Fragiaco, M. (2024). The effects of timber species and adhesive type on the behavior of finger joints in tension under fire conditions. *Construction and Building Materials*, 15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138080>

Smith, R. E. (2010). Prefab architecture : a guide to modular design and construction. John Wiley & Sons.

Staib, G., Dörrhöfer, A., & Rosenthal, M. J. (2008). Components and systems : modular construction : design, structure, new technologies (1st ed.). Edition Detail Birkhäuser. [http://dnb.info/986517658/04 Inhaltsverzeichnis](http://dnb.info/986517658/04_Inhaltsverzeichnis)

StoraEnso. (2025). Protect and Connect. <https://www.storaenso.com/en/products/mass-timber-construction/sylva/protect-connect>

Svirid, D. (2013). City of the sun. <https://www.behance.net/gallery/6887879/city-of-the-sun>

Sviták, M., Gašparík, M., & Penc, J. (2014). Heat Resistance of Glued Finger Joints in Spruce Wood Constructions. <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.7529-7541>

Table of contents <http://www.loc.gov/catdir/toc/fy0803/2007282780.html>

Tamarack Media. (2024). Bucks - Kalesnikoff Mass Timber. https://kalesnikoff.com/modular-mass-timber/?utm_source=chatgpt.com

The International EPD System. (2021). Environmental Product Declarations. Retrieved Dezembro from <https://www.environdec.com/all-about-epds/the-epd>

Thinkwood. (2024). Glu-la-lam! <https://www.thinkwood.com/mass-timber/glued-laminated-timber-glulam>

TimberLab. (2024). Cutom Mass Timber Fabrication. <https://timberlab.com/services/fabrication>

Toit, W. d. (2020). Architecture as Anarchy. <https://www.thepathosofthings.com/p/architecture-as-anarchy>

TRADA Technology. (2012). Concise illustrated guide to timber connections. TRADA Technology Ltd.

Wei, P., B. J. Wang, H. Li, L. Wang, S. Peng, & and L. Zhang. (2019). A comparative study of compression behaviors of cross-laminated timber and glued-laminated timber columns. *Constr Build Mater*, 222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.139>

Whywood. (2024). Madeira Microlaminada. Whywood. Retrieved Janeiro 2025 from <https://whywood.com/madeira-microlaminada/>