

M

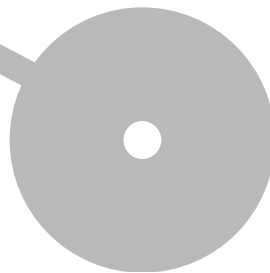
MESTRADO

MESTRADO EM DESIGN
ESPECIALIZAÇÃO EM DESIGN DE PRODUTO

Sistema de Construção Modular: Tecnologias Digitais para Fabricação, Montagem e Desmontagem

Pedro Miguel Fernandes Oliveira

[10/2025]



Politécnico do Porto
Escola Superior de Media Artes e Design

Pedro Miguel Fernandes Oliveira

**Sistema de Construção Modular: Tecnologias Digitais para
Fabricação, Montagem e Desmontagem**

Trabalho de Projeto
Mestrado em Design – Especialização em Design de Produto
Orientação: Prof. Abel Pedro Gonçalves Tavares

Vila do Conde, outubro de 2025

Pedro Miguel Fernandes Oliveira

**Sistema de Construção Modular: Tecnologias Digitais para
Fabricação, Montagem e Desmontagem**

Trabalho de Projeto
Mestrado em Design – Especialização em Design de Produto

Membros do Júri

Presidente

Prof.^a Doutora Cristina Ferreira Fonseca Lousada Soares
Escola Superior de Media Artes e Design – Instituto Politécnico do Porto

Vogal - Orientador

Prof. Abel Pedro Gonçalves Tavares
Escola Superior de Media Artes e Design – Instituto Politécnico do Porto

Vogal - Arguente

Prof. José Augusto Rodrigues de Sousa Coelho
Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias da Produção de Aveiro-Norte–
Universidade de Aveiro

AGRADECIMENTOS

Este percurso não teria sido possível sem o contributo e a presença de várias pessoas que, de diferentes formas, marcaram este trabalho.

Agradeço em primeiro lugar, ao meu orientador, o Professor Abel Tavares, deixo o meu sincero reconhecimento pela orientação exigente e catalisadora, pelo rigor intelectual e pela total disponibilidade demonstrada.

Aos docentes da ESMAD, agradeço por toda a dedicação e pelo conhecimento transmitido.

Ao Sérgio Bessa, pelo apoio técnico prestado durante a prototipagem, e pelo conhecimento partilhado sobre materiais e processos de fabrico.

Agradeço ao Wilson Zárate, pela mentoria, essencial para o desenvolvimento do algoritmo paramétrico.

À minha família, o mais profundo agradecimento pelo apoio e pela compreensão ao longo deste caminho.

Por fim, o agradecimento à minha esposa, Sandra Senra, pela crença e amor inabalável que torna tudo possível.

RESUMO ANALÍTICO

O projeto, objeto do presente Relatório, consiste no desenvolvimento de um Sistema de Construção Modular de acordo com os princípios do Design for Manufacturing, Assembly and Disassembly (DfMAD), explorando as potencialidades da fabricação digital. Partindo da necessidade de soluções construtivas acessíveis, reversíveis e sustentáveis, o sistema conjuga design paramétrico, encaixes reversíveis e processos de fresagem CNC, possibilitando a produção distribuída de módulos habitáveis de montagem intuitiva.

A investigação combinou análise teórica, estudo de casos de referência e experimentação prática, resultando na conceção de um protótipo de módulo de parede produzido em contraplacado de 18 mm e validado através de ensaios seccionais à escala 1:1 e de um módulo à escala 1:2, mantendo os encaixes e a espessura em escala real. O sistema distingue-se por recorrer exclusivamente a encaixes em madeira, eliminando a necessidade de fixações metálicas, e por se estruturar como um conjunto reduzido de peças intercambiáveis e reconvertíveis, concebidas para garantir montagem sem fixações permanentes e facilitar a desmontagem e reutilização dos componentes.

O configurador paramétrico desenvolvido em Grasshopper permitiu estruturar um fluxo direto entre conceção e fabrico, ao disponibilizar uma interface sequencial para o utilizador: definição da área a ocupar, seleção tipológica módulo a módulo, visualização tridimensional da configuração final e exportação automática de outputs. Entre estes incluem-se os ficheiros DXF organizados por layers de fabrico, relatórios quantitativos sobre materiais e uma imagem 3D representativa do conjunto final.

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade de um sistema modular aberto e incremental, que pode ser replicado em contextos de autoconstrução, produção local ou ensino de fabricação digital, afirmando-se como uma proposta complementar às soluções convencionais orientada para simplicidade, acessibilidade e replicabilidade.

Palavras-chave: Design de Produto; Fabricação Digital; DfMAD; Construção Modular; Parametrização; Sustentabilidade.

ABSTRACT

This project, the subject of the present report, consists in the development of a Modular Construction System based on the principles of Design for Manufacturing, Assembly and Disassembly (DfMAD), exploring the potential of digital fabrication. Addressing the need for accessible, reversible, and sustainable construction solutions, the system combines parametric design, reversible joints, and CNC milling processes, enabling the distributed production of habitable modules with intuitive assembly.

The research combined theoretical analysis, reference case studies, and practical experimentation, resulting in a wall module prototype produced in 18 mm plywood and validated through 1:1 sectional tests and a 1:2 scaled module, maintaining real-scale thickness and joints. The system is distinguished by the exclusive use of wooden joints, eliminating the need for metallic fasteners, and by its structure as a reduced set of interchangeable and reconfigurable components. These were conceived to ensure assembly without permanent fixings, facilitating disassembly and the reuse of parts.

The parametric configurator developed in Grasshopper structured a direct workflow between design and manufacturing, offering a sequential interface for the user: defining the occupied area, selecting module typologies, visualizing the final 3D configuration, and automatically exporting outputs. These include DXF files organized by manufacturing layers, quantitative reports on materials, and a 3D image of the final assembly.

The results demonstrate the feasibility of an open and incremental modular system that can be replicated in contexts of self-construction, local production, or digital fabrication education. The Loop positions itself as a complementary proposal to conventional solutions, oriented towards simplicity, accessibility, and replicability.

Keywords: Product Design; Digital Fabrication; DfMAD; Modular Construction; Parametric Design; Sustainability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Enquadramento	19
1.2	Objetivos	20
1.3	Justificação	21
1.4	Ensaio prévio: Curso de Robótica e Projeto Corkuka	22
1.5	Metodologia	23
1.6	Estrutura do documento	24
2	ENQUADRAMENTO TEÓRICO E ESTADO DA ARTE	26
2.1	Arquitetura modular: Definições e evolução histórica	26
2.2	Métodos modernos de construção e níveis de pré-fabrico	27
2.3	Construção tipo wood frame: antecedentes da modularidade em madeira	29
2.4	Sustentabilidade, economia circular e ecodesign na construção modular	30
2.5	Fabricação digital e produção distribuída	32
2.6	Design for Manufacturing, Assembly and Disassembly (DfMAD)	34
2.7	Sistemas abertos, parametrização e personalização	36
2.8	O Design como estratégia de exploração e desenvolvimento de soluções	37
2.9	Contributos do design generativo na arquitetura modular	38
2.10	Análise comparativa de materiais sustentáveis para construção modular	39
2.11	Síntese e enquadramento para os estudos de caso	40
3	ESTUDOS DE CASO	42
3.1	Casas Desmontáveis - Jean Prouvé	42
3.2	Packaged House System - Walter Gropius e Konrad Wachsmann	44
3.3	WikiHouse – WikiHouse Foundation	45
3.4	Digital Wood Joints - Jochen Gros	47
3.5	Open ReWall - Filipe Brandão	49
3.6	EDFAB - McCulloch, Patel e Potauaine	50
3.7	Sistema UBuild – Studio Bark	51
3.8	De Demontabele Lantaarn - Floris van der Kleij	52
3.9	AUAR – Automated Architecture	53
3.10	Reconfigurable Wood Architecture – Anja Kunic	54

3.11	Discussão dos casos estudados.....	56
4	DESENVOLVIMENTO, PROTOTIPAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DIGITAL	58
4.1	Conceito e requisitos de projeto	58
4.2	Seleção de materiais: Comparação e justificação.....	62
4.3	Encaixes reversíveis em madeira: Referências e desenvolvimento.....	63
4.4	Estrutura modular e tipologias de módulo	65
4.5	Sequência de montagem do módulo	73
4.6	Geração de ficheiros para fabrico CNC.....	74
4.7	Prototipagem e testes.....	75
4.7.1	Ensaio seccionais	76
4.7.2	Protótipo do módulo.....	79
5	ALGORITMO PARAMÉTRICO: CONFIGURAÇÃO E PERSONALIZAÇÃO	83
5.1	Estrutura do algoritmo e fluxo de utilização.....	83
5.2	Interface e experiência do utilizador	85
5.3	Relatórios automáticos e outputs gerados	86
5.4	Limitações atuais e perspetivas futuras.....	87
6	DISCUSSÃO E AVALIAÇÃO CRÍTICA	88
6.1	Avaliação do sistema desenvolvido	88
6.2	Limitações e potencial de escalabilidade.....	90
6.3	Contributos para a sustentabilidade e inovação em construção modular.....	91
7	CONCLUSÃO	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	ANEXOS.....	101
	Anexo A – Prototipagem e testes à escala real.....	101
	Anexo B – Algoritmo paramétrico (Grasshopper).....	111
	Anexo C – Projeto Corkuka.....	120
	Anexo D – Desenhos técnicos do sistema construtivo.....	125

Lista de Figuras

Figura 1 – Projeto Corkuka: cadeira em fase de produção por CNC montada em braço robótico. Elaboração própria (2025).	22
Figura 2 – Metodologia adotada no projeto, estruturada em quatro fases principais. O processo segue a lógica iterativa de Research through Design, em que conceção, experimentação e avaliação interligam-se continuamente. Elaboração própria (2025).	23
Figura 3 – Esquema gráfico da estrutura da tese. Elaboração própria (2025).	25
Figura 4 – Distribuição das fases da construção em quatro abordagens: convencional, por painéis (2D), híbrida e volumétrica (3D). Reproduzido de Oliveira et al., 2017, Fig. 2.	28
Figura 5 – Habitação de guerra, Erie, Pensilvânia, 1941. Fotografia de Al Palmer (via The Plan, 2021).	29
Figura 6 – Diagrama dos sistemas da economia circular: ciclos biológicos e técnicos. Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2019)	31
Figura 7 – Economia linear vs. circular. Fonte: World Economic Forum (2016).....	31
Figura 8 – Produção centralizada e produção distribuída. Fonte: Rodrigo Chiesse (2025, p.76).....	33
Figura 9 – <i>Cenários de fim de vida quando a desmontagem substitui a demolição</i> . Nota: Reproduzido de “Open reWall: Survey-to-Production Workflow for Building Renovation”, por F. J. S. Brandão, 2022, Fig.1-5 (ISCTE). A figura apresentada por Brandão é baseada em Crowther (2001).....	35
Figura 10 – Imagem baseada na descrição de Frayling (1993) das três abordagens de Investigação em Design. Adaptado de ArchPsych.co.uk (2023).	37
Figura 11 - Casa desmontável 6x6, 1944. Montada na Camarga, 2014. Fotografia de Galerie Patrick Seguin.	43
Figura 12 – Casa desmontável 6x6, 1944. Em montagem na Camarga, 2014. Fotografia de Galerie Patrick Seguin.	43
Figura 13 – Estrutura e encaixes do Packaged House System, de Walter Gropius e Konrad Wachsmann. Fonte: ARCCA Digest, https://arccadigest.org/walter-gropius-and-prefab/	44

Figura 14 – WikiHouse apresentada por Alastair Parvin no TED2013,	45
Figura 15 - Montagem de módulos WikiHouse em madeira. Reproduzido de WikiHouse (2022).	46
Figura 16 – Estrutura de parede WikiHouse em fase de montagem. Reproduzido de WikiHouse (2022).	46
Figura 17 – 50 Digital Wood Joints: seleção de encaixes madeira-madeira para fabrico CNC. Layout: Meredith Scheff-King; projeto: Jochen Gros. Fonte: Flexible Stream.	48
Figura 18 – ORW v4.2: Com quatro componentes montados. (Reproduzido de Brandão, 2022, Fig. 5-54, p. 183).	49
Figura 19 – EDFAB 3.0 na BuildNZ Designex expo. Fotografia de Yusef Patel (Reproduzido de McCulloch, Patel e Potauaine, 2021.).....	50
Figura 20 - U-Build, Internal Living Pods: montagem de módulo interior. (Reproduzido de U-Build, (s.d.).....	52
Figura 21 – Kit de ferramentas e componentes utilizados no sistema U-Build. Reproduzido de U-Build (s.d.).	52
Figura 22 - The Demountable Lantern: vista exterior da fachada principal. Reproduzido de Studio florisvanderkleij (s.d.).....	53
Figura 23– The Demountable Lantern: detalhe de ligação estrutural em madeira. Reproduzido de Studio florisvanderkleij (s.d.).	53
Figura 24 – Braço robótico a montar um protótipo de edifício. Reproduzido de AUAR (s.d.).....	54
Figura 25– Esquema de produção e montagem robotizada do sistema modular AUAR. Reproduzido de AUAR (s.d.).....	54
Figura 26 – Processo de montagem do sistema Reconfigurable Wood Architecture, com detalhe dos encaixes modulares. Reproduzido de Kunic (2023, p. 93).	55
Figura 27 – Protótipo físico do sistema Reconfigurable Wood Architecture. Reproduzido de Kunic (2023, p. 107).....	55
Figura 28 – Esquissos. Elaboração própria (2025).....	59
Figura 29 – Estudo de módulos de laje e cobertura. Elaboração própria (2025).	60
Figura 30 - Problema do canto interior em corte CNC. Fonte: Filson et al., Design for CNC, 2017.	61

Figura 31– Tipos de fillets aplicados a cantos interiores: plain corner, dog bone, t-bone e sniglet. Fonte: Filson et al., Design for CNC, 2017.....	61
Figura 32 – As três tipologias principais de módulo de parede: opaco, com vão e com porta. Elaboração própria (2025).....	62
Figura 33 – Tipologias de encaixes selecionadas para o sistema modular Loop: (1) lingueta e ranhura, (2) T-slot, (3) meia-madeira e (4) espiga e furo. Elaboração própria (2025) .	64
Figura 34 - Tampa e cunhas de travamento para ligação entre módulos. Elaboração própria (2025).....	65
Figura 35 – Cunhas de travamento para ligação entre módulos. Elaboração própria (2025).	65
Figura 36 – Estrutura interna. Espaço técnico interno. Elaboração própria (2025).....	66
Figura 37 – Peças que constituem os módulos do sistema proposto. Elaboração própria (2025).	68
Figura 38 – Módulos montados para configurar um espaço habitável de 4,8 x 6,4 m. Elaboração própria (2025).....	69
Figura 39 – Módulos montados para configurar um espaço habitável de 4,8 x 6,4 m. Elaboração própria (2025).....	69
Figura 40 – Módulo A (opaco) – Vista explodida, módulo montado e nesting. Elaboração própria (2025).....	71
Figura 41 – Módulo D (vão de 1200 mm) – Vista explodida, módulo montado e nesting. Elaboração própria (2025).....	72
Figura 42 – Desenho DXF de módulo D separado por layers de trabalho. Elaboração própria (2025).....	74
Figura 43 – Simulação das operações de maquinação no software V-Carve. Elaboração própria (2025).....	75
Figura 44– Software de controlo da máquina CNC. Elaboração própria (2025).....	75
Figura 45 – Primeiro ensaio seccional. DXF com layers para fabrico Elaboração própria (2025).	76
Figura 46 – Primeiro ensaio seccional. Software de controlo da CNC. Elaboração própria (2025).	76
Figura 47 – Primeiro ensaio seccional. Peças produzidas. Elaboração própria (2025). .	77
Figura 48– Primeiro ensaio seccional. Secção montada. Elaboração própria (2025).....	77

Figura 49 – Segundo ensaio seccional. Modelo 3D e 2D. Elaboração própria (2025).	77
Figura 50 – Segundo ensaio seccional. Fresagem do encaixe T-slot. Elaboração própria (2025).	77
Figura 51 – Segundo ensaio seccional. Peças produzidas. Elaboração própria (2025)...	77
Figura 52 – Segundo ensaio seccional. Secção montada. Elaboração própria (2025). ...	77
Figura 53 – Terceiro ensaio seccional. DXF com layers para fabrico Elaboração própria (2025). Elaboração própria (2025).	78
Figura 54 – Terceiro ensaio seccional. Troca da fresa. Elaboração própria (2025).....	78
Figura 55 – Terceiro ensaio seccional. Peças produzidas. Elaboração própria (2025)...	78
Figura 56 – Terceiro ensaio seccional. Secção montada. Elaboração própria (2025).....	78
Figura 57 – Módulo prototipado. Dimensões gerais. Elaboração própria (2025).....	79
Figura 64 – Módulo de Teste. Peças produzidas. Elaboração própria (2025).....	81
Figura 65 – Módulo de Teste. Estrutura interna montada. Elaboração própria (2025)...	81
Figura 66 – Módulo de Teste. Montagem das últimas peças. Elaboração própria (2025).	81
Figura 67 – Módulo de Teste montado. Elaboração própria (2025).	81
Figura 68 – Módulo de Teste montado. Elaboração própria (2025).....	82
Figura 69 – Fluxograma do algoritmo paramétrico. Elaboração própria (2025)	84
Figura 70 – Algoritmo paramétrico desenvolvido em Rhino. Elaboração própria (2025)	85
Figura 71– Interface do configurador do sistema construtivo. Elaboração própria (2025)	86

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre Construção Tradicional e Construção Modular	28
Tabela 2 - Comparação de Materiais Sustentáveis para Construção Modular.....	40

Glossário

AUAR (Automated Architecture) – projeto que explora a aplicação da automação e da fabricação digital em arquitetura modular e habitação acessível.

BIM (Building Information Modeling) – metodologia de modelação digital que integra dados geométricos e de informação ao longo do ciclo de vida da construção.

CAD (Computer-Aided Design) – desenho assistido por computador, utilizado para criar, modificar e analisar modelos digitais bidimensionais ou tridimensionais.

CAM (Computer-Aided Manufacturing) – tecnologia assistida por computador aplicada ao controlo de processos de fabrico, como fresagem CNC.

CLT (Cross Laminated Timber / Madeira Laminada Cruzada) – painel de madeira maciça formado por lâminas cruzadas em camadas alternadas, utilizado em construção pela sua resistência estrutural e estabilidade dimensional.

CNC (Controlo Numérico Computadorizado) – tecnologia de fabrico digital que utiliza código numérico para controlar máquinas.

DDC (Danish Design Centre) – centro dinamarquês dedicado à promoção do design e da inovação.

DfMAD (Design for Manufacturing, Assembly and Disassembly) – metodologia de projeto que considera desde o início o fabrico, a montagem e a desmontagem dos componentes, com o objetivo de facilitar a reutilização e aumentar o ciclo de vida útil dos materiais.

Digital Twin – Representação virtual dinâmica de um objeto físico, sistema ou processo, construída a partir de dados em tempo real. Permite monitorizar, simular e prever comportamentos do correspondente físico, apoiando decisões de projeto, fabrico e manutenção.

Dog bone – técnica de compensação aplicada nos cantos internos de peças fresadas em CNC. Consiste na criação de um recorte circular que se prolonga para fora do vértice, formando uma geometria semelhante a um “osso de cão”. Este alívio assegura que peças com cantos retos encaixam corretamente, sem bloqueios causados pelo raio da fresa.

DXF (Drawing Exchange Format) – formato de ficheiro CAD criado para facilitar a troca de desenhos entre diferentes softwares de modelação e fabrico.

EDFAB (Eco-digital Fabrication Research Project) – projeto de investigação que explora a produção distribuída de módulos em madeira através de processos paramétricos e fabricação digital.

Encaixe reversível – uniões mecânicas concebidas para permitir montagem e desmontagem repetidas sem perda de desempenho estrutural. Dispensam colas ou fixações permanentes, garantindo a reutilização integral dos componentes.

Encaixe T-slot – tipologia de união em madeira realizada por fresagem utilizando uma fresa em forma de “T”.

ESMAD (Escola Superior de Media Artes e Design) – escola do Instituto Politécnico do Porto, especializada em artes digitais, design e tecnologias de comunicação.

File-to-factory – o conceito que descreve a ligação direta entre o modelo digital e a produção física através de fluxos automatizados, reduzindo etapas intermédias.

FSC (Forest Stewardship Council) – organização internacional que certifica práticas responsáveis de gestão florestal.

G-code – linguagem de programação que define percursos, profundidades e velocidades de corte em máquinas CNC.

Grasshopper – plugin de programação visual paramétrica para Rhinoceros 3D, utilizado para desenvolver algoritmos de configuração e personalização do sistema construtivo.

GXN (GXN Innovation) – departamento de investigação e inovação do atelier dinamarquês 3XN, focado em sustentabilidade, materiais e processos digitais.

Kit-of-Parts – abordagem construtiva baseada na utilização de componentes padronizados e intercambiáveis que, quando combinados, permitem a montagem de estruturas completas.

Loop – designação atribuída ao sistema construtivo modular desenvolvido neste projeto de mestrado. O termo combina “Sistema Construtivo” e “Sustentabilidade”, refletindo a modularidade, desmontabilidade e circularidade.

LVL (Laminated Veneer Lumber) – material estrutural derivado de madeira, composto por lâminas finas coladas paralelamente. Combina elevada resistência mecânica com estabilidade dimensional.

MMC (Modern Methods of Construction) – Estratégias e tecnologias que procuram modernizar o setor da construção através da industrialização e do fabrico digital. Incluem práticas como a pré-fabricação e a construção modular, promovendo maior eficiência, qualidade e sustentabilidade.

MCC (Mass Customization Construction) – estratégia de produção que combina a eficiência da produção em série e a flexibilidade da personalização individualizada.

MDF (Medium Density Fibreboard) – painel de fibras de madeira de densidade média. Caracterizado pela superfície lisa e homogénea.

Nesting – processo de organização das peças em placas de material, para otimizar o aproveitamento e reduzir o desperdício.

OSB (Oriented Strand Board) – painel derivado de madeira constituído por tiras orientadas em camadas sucessivas.

PDF (Portable Document Format) – formato de ficheiro digital desenvolvido pela Adobe para visualização e partilha de documentos de forma independente do software ou sistema operativo.

PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification) – sistema internacional de certificação que promove a gestão sustentável das florestas.

Research through Design (RtD) – paradigma metodológico em que o design e o projeto funcionam como processo de investigação e produção de conhecimento.

Rhinoceros 3D (Rhino) – software de modelação tridimensional.

SDU (University of Southern Denmark/ Syddansk Universitet) – universidade dinamarquesa.

Sniglet – técnica de compensação mais discreta utilizada em cantos internos de peças fresadas em CNC. O recorte semicircular é aplicado próximo ao vértice, procurando manter a funcionalidade do encaixe e, ao mesmo tempo, reduzir o impacto visual.

ShapeDiver – plataforma online que permite disponibilizar configuradores de produto.

T-bone – técnica de compensação aplicada nos cantos internos de peças fresadas em CNC. Como as fresas circulares não permitem cortes a 90°, cria-se uma

extensão semicircular em forma de “T” nos vértices, assegurando que as peças se encaixam corretamente sem interferência geométrica.

TED / TEDx – conferências internacionais de divulgação de ideias em várias áreas do conhecimento.

Toolpath – Trajetória gerada digitalmente que define o percurso da ferramenta de corte (fresa, broca, laser, etc.) durante o processo de fabrico assistido por computador. O toolpath traduz a geometria do modelo digital em instruções de maquinação (G-code), determinando a sequência, profundidade, velocidade e direção dos cortes.

Travamento (cunhas/travões) – elementos auxiliares utilizados para reforçar a estabilidade em sistemas modulares desmontáveis. Funcionam por pressão ou encaixe, bloqueando movimentos indesejados entre peças principais.

User Provided Housing (UPH) – conceito em que o utilizador é coautor do projeto e da construção, recorrendo a sistemas abertos e de fácil montagem.

Vão – Espaço vazio ou abertura numa parede, utilizado para portas, janelas ou passagens. Em termos estruturais, corresponde também à distância livre entre dois apoios de uma viga ou laje, simples ou armada.

VCarve – software de Computer-Aided Manufacturing (CAM) usado para preparar ficheiros de corte CNC e gerar G-code.

WikiHouse – plataforma open source de construção modular.

1 INTRODUÇÃO

Este projeto de mestrado movimenta-se no cruzamento entre design, construção e fabricação digital, explorando soluções para sistemas construtivos modulares capazes de responder às exigências atuais de sustentabilidade, acessibilidade e reversibilidade. Assume-se como base conceptual o Design for Manufacturing, Assembly and Disassembly (DfMAD), aplicado na criação de uma proposta que conjuga racionalidade construtiva, fabrico digital e montagem reversível.

O design é entendido, neste contexto, como prática estratégica e crítica, capaz de estabelecer relações entre variáveis técnicas, materiais, ambientais e sociais, assumindo o papel de mediador entre o conhecimento especializado e as realidades concretas. Esta compreensão aproxima-se da perspetiva descrita por Koskinen et al. (2011), ao conceptualizar o design como uma prática situada, que opera no espaço relacional entre pessoas, objetos e contextos de uso. Do ponto de vista epistemológico, Frayling (1993) contribui para este enquadramento ao reconhecer o design enquanto forma de produção de conhecimento através da prática. Esta perspetiva orientou o desenvolvimento de um sistema modular em contraplacado, produzido por fresagem CNC e unido por encaixes de madeira reversíveis, dispensando fixações permanentes e permitindo a desmontagem integral.

O design paramétrico e a produção distribuída foram integrados na solução, possibilitando a adaptação a diferentes programas e contextos. O protótipo de módulo de parede desenvolvido foi submetido a ensaios práticos, que permitiram validar aspetos como a precisão de fabrico, a eficiência de montagem e a capacidade de reutilização dos componentes.

O trabalho, de natureza iterativa e experimental, procura expandir o leque de soluções construtivas disponíveis, propondo um modelo aberto e evolutivo que possa ser apropriado por utilizadores, designers e fabricantes. Ao longo do documento, a Revisão do Estado da Arte (Capítulo 2), a análise de Casos de Estudo (Capítulo 3), o processo de Desenvolvimento e Prototipagem (Capítulo 4), o desenvolvimento do Algoritmo Paramétrico (Capítulo 5), a Discussão e Avaliação Crítica (Capítulo 6) e a Conclusão (Capítulo 7) estruturam a apresentação e reflexão sobre o percurso seguido. O projeto desenvolvido e aqui apresentado não constituiu um fim em si mesmo, mas antes um

processo de concetualização, projeção e experimentação, que permitiu aquisição de competências específicas em fabricação digital e aplicação prática das mesmas.

1.1 Enquadramento

Os atuais desafios ambientais e sociais colocam pressão sobre o setor da construção, exigindo soluções que aliem eficiência no uso de recursos, redução de desperdício e capacidade de adaptação. Entre as abordagens que respondem a estas necessidades, a construção modular, quando associada ao DfMAD, destaca-se pela possibilidade de montagem e desmontagem integrais, recuperação de componentes e prolongamento do ciclo de vida dos materiais (McDonough & Braungart, 2002, pp. 103–111).

A lógica modular e desmontável enquadra-se nos princípios da economia circular, que procura manter o valor dos materiais pelo maior tempo possível. Paralelamente, os avanços da fabricação digital, nomeadamente a fresagem CNC e a modelação paramétrica, transformaram a forma de conceber e fabricar sistemas modulares. Softwares como o Grasshopper aliados a fluxos de trabalho digitais, permitem automatizar tarefas de projeto e facilitar a personalização sem comprometer a eficiência produtiva (Dunn, 2012, pp. 6–8).

Esta evolução tecnológica abre espaço para modelos de produção distribuída, nos quais a conceção, a prototipagem e a montagem podem ser realizadas localmente, reduzindo impactos logísticos e ambientais, e reforçando a autonomia do utilizador (Parvin, 2011). Projetos como a WikiHouse e EDFAB comprovam o potencial de sistemas modulares parametrizáveis, fabricados com maquinaria CNC de pequena ou média dimensão (McCulloch, Patel & Potauaine, 2021, pp. 182–189).

É neste enquadramento que surge o presente projeto, dedicado ao desenvolvimento de um sistema modular em contraplacado, produzido por fresagem CNC e conectado por encaixes reversíveis. A proposta combina a eficiência dos processos digitais com a flexibilidade do design paramétrico, resultando numa solução de montagem intuitiva, sustentável e adaptável a diversos programas.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste projeto é conceber, testar e validar um sistema construtivo modular, desmontável e sustentável, fabricado em painéis de contraplacado através de tecnologias de fabricação digital. A investigação aplica os princípios do DfMAD, procurando conjugar eficiência estrutural e ligações reversíveis com a otimização dos processos de fabrico, montagem e desmontagem.

Pretende-se explorar o design paramétrico como ferramenta para criar um modelo configurável, capaz de adaptar as dimensões e tipologias dos módulos a diferentes contextos e exigências funcionais, garantindo simultaneamente o aproveitamento eficiente do material e o cumprimento de critérios ambientais. O sistema proposto integra uma lógica de produção distribuída, permitindo que os componentes sejam fabricados localmente a partir de ficheiros digitais, o que favorece a reprodução, a autonomia construtiva e a democratização do acesso ao design. Os objetivos operacionais incluem:

- Desenvolver um sistema construtivo modular com tipologias distintas de módulo de parede (fechado, com vão, com porta), adaptando dimensões e encaixes às necessidades de cada aplicação;
- Testar e validar o sistema através da construção de protótipos seccionais à escala 1:1 e de um módulo à escala 1:2 (com encaixes e espessura em escala real);
- Propor diretrizes de disseminação, incluindo um configurador paramétrico desenvolvido no ambiente Grasshopper, com opções de personalização e exportação automática de ficheiros de fabrico. Perspetiva-se, em fases futuras, a sua disponibilização online através de plataformas como o ShapeDiver, ampliando o acesso e a replicabilidade do sistema.

Esta proposta articula-se com os desafios da construção sustentável e circular, assumindo-se como um contributo alternativo e evolutivo, orientado para soluções acessíveis, adaptáveis e suscetíveis de serem apropriadas por comunidades, FabLabs e ateliers de design ou arquitetura.

1.3 Justificação

O presente trabalho surge num contexto de profundas transformações sociais, ambientais e tecnológicas, que desafiam os modelos tradicionais de construção. A crise habitacional, a necessidade de reduzir o impacto ambiental e de otimizar recursos, impõe a procura de soluções que sejam mais flexíveis, eficientes e acessíveis.

Neste cenário, o design assume um papel estratégico, funcionando como ponte entre tecnologia, sustentabilidade e contexto social. Ao explorar sistemas modulares em madeira fabricados por CNC, este projeto procura aliar a otimização do uso de materiais à facilidade de montagem e desmontagem, fomentando práticas abertas e replicáveis.

A proposta inscreve-se nas tendências que valorizam a produção distribuída e a lógica open source, permitindo que o conhecimento e os ficheiros digitais sejam partilhados e adaptados a diferentes realidades. Não pretende apenas responder a uma necessidade imediata, mas criar uma plataforma de experimentação e evolução contínua.

A construção tradicional caracteriza-se pelo recurso a materiais compósitos e a sistemas de ligação permanentes que tornam a separação e reciclagem dos componentes extremamente difícil. Estruturas em betão armado, colagens entre camadas ou o uso de painéis multicamada limitam a reutilização e conduzem a uma lógica de ciclo linear (construir, usar e demolir), resultando na deposição em aterro e numa perda significativa de valor material (Eberhardt, Birkved & Birgisdottir, 2019, pp. 2-8). Estes constrangimentos representam um dos maiores obstáculos à implementação de práticas circulares na indústria da construção, agravando a sua pegada ecológica.

Em contraste, o projeto desenvolvido parte do requisito de desenvolver um sistema baseado num painel estrutural e autoportante em monomaterial, garantindo maior simplicidade de fabrico, montagem e desmontagem. A opção pelo contraplacado certificado FSC/PEFC responde a este princípio, ao proporcionar resistência estrutural e estabilidade dimensional compatíveis com encaixes reversíveis e desmontabilidade integral. Ao eliminar a necessidade de fixadores permanentes ou materiais compósitos, reforça-se a circularidade e assegura-se que os componentes mantêm valor ao longo de vários ciclos de utilização (Brandão, 2022, pp. 166–185).

1.4 Ensaio prévio: Curso de Robótica e Projeto Corkuka

Durante o desenvolvimento deste projeto, o autor deste projeto frequentou paralelamente o Curso de Fabricação Robótica em Design, Arquitetura e Construção (EAAD – Universidade do Minho). Esta experiência aprofundou conhecimentos em fabricação digital, DfMAD e processos CNC. Competências técnicas relevantes para a proposta aqui apresentada.



Figura 1 – Projeto Corkuka: cadeira em fase de produção por CNC montada em braço robótico. Elaboração própria (2025).

Como exercício experimental, foi desenvolvido o projeto Corkuka – uma cadeira modular infantil em aglomerado de cortiça. Este ensaio prévio contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento da investigação principal, permitindo experimentar a lógica de encaixes reversíveis, testar estratégias de nesting e programação CNC e aplicar princípios do DfMAD. Os resultados e o processo completo estão documentados no Anexo C

1.5 Metodologia

A investigação desenvolvida enquadra-se no paradigma Research through Design (RtD), no qual o projeto funciona simultaneamente como meio e resultado da produção de conhecimento. Este enquadramento, inicialmente formulado por Frayling (1993), é operacionalizado no âmbito da investigação projetual através de ciclos iterativos de conceção, prototipagem e avaliação, tal como descrito por Koskinen et al. (2011), permitindo que as soluções sejam progressivamente ajustadas às condições reais de fabrico e utilização.

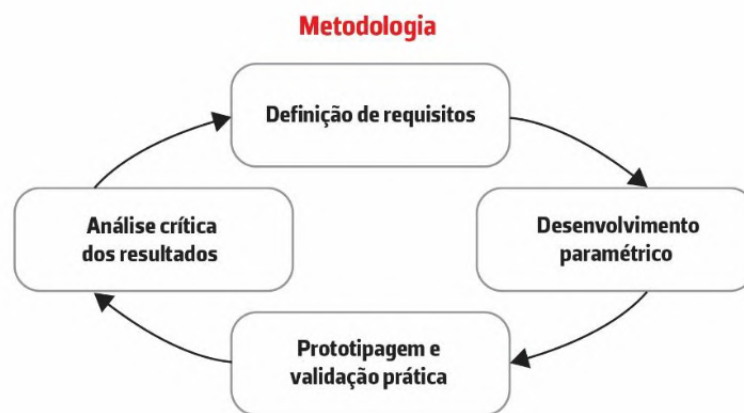


Figura 2 –Metodologia adotada no projeto, estruturada em quatro fases principais. O processo segue a lógica iterativa de Research through Design, em que conceção, experimentação e avaliação interligam-se continuamente. Elaboração própria (2025).

O percurso metodológico adotado foi estruturado em quatro fases principais:

- **Definição de requisitos** – Identificação dos critérios funcionais, técnicos e ambientais que orientaram o desenvolvimento do sistema modular, integrando os princípios de modularidade, desmontabilidade e sustentabilidade.
- **Desenvolvimento paramétrico** – Criação de um modelo tridimensional em Rhino 3D e de um algoritmo no Grasshopper capaz de configurar tipologias de módulo, organizar a sua distribuição espacial e automatizar a exportação de ficheiros de fabrico CNC.
- **Prototipagem e validação prática** – Produção de protótipos em escala real para testar a precisão dos encaixes, a facilidade de montagem e

desmontagem, e a estabilidade estrutural, com ajustes às geometrias e tolerâncias sempre que necessário.

- **Análise crítica dos resultados** – Avaliação do sistema em função dos objetivos definidos, identificando limitações, potencial de escalabilidade e oportunidades de aplicação em contextos de produção distribuída.

Esta metodologia permitiu que o processo de design fosse simultaneamente exploratório e operacional, garantindo que as decisões de projeto fossem sustentadas pela fundamentação teórica e pela experimentação prática.

1.6 Estrutura do documento

Esta dissertação de mestrado organiza-se em sete capítulos, que organizam a progressão lógica e experimental do trabalho:

- **Capítulo 1 – Introdução:** apresenta o enquadramento, os objetivos, a justificação, o ensaio prévio, a metodologia e a estrutura do documento, estabelecendo as bases conceptuais e operacionais do projeto.
- **Capítulo 2 – Enquadramento teórico e estado da arte:** aborda os conceitos fundamentais relacionados com construção modular, sustentabilidade e economia circular, fabrico digital e produção distribuída, DfMAD, sistemas abertos e design generativo. Inclui também uma análise comparativa de materiais adequados ao projeto.
- **Capítulo 3 – Estudos de caso:** analisa projetos históricos e contemporâneos pertinentes, explorando soluções construtivas, metodologias e estratégias de montagem e de desmontagem que influenciaram o desenvolvimento da proposta.
- **Capítulo 4 – Desenvolvimento, prototipagem e implementação digital:** descreve as etapas de desenvolvimento do sistema construtivo, incluindo a definição de critérios de projeto, a escolha de materiais, a estrutura e tipologias de módulo, o desenho dos encaixes reversíveis, a criação de ficheiros CNC e a prototipagem com ensaios seccionais à escala 1:1 e de um módulo à escala 1:2.

- **Capítulo 5 – Algoritmo paramétrico:** é dedicado ao algoritmo desenvolvido e ao configurador paramétrico, detalhando a sua lógica, interface e outputs.
- **Capítulo 6 – Discussão e avaliação crítica:** apresenta a apreciação crítica do sistema desenvolvido, identificando limitações, potencial de escalabilidade e contributos para a sustentabilidade e inovação em construção modular, finalizando com perspectivas de continuidade.
- **Capítulo 7 – Conclusão:** sintetiza os resultados obtidos, salientando as contribuições do projeto, e apontando direções futuras de investigação.

Estrutura do documento

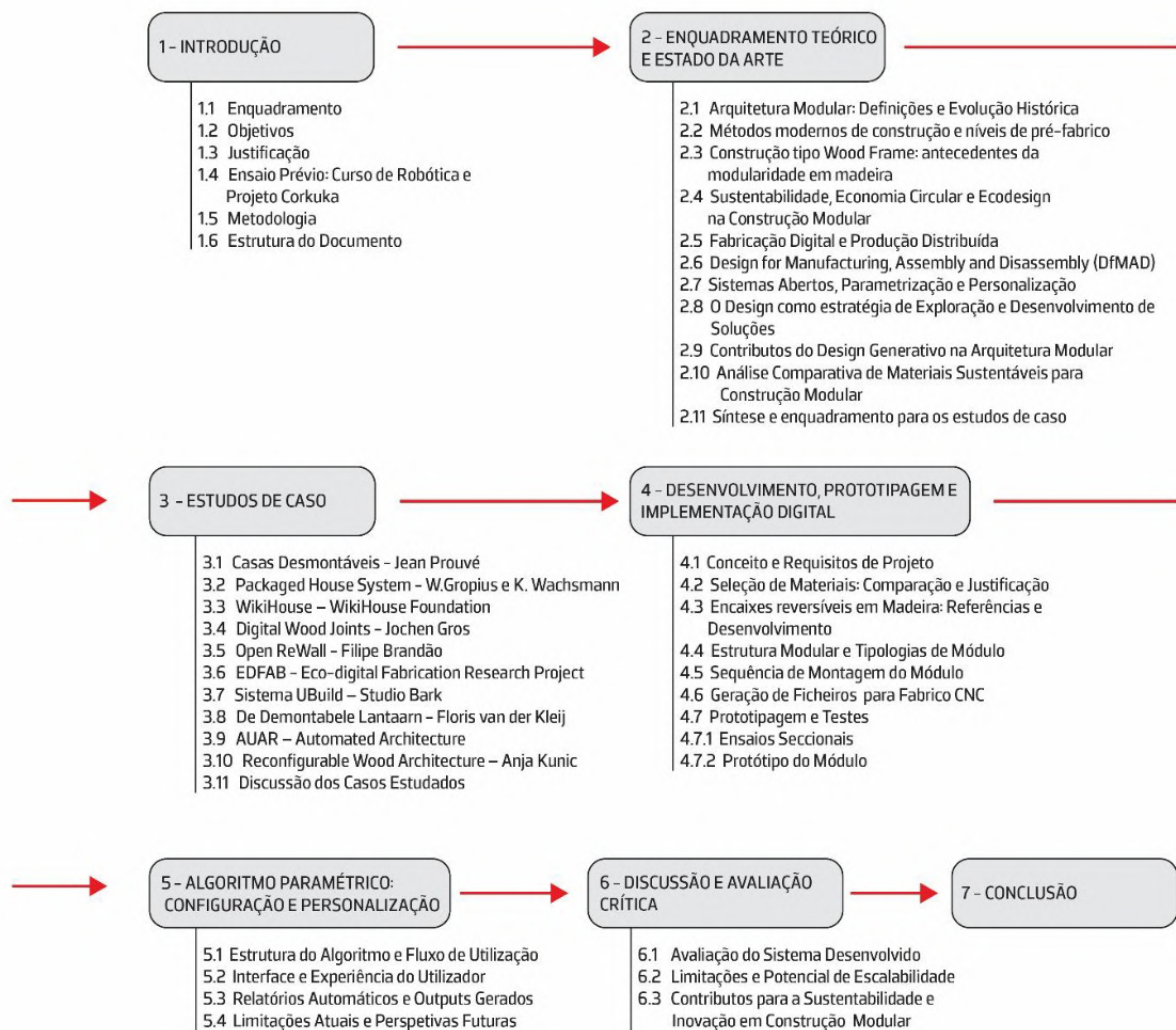


Figura 3 – Esquema gráfico da estrutura da tese. Elaboração própria (2025).

2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO E ESTADO DA ARTE

O objetivo deste capítulo é construir o enquadramento teórico e crítico necessário para a definição do sistema modular desenvolvido. A revisão de literatura abrange a evolução histórica da arquitetura modular, a integração da sustentabilidade e da economia circular, e os antecedentes da construção em madeira, conceitos essenciais para o projeto. São igualmente abordadas as transformações decorrentes da fabricação digital e da produção distribuída, bem como os princípios do DfMAD e a relevância dos sistemas abertos e da parametrização.

A análise integra ainda contributos do design generativo aplicados à arquitetura modular e uma comparação entre materiais sustentáveis passíveis de utilização em sistemas desmontáveis. Este enquadramento consolida a base conceptual do projeto e fornece os critérios para a seleção das referências analisadas nos estudos de caso (Capítulo 3), permitindo estabelecer paralelos críticos entre teoria, prática e a proposta construtiva desenvolvida.

2.1 Arquitetura modular: Definições e evolução histórica

A arquitetura modular pode ser definida como uma forma de construir, baseada na repetição e combinação de unidades pré-fabricadas, concebidas para serem facilmente produzidas, transportadas e montadas. As peças partilham dimensões e encaixes normalizados, facilitando tanto a montagem como a substituição de elementos danificados ou obsoletos (Smith, 2010, pp. 18–21).

Embora seja muitas vezes associada ao século XX e à industrialização, a lógica modular é mais antiga. Encontra-se por exemplo, nos sistemas construtivos em madeira japoneses ou nas casas pré-fabricadas que eram transportadas e montadas nas colónias americanas. A diferença é que, a partir do início do século passado, a engenharia e a produção em série permitiram levar este conceito a uma escala e precisão inéditas, apoiadas pelo espírito funcionalista da arquitetura moderna.

Depois da Segunda Guerra Mundial, a modularidade passou a ser vista como resposta à urgência de reconstruir rapidamente e com poucos recursos. Projetos como as Casas Desmontáveis de Jean Prouvé (1944–1950) provaram que era possível criar

estruturas transportáveis e montáveis localmente a partir de um conjunto reduzido de peças (Berthier, 2015, pp. 87–90). O projeto Packaged House System, de Walter Gropius e Konrad Wachsmann, foi pioneiro na utilização de conectores universais para painéis de madeira, antecipando ideias de montagem rápida que continuam atuais (Imperiale, 2012, pp. 42–44).

Mais recentemente, este tipo de construção incorporou preocupações ambientais e novas ferramentas digitais. É o caso da WikiHouse, que recorre à fresagem CNC e a ficheiros de código aberto para permitir que qualquer utilizador possa fabricar e montar a sua própria habitação, adaptando-a às necessidades e ao contexto (WikiHouse Foundation, 2023, s.p.). Atualmente, falar de modularidade não é apenas falar de uma técnica construtiva, mas também de uma filosofia que valoriza a adaptabilidade e a possibilidade de reconfiguração ao longo do tempo (Chiesse, 2024, pp. 56–59).

Tendo clarificado a modularidade como lógica de sistema (peças normalizadas, encaixes, reconfiguração), importa agora enquadrar como é que essas soluções chegam à obra. É esse o papel do pré-fabrico e dos chamados métodos modernos de construção (MMC), que distinguem o que é preparado em fábrica e o que é executado em obra.

2.2 Métodos modernos de construção e níveis de pré-fabrico

Partindo da lógica modular apresentada no ponto 2.1, esta secção trata do onde e quando se produz: o pré-fabrico organiza as abordagens segundo a quantidade de trabalho realizado em fábrica e em obra. Distingue-se, habitualmente, entre construção convencional (maioritariamente em obra), construção por painéis (2D) (painéis/peças preparados em fábrica e montados no local), soluções híbridas (combinação de painéis com alguns volumes pré-fabricados) e construção volumétrica (3D) (módulos tridimensionais quase concluídos que chegam ao estaleiro para ligação final). A Figura 4 sintetiza esta repartição ao longo do processo, da conceção e preparação em fábrica até à montagem em obra, evidenciando que, ao aumentar o pré-fabrico, deslocam-se operações para a fábrica e reduzindo a duração e a variabilidade em estaleiro. O sistema desenvolvido neste projeto, posiciona-se na construção por painéis (2D): as peças são preparadas em carpintaria com CNC a partir de placas inteiras e a montagem final realiza-se em obra com ligações reversíveis.

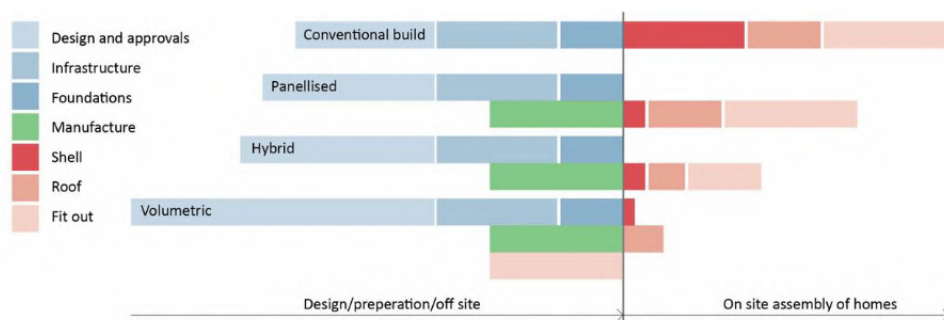


Figura 4 – Distribuição das fases da construção em quatro abordagens: convencional, por painéis (2D), híbrida e volumétrica (3D). Reproduzido de Oliveira et al., 2017, Fig. 2.

Neste enquadramento, importa comparar a construção modular com os sistemas tradicionais. A Tabela seguinte sintetiza essas distinções, sublinhando o impacto que cada uma assume em termos de eficiência, sustentabilidade e circularidade.

Tabela 1 - Comparação entre Construção Tradicional e Construção Modular

CRITÉRIO	CONSTRUÇÃO TRADICIONAL	CONSTRUÇÃO MODULAR
Tempo de execução	Elevado; processos sequenciais em obra, sujeitos a atrasos.	Reduzido; componentes fabricados em paralelo e montagem rápida em obra.
Eficiência de materiais	Desperdício significativo em obra; difícil controlo de cortes e sobras.	Produção controlada em fábrica/CNC, com otimização de cortes (nesting), reduzindo desperdício.
Flexibilidade e adaptabilidade	Alterações complexas e onerosas; edifícios pouco adaptáveis.	Estruturas reconfiguráveis, expansíveis e personalizáveis via parametrização digital.
Impacte ambiental	Elevada pegada ecológica: transporte de materiais dispersos, resíduos de construção e demolição.	Menor impacto: menor transporte, desmontagem e reutilização integral de componentes.
Circularidade	Ciclo linear: construir – usar – demolir.	Ciclo circular: fabricar – montar – desmontar – reutilizar.
Qualidade construtiva	Variável; dependente da execução manual e das condições de obra.	Elevada; peças fabricadas digitalmente com tolerâncias rigorosas (CNC, paramétrico).
Especialização da mão de obra	Necessita equipas especializadas para cada etapa (alvenaria, betão, etc.).	Montagem simplificada, possível com equipas reduzidas e sem especialização intensiva.
Custos	Podem aumentar devido a prazos longos, imprevistos e desperdício.	Potencial redução de custos pelo controlo de produção, montagem rápida e menos desperdício.
Desmontagem / Reutilização	Difícil ou inexistente; materiais frequentemente descartados.	Integralmente desmontável, reutilizável e escalável.

Nota: Comparação entre construção tradicional e modular, considerando critérios de tempo, eficiência, sustentabilidade e circularidade. Fonte: Elaboração própria a partir de Smith (2010), Ottenhaus et al. (2023), Eberhardt et al. (2019) e Mercader-Moyano & Porras-Pereira (2023).

2.3 Construção tipo wood frame: antecedentes da modularidade em madeira

O sistema wood frame, também conhecido como light frame construction, surgiu na América do Norte no século XIX como solução leve, modular e acessível. Baseia-se numa armação de montantes e travessas de pequena secção, dispostos regularmente para formar uma grelha estrutural, sobre a qual se aplicam painéis de revestimento e isolamento. A disponibilidade de madeira serrada normalizada e o uso de uniões mecânicas simples (pregos/parafusos) permitiram uma rápida expansão habitacional, com processos de produção parcial em carpintaria e montagem expedita em obra (AITC & Linville, 2012, pp. 15–17).



Figura 5 –Habitação de guerra, Erie, Pensilvânia, 1941. Fotografia de Al Palmer (via The Plan, 2021).

Com o avanço das ferramentas digitais, vários princípios desta técnica foram reinterpretados em sistemas contemporâneos de fabrico por CNC e montagem a seco. A investigação recente mostra a atualização de ligações madeira-madeira tradicionais (encaixes como caudas-de-andorinha, espigas) para contextos atuais, reduzindo ou

eliminando fixadores metálicos permanentes, aumentando o potencial de desmontagem e reutilização (Schutzer, Ordoñez, & Chedid, 2024, pp. 104–108).

O sistema desenvolvido nesta investigação distingue-se, em aspetos decisivos. Ao contrário do wood frame, cuja estabilidade global depende, em regra, da continuidade e do trabalho conjunto de várias paredes/painéis, os módulos do sistema são autoportantes, garantindo integridade estrutural à escala de cada unidade. Esta diferença reforça a adequação do modelo a produção distribuída e a montagem incremental, com maior independência entre elementos.

2.4 Sustentabilidade, economia circular e ecodesign na construção modular

A necessidade de reduzir o impacto ambiental do setor da construção tem vindo a transformar profundamente os processos de conceção e fabrico. Atualmente já não é suficiente reduzir o desperdício, é indispensável adotar estratégias que prolonguem a vida útil dos materiais e garantam a sua reutilização em diferentes ciclos construtivos (Eberhardt, Birkved, & Birgisdottir, 2019, p. 2-8). Neste enquadramento, a construção modular, quando associada a metodologias de desmontagem integral, revela-se particularmente adequada, pois permite a recuperação de componentes sem perda de valor.

O conceito de economia circular surgiu como resposta à lógica linear tradicional: Extrair, produzir, usar e descartar. McDonough e Braungart (2002, pp. 103–111), ao introduzirem o modelo Cradle to Cradle, distinguiram entre ciclos técnicos e biológicos, defendendo que os sistemas deveriam ser desenhados desde a origem para eliminar o conceito de desperdício. Esta visão foi consolidada posteriormente por instituições como a Ellen MacArthur Foundation (2019, p. 14), que estruturaram estratégias assentes na reutilização, reparação, remanufactura e reciclagem, representadas no diagrama dos ciclos biológicos e técnicos (Figura 4). Jensen e Sommer (2018, pp. 34–37) reforçam esta perspetiva no domínio da construção, defendendo que os edifícios devem ser concebidos para a desmontagem e reutilização integral dos seus componentes, transformando o edificado em verdadeiros bancos de materiais.

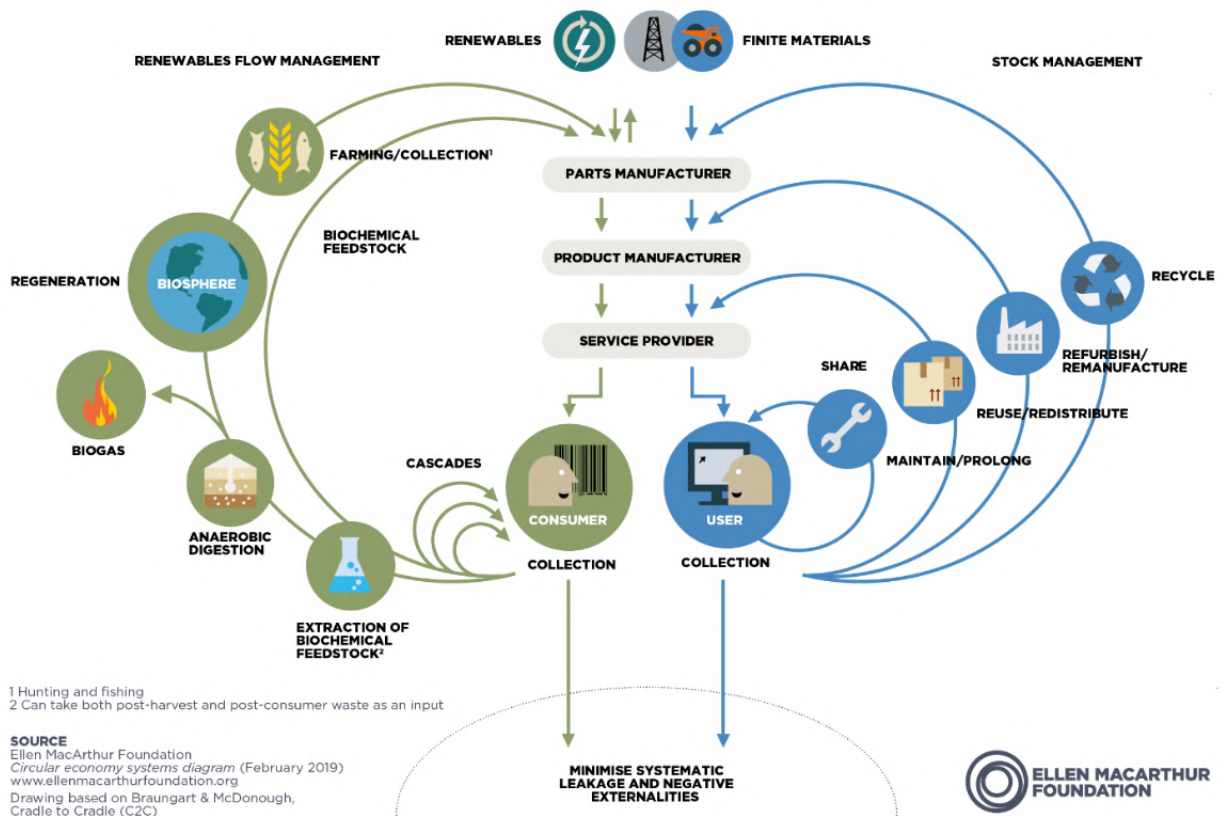


Figura 6 –Diagrama dos sistemas da economia circular: ciclos biológicos e técnicos. Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2019)

A oposição entre os dois paradigmas, linear e circular, destaca claramente a diferença entre uma lógica extrativa e descartável e outra em que os materiais mantêm valor através de fluxos circulares (Figura 5).



Figura 7 –Economia linear vs. circular. Fonte: World Economic Forum (2016)

No domínio da construção em madeira, Ottenhaus et al. (2023, pp. 2-3) referem que a reversibilidade é uma condição indispensável para viabilizar a circularidade. A desmontabilidade integral prolonga a vida útil dos componentes e assegura a sua reutilização em diferentes contextos sem perdas significativas de desempenho. Mercader-Moyano e Porras-Pereira (2023, pp. 7-8) reforçam esta perspetiva ao demonstrarem que, em habitação de emergência, a integração de materiais recicláveis, de processos de fabrico otimizados e de sistemas concebidos para desmontagem, resulta em habitações mais adaptáveis e mais eficientes ecologicamente.

É neste quadro que o ecodesign assume um papel fundamental. Mais do que procurar reduções pontuais de impacto, o ecodesign implica antecipar desde a fase de projeto a origem sustentável dos materiais, a eficiência produtiva, a facilidade de montagem e desmontagem e a possibilidade de reaproveitamento integral. No presente projeto, esta abordagem reflete-se na seleção de madeira certificada (FSC/PEFC), no desenho de encaixes reversíveis e na utilização de ferramentas digitais, para otimizar a produção, assegurando alinhamento entre sustentabilidade, eficiência e inovação.

2.5 Fabricação digital e produção distribuída

A fabricação digital alterou profundamente a relação entre conceção e produção. Tecnologias como a modelação paramétrica, a prototipagem rápida e a fresagem CNC aproximaram o ato de projetar da materialização física, permitindo que um mesmo modelo digital sirva de base para todas as etapas, do estudo preliminar à produção final. Esta integração reduz a distância entre a fase de projeto e o fabrico, encurta prazos e diminui erros de execução (Dunn, 2012, pp. 76–90).

No contexto da construção modular, estas ferramentas oferecem vantagens decisivas. A utilização de máquinas CNC, por exemplo, permite fabricar componentes com tolerâncias reduzidas, algo essencial para sistemas de encaixe desmontáveis. A modelação paramétrica, por sua vez, permite ajustar as dimensões, e geometrias de forma imediata, criando soluções personalizadas sem aumentar significativamente os custos de produção (Liu & Zhao, 2023, pp. 371–373).

Ao eliminar a necessidade de moldes e processos industriais de grande escala, a fabricação digital abre espaço para a produção em pequenas séries ou mesmo peças

únicas, mantendo a viabilidade económica. Isto é particularmente relevante quando se pretende responder a requisitos específicos de um utilizador, adaptar um projeto às condições locais ou incorporar variações de desenho sem interromper a produção (Tan, 2023, pp. 3–5).

A par destas transformações, a produção distribuída surge como estratégia complementar. Em vez de concentrar a fabricação num único ponto, distribui-se a produção por oficinas, FabLabs ou pequenas empresas, próximas do local de utilização final. Esta abordagem reduz custos e impactos ambientais associados ao transporte, aproveita melhor os recursos locais e diminui a dependência de cadeias logísticas complexas (Chiesse, 2024, pp. 76–79).

Modelos como o proposto pela WikiHouse Foundation demonstram o potencial desta estratégia: disponibilizando ficheiros digitais em código aberto, permitem que diferentes pessoas fabriquem e montem autonomamente os seus módulos, adaptando-os a contextos e necessidades próprias. Outros projetos como o EDFAB, o UBuild e a AUAR demonstram igualmente que é possível conjugar design paramétrico e fabrico local, obtendo sistemas construtivos replicáveis, sustentáveis e adaptáveis.

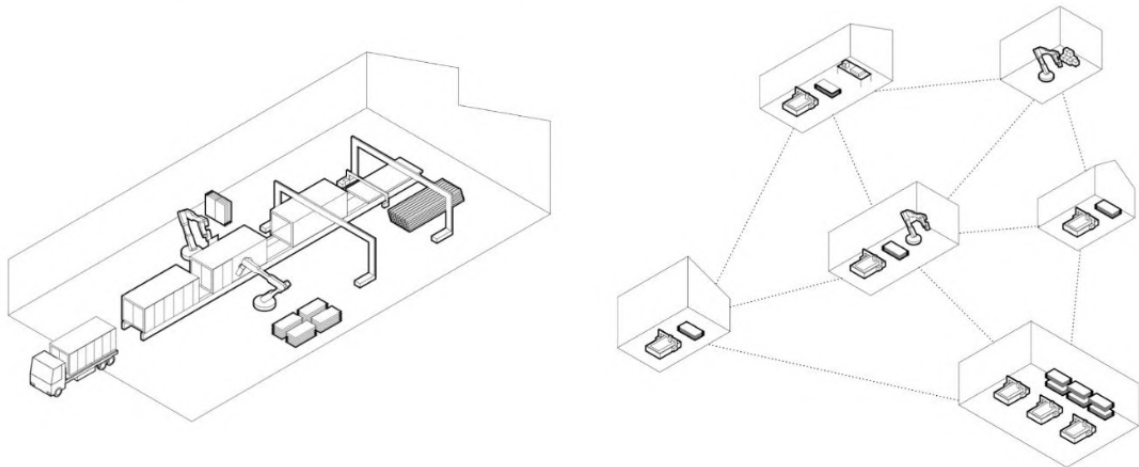


Figura 8 – Produção centralizada e produção distribuída. Fonte: Rodrigo Chiesse (2025, p.76)

A adoção de fluxos de trabalho digitais favorece um maior controlo de qualidade. No caso do EDFAB, por exemplo, a sequência file-to-factory garante que o desenho aprovado é exatamente o que será cortado, sem intermediários ou traduções de formato que possam introduzir erros (McCulloch et al. 2021, pp. 183–184). Este rigor, associado à possibilidade de simulação e otimização antes da produção, reduz desperdícios e aumenta a previsibilidade do desempenho final.

O sistema modular desenvolvido neste projeto baseia-se nesta mesma lógica: conceber e ajustar digitalmente, testar virtualmente e produzir localmente. O algoritmo paramétrico criado para o efeito disponibiliza ficheiros de corte otimizados, o que facilita a replicação por qualquer entidade com acesso a maquinaria CNC, seja em contexto académico, profissional ou comunitário.

2.6 Design for Manufacturing, Assembly and Disassembly (DfMAD)

O conceito de Design for Manufacturing, Assembly and Disassembly (DfMAD) propõe que as etapas de fabrico, montagem e desmontagem sejam consideradas desde o início do processo de projeto, e não como questões a resolver apenas na fase de execução. Originalmente aplicado no design industrial e na engenharia de produto, este método tem vindo a ganhar relevância na arquitetura e na construção modular, sobretudo pela sua capacidade de orientar decisões que favorecem a eficiência e a circularidade ao do ciclo de vida dos sistemas construtivos.

Segundo Battaia et al. (2018, pp. 7182-7183), um projeto desenvolvido com base no DfMAD deve procurar simplificar o fabrico, reduzir o número de componentes e padronizar ligações, sem descurar a desmontabilidade e a reutilização futura. Esta abordagem implica pensar na integridade física dos elementos após múltiplos ciclos de montagem e desmontagem, assegurando que os encaixes não se deformam nem se degradam prematuramente.

No contexto da construção modular, esta metodologia adquire um papel importante. A desmontagem integral das estruturas é essencial para possibilitar a sua reconfiguração ou reutilização noutros projetos. Projetar para desmontagem e não para demolição, alarga os cenários de fim de vida do construído, privilegiando a retenção de valor dos componentes. Conforme sintetizado por Brandão (2022, pp. 181–185; ver também Crowther, 2001, citado em Brandão, 2022, p. 182), quando a desmontagem substitui a demolição, tornam-se viáveis, por ordem de maior retenção de valor: (1) realocação do conjunto, (2) reutilização de componentes, (3) remanufatura em novos produtos e (4) reciclagem de materiais. Esta hierarquia operacionaliza a máxima “reutilizar antes de reciclar” e serve de referência direta para sistemas pensados com ligações reversíveis e produção digital.

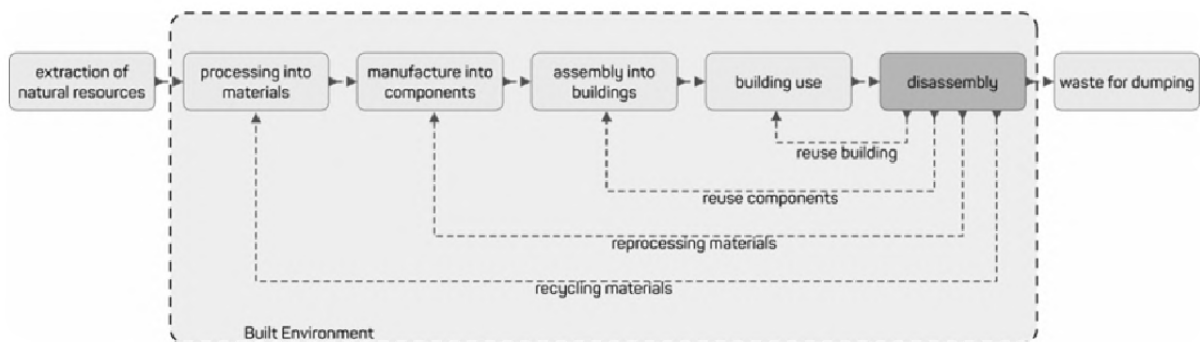


Figura 9 – Cenários de fim de vida quando a desmontagem substitui a demolição.

Nota: Reproduzido de “Open reWall: Survey-to-Production Workflow for Building Renovation”, por F. J. S. Brandão, 2022, Fig.1-5 (ISCTE). A figura apresentada por Brandão é baseada em Crowther (2001).

Autores como Ojeda Escoto e Zamarripa Muñoz (2020, pp. 446–448) reforçam esta ideia, referindo que, é fundamental privilegiar ligações mecânicas que evitem o uso de fixações permanentes e que permitam operações repetidas sem comprometer a performance estrutural. Esta visão é reforçada por Ottenhaus et al. (2023, pp. 2–3), que apontam a reversibilidade total das ligações como condição indispensável para uma verdadeira construção circular, onde a recuperação dos materiais ocorra com perdas mínimas.

Aplicado ao presente trabalho, o DfMAD não funcionou apenas como um conjunto de diretrizes, mas como a base estratégica para todo o desenvolvimento. A definição das folgas, a escolha das tipologias de encaixe e a otimização geométrica das peças foram guiadas pelo objetivo de facilitar a montagem e desmontagem, dispensando colas e fixações metálicas. A fresagem CNC, pela sua precisão, permitiu traduzir estas intenções em componentes fisicamente consistentes e intercambiáveis.

Ao adotar esta abordagem, foi possível criar um sistema modular que alia simplicidade construtiva, eficiência produtiva e adaptabilidade, respondendo não apenas a exigências funcionais imediatas, mas também à necessidade de prolongar a vida útil e o valor dos componentes ao longo do tempo, alinhando, assim, as metas de eficiência de fabrico e montagem e de retenção de valor do DfMAD.

2.7 Sistemas abertos, parametrização e personalização

Em design, um sistema aberto caracteriza-se pela flexibilidade e pela capacidade de adaptação ao longo do tempo, em contraste com modelos fechados e rígidos. Baseia-se na definição de regras, componentes e relações que permitam múltiplas combinações e variações, respondendo a diferentes contextos, funções e preferências.

A modelação paramétrica veio ampliar este conceito. Ao controlar variáveis geométricas e construtivas através de parâmetros, torna-se possível gerar soluções distintas a partir do mesmo modelo-base, assegurando coerência estrutural e formal. Esta abordagem, demonstrada no projeto EDFAB desenvolvido por McCulloch, Patel e Potauaine (2021, pp. 182–186), transforma o design num processo dinâmico, em que a adaptação se torna uma parte intrínseca da metodologia.

Este princípio relaciona-se diretamente com a lógica da mass customization referida por Brandão (2022, pp. 25–46), que procura conciliar a eficiência da produção em série com a personalização. Na arquitetura modular, traduz-se na possibilidade de ajustar dimensões, tipologias e características construtivas de forma rápida, sem necessidade de reiniciar o projeto nem comprometer a viabilidade económica.

Projetos como a WikiHouse e o EDFAB exemplificam esta lógica ao disponibilizarem modelos e componentes normalizados que podem ser configurados digitalmente por qualquer utilizador. Através de plataformas acessíveis, é possível modificar medidas, aberturas ou materiais e gerar automaticamente ficheiros de produção CNC, promovendo um modelo aberto e distribuído de conceção e fabrico.

No âmbito desta investigação, a parametrização assumiu papel central. O algoritmo desenvolvido em Grasshopper foi estruturado como um configurador sequencial: permite ao utilizador definir a área disponível, visualizar a distribuição tridimensional dos módulos, seleccionar tipologias módulo a módulo e, por fim, obter relatórios de quantidades e custos. Como outputs, o sistema exporta ainda os ficheiros DXF organizados por layers, uma tabela Excel com a informação compilada e uma imagem 3D representativa da configuração final.

Ao combinar a lógica de sistemas abertos com a capacidade de configuração digital, o projeto propõe uma alternativa às soluções modulares estáticas, apresentando

um modelo inclusivo e evolutivo, que pode ser produzido em oficinas com CNC de média dimensão, permanecendo acessível a utilizadores sem formação técnica avançada.

A descrição detalhada do configurador paramétrico e da sua interface encontra-se no Capítulo 5.

2.8 O Design como estratégia de exploração e desenvolvimento de soluções

O design, entendido como prática projetual, é hoje mais do que um exercício de forma ou função. Constitui uma abordagem estratégica capaz de articular dimensões técnicas, culturais e sociais na procura de soluções adaptadas a contextos específicos. No campo da construção modular e da fabricação digital, esta função adquire relevância acrescida uma vez que o design integra variáveis complexas, do comportamento estrutural ao impacte ambiental, num processo contínuo e orientado para resultados.

Don Norman defende que o design deve ser encarado como um processo iterativo, no qual a definição do problema e a geração da solução evoluem em paralelo, num ciclo contínuo de experimentação e refinamento (Norman, 2013). Nesta lógica inscreve-se também a perspetiva do Research through Design (Frayling, 1993), em que o projeto funciona simultaneamente como método de investigação e como resultado de produção de conhecimento.



Figura 10 – Imagem baseada na descrição de Frayling (1993) das três abordagens de Investigação em Design. Adaptado de ArchPsych.co.uk (2023).

Na presente investigação, o design foi elemento transversal a todas as etapas: orientou a seleção dos materiais, a definição dos encaixes, a estruturação do algoritmo

paramétrico e a prototipagem física. Cada iteração revelou limitações e abriu novas possibilidades, conduzindo a ajustes e melhorias. Este processo confirmou que o design não deve ser entendido apenas como fase de validação, mas como motor de inovação, estratégia de investigação e ferramenta de experimentação prática.

Projetos como o Open reWall (Brandão, 2022) ou o ReconWood de Kunic (2025) demonstram que a interação entre modelação paramétrica e prototipagem física, acelera o processo de concepção pois permite ajustes imediatos entre o modelo digital e a execução real, aproximando o design da produção e reduzindo o intervalo entre decisão e implementação.

No presente projeto, o design não permitiu apenas responder aos requisitos previamente definidos. Permitiu igualmente explorar caminhos alternativos, questionar as soluções estabelecidas e criar uma base modular aberta a evoluções futuras. Assim, mais do que um conjunto de peças, o sistema desenvolvido representa uma metodologia de concepção transferível para outros contextos e escalas.

2.9 Contributos do design generativo na arquitetura modular

O design generativo recorre a algoritmos para criar e explorar soluções de projeto de forma automatizada, a partir de regras e parâmetros definidos pelo designer. No contexto da arquitetura modular, esta abordagem possibilita o desenvolvimento de sistemas facilmente adaptáveis a diferentes situações, assegurando coerência estrutural e consistência formal (Liu & Zhao, 2023, pp. 371–373).

Complementarmente, o design exploratório valoriza a experimentação e a descoberta. Mais do que procurar uma solução final, privilegia a criação de múltiplas alternativas que podem ser testadas, avaliadas e reformuladas. Esta dimensão amplia o alcance do design generativo, transformando-o num processo de investigação contínua, em que a tecnologia é articulada com a interpretação crítica do designer (Zárate et al., 2024, pp. 229–300).

As metodologias paramétricas permitem estabelecer relações geométricas entre componentes e gerar variações de um mesmo módulo sem necessidade de redesenhar cada configuração. Este processo garante consistência formal e facilita a integração de

requisitos funcionais e estruturais desde as fases iniciais do projeto (Bachman, 2017, pp. 112–115; Zárate et al., 2024, pp. 299–300).

Projetos sobre modularidade adaptável, evidenciam que a integração de algoritmos paramétricos com processos de fabricação digital potencia novas formas de personalização em massa e promove práticas colaborativas em rede (Brandão, 2022). Neste sentido, o design generativo e o design exploratório funcionam de forma complementar como instrumentos conceptuais e operativos, permitindo a criação de soluções construtivas mais flexíveis, sustentáveis e adequadas a diferentes contextos.

2.10 Análise comparativa de materiais sustentáveis para construção modular

A escolha do material é decisiva para o desempenho estrutural, a viabilidade produtiva e a sustentabilidade de sistemas modulares. Nesta investigação, a análise concentrou-se em quatro derivados de madeira amplamente utilizados na construção: MDF (Medium Density Fibreboard), OSB (Oriented Strand Board), CLT (Cross-Laminated Timber) e contraplacado.

O MDF é valorizado pela textura homogênea e pela facilidade de maquinação, características que favorecem a execução de encaixes de precisão. Porém, a sua fraca capacidade estrutural e a baixa tolerância à humidade comprometem a durabilidade, sobretudo em contextos (Schutzer et al., 2024, pp. 104–108).

O OSB, produzido a partir de partículas de madeira orientadas em camadas, oferece resistência mecânica superior à do MDF e assegura um bom aproveitamento da matéria-prima. No entanto, a sua superfície irregular e a variabilidade dimensional dificultam a produção de encaixes com tolerâncias rigorosas, fator crítico em sistemas modulares desmontáveis (Ottenhaus et al., 2023, pp. 4–5).

O CLT distingue-se pela elevada robustez e estabilidade, permitindo a realização de grandes vãos e aplicações em edifícios de média e grande escala. Porém, o seu peso, o custo elevado e a dependência de processos industriais especializados limitam a aplicação em contextos de pequena escala ou em projetos de produção distribuída (Ottenhaus et al., 2023, pp. 6–7).

O contraplacado apresenta um equilíbrio entre resistência, estabilidade e compatibilidade com processos de fabricação digital. A sua composição em lâminas

cruzadas coladas garante durabilidade em ciclos repetidos de montagem e desmontagem, mantendo a precisão dimensional.

Com base nestes critérios, foi selecionado o contraplacado de 18 mm certificado FSC/PEFC para o sistema desenvolvido. A decisão assentou não apenas nas suas propriedades técnicas e na disponibilidade no mercado, mas também na coerência com as metas de sustentabilidade e circularidade definidas para o projeto.

Tabela 2 - Comparação de Materiais Sustentáveis para Construção Modular

MATERIAL	COMPOSIÇÃO / FABRICO	SUSTENTABILIDADE / IMPACTE AMBIENTAL	VANTAGENS / LIMITAÇÕES
MDF	Fibras de madeira+ resinas sintéticas, prensadas a quente por via seca.	Uso de resinas sintéticas → emissões; pouco sustentável face a outros derivados.	Acabamento homogéneo; baixo custo / Fraca resistência estrutural e à humidade.
OSB	Partículas grandes de madeira orientadas em camadas, coladas e prensadas sob alta pressão.	Produzido com madeira de pequena dimensão de florestas geridas de forma sustentável; reciclável.	Boa resistência; custo competitivo; reciclável / Sensível à humidade; estética limitada.
CLT	Camadas de madeira maciça coladas perpendicularmente.	Madeira certificada (FSC/PEFC); reduzida pegada de carbono; favorece circularidade.	Robustez; sustentabilidade; grandes vãos / Custo elevado; necessidade de maquinaria especializada.
Contraplacado	Folhas finas de madeira sobrepostas em camadas cruzadas e coladas.	Disponível com certificação FSC/PEFC; impacto ambiental moderado.	Equilíbrio resistência-leveza; versatilidade / Dependência da cola e tratamento; suscetível à humidade.

Nota: Fonte própria, adaptado da bibliografia da dissertação.

2.11 Síntese e enquadramento para os estudos de caso

A revisão de literatura apresentada neste capítulo permitiu identificar um conjunto de princípios e estratégias fundamentais para o desenvolvimento de sistemas construtivos modulares sustentáveis e desmontáveis. Entre os conceitos-chave destacam-se a aplicação de metodologias de DfMAD, a integração de tecnologias de fabrico digital e a utilização de sistemas de encaixe reversíveis que potenciam a circularidade e a adaptabilidade ao longo do ciclo de vida das construções (Battaia et al., 2018; Ottenhaus et al., 2023).

Foram também analisados antecedentes históricos, como a construção wood frame, cuja lógica estrutural influenciou abordagens contemporâneas como a WikiHouse e a EBFAB. Estes exemplos evidenciam a evolução das soluções modulares em madeira, passando de sistemas dependentes de fixações permanentes para modelos que recorrem a encaixes CNC de elevada precisão, compatíveis com produção descentralizada e de código aberto (Chiesse, 2024; McCulloch, et. al., 2021; WikiHouse Foundation, 2023).

Esta base teórica fornece o enquadramento necessário para a seleção e análise dos casos de estudo apresentados no capítulo seguinte, nos quais se exploram interpretações inovadoras destes princípios e a sua aplicação em contextos reais de projeto e construção.

3 ESTUDOS DE CASO

Após a análise do wood frame como antecedente histórico e tecnológico da modularidade em madeira (ver ponto 2.3), torna-se pertinente observar como esta lógica construtiva evoluiu.

Os projetos selecionados para este capítulo abrangem abordagens que, embora distintas na sua execução e no contexto em que foram desenvolvidas, partilham princípios estruturais e construtivos relevantes para esta investigação. Entre esses princípios destacam-se a racionalização de componentes, a otimização do fabrico, a desmontabilidade e a possibilidade de reconfiguração ao longo do ciclo de vida da construção.

A seleção equilibra igualmente referências históricas e exemplos contemporâneos, incluindo projetos desenvolvidos em contextos académicos e profissionais. Assim, são analisadas propostas como as Casas Desmontáveis de Jean Prouvé, o sistema Packaged House de Walter Gropius e Konrad Wachsmann, a WikiHouse, o Open reWall e outros sistemas modulares recentes que exploram as potencialidades do fabrico digital.

Cada caso é estudado segundo um conjunto de critérios comuns: enquadramento geral, descrição das soluções construtivas e metodologias adotadas, principais contributos e limitações, e ligação ao projeto desenvolvido nesta dissertação. Esta abordagem comparativa permite identificar estratégias passíveis de adaptação, bem como limitações a evitar, constituindo uma base sólida para o desenvolvimento do sistema modular proposto no Capítulo 4.

3.1 Casas Desmontáveis - Jean Prouvé

As Casas Desmontáveis, concebidas por Jean Prouvé, são um exemplo paradigmático de arquitetura modular concebida para responder a necessidades urgentes de habitação no pós-guerra. Desenvolvidas como solução temporária para alojar vítimas de conflito, baseiam-se na lógica do kit-of-parts, em que cada componente é fabricado previamente, transportado em separado e montado no local com rapidez e eficiência (Berthier, 2015, pp. 87–90).



Figura 11 - Casa desmontável 6x6, 1944. Montada na Camarga, 2014. Fotografia de Galerie Patrick Seguin.



Figura 12 - Casa desmontável 6x6, 1944. Em montagem na Camarga, 2014. Fotografia de Galerie Patrick Seguin.

Prouvé defendia uma abordagem fortemente influenciada pela engenharia, valorizando a simplicidade das soluções, a padronização de elementos e a otimização logística. Cada peça era desenhada com uma função clara, garantindo que todo o sistema funcionava como um conjunto integrado. Tal como sublinha Berthier (2015, pp. 93–95), a desmontabilidade era concebida por Prouvé como um princípio orientador desde a fase de conceção, e não como um atributo acrescentado no fim do processo.

O sistema estrutural das Casas Desmontáveis consistia numa moldura metálica leve, à qual se fixavam painéis pré-fabricados. Esta solução permitia que a casa fosse montada ou desmontada em poucas horas, utilizando mão-de-obra não especializada e ferramentas simples. A transportabilidade das peças reduzia custos logísticos e facilitava a sua implantação em locais de difícil acesso (Lobner, 2025, pp. 7–9).

Apesar do contexto histórico específico, a metodologia projetual de Prouvé mantém relevância atual. O foco na modularidade, na desmontabilidade e na eficiência construtiva encontra paralelo direto nas preocupações contemporâneas com a sustentabilidade e a circularidade. Como sublinha Barbieri (2015, pp. 62–64), a recuperação e reinterpretação contemporânea das casas desmontáveis de Prouvé confirma a atualidade da sua visão, em que estruturas concebidas como soluções temporárias revelam ainda hoje um forte potencial de adaptação e reutilização.

No âmbito desta investigação, a obra de Prouvé serviu como referência para a conceção de módulos que possam ser montados manualmente e desmontados sem perda de material. Elementos como a simplicidade construtiva, a lógica de encaixe

intuitivo e a estrutura periférica que garante a coesão do conjunto foram reinterpretados no desenvolvimento do sistema modular proposto.

3.2 Packaged House System - Walter Gropius e Konrad Wachsmann

O Packaged House System, desenvolvido por Walter Gropius e Konrad Wachsmann entre 1941 e 1947, constituiu uma resposta industrializada à escassez de habitação no período pós-guerra. O sistema baseava-se numa grelha tridimensional de madeira associada a um conector metálico universal, concebido para unir diferentes elementos estruturais com rapidez e precisão. Este conector foi descrito na patente Building Structure, registada pelos autores, e representou um marco na tentativa de criar encaixes desmontáveis e padronizados para estruturas em madeira (Gropius & Wachsmann, patente, 1942).

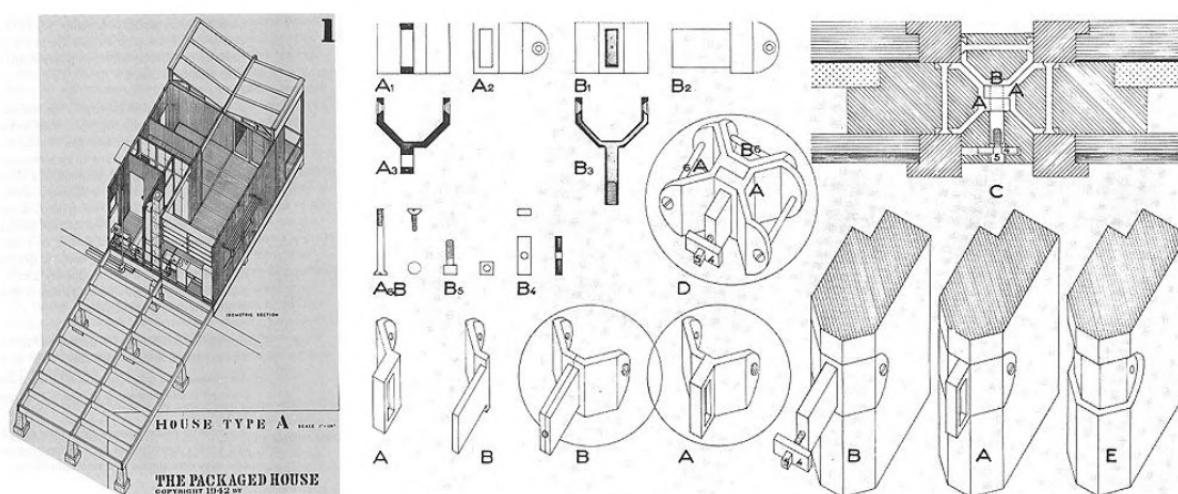


Figura 13 – Estrutura e encaixes do Packaged House System, de Walter Gropius e Konrad Wachsmann.

Fonte: ARCCA Digest, <https://arccadigest.org/walter-gropius-and-prefab/>

A proposta explorava a aplicação de princípios da produção em massa à construção, com o objetivo de reduzir o número de componentes e simplificar a logística. As peças eram fabricadas em ambiente industrial, transportadas em módulos compactos e montadas no local, dispensando processos complexos de obra. Esta racionalização procurava encurtar prazos, reduzir custos e garantir maior uniformidade na execução (Isbilen, 2022, pp. 67–72).

Apesar da inovação, o sistema exigia uma elevada precisão no fabrico e na montagem, o que, à época, implicava custos e requisitos técnicos significativos. A produção em larga escala nunca chegou a concretizar-se plenamente, em parte devido a estas exigências e também por limitações logísticas e financeiras na sua disseminação (Isbilen, 2022, pp. 73–79).

Ainda assim, o trabalho de Gropius e Wachsmann tornou-se uma referência pela forma como integrou modularidade, desmontabilidade e eficiência produtiva. Tal como documentado em *Walter Gropius: Buildings and Projects*, o projeto é considerado um dos mais experimentais no campo da pré-fabricação da sua época, marcando a história da arquitetura moderna (Krohn, 2019, pp. 214–217).

No contexto desta investigação, o Packaged House System inspirou a procura por um número reduzido de componentes e por soluções de ligação reversível que assegurem estabilidade estrutural sem recurso a fixações permanentes. Embora reinterpretado à luz das tecnologias de fabricação digital, o princípio de padronização e montagem rápida mantém-se como referência na conceção do sistema modular proposto.

3.3 WikiHouse – WikiHouse Foundation

O projeto WikiHouse, iniciado em 2011, constitui uma das referências mais relevantes no campo da construção modular open source. Concebido como uma plataforma colaborativa, disponibiliza publicamente ficheiros paramétricos que permitem a qualquer utilizador fabricar localmente os componentes de um sistema construtivo em madeira, recorrendo a tecnologias de fabricação digital, como a fresagem CNC (WikiHouse Foundation, 2023).

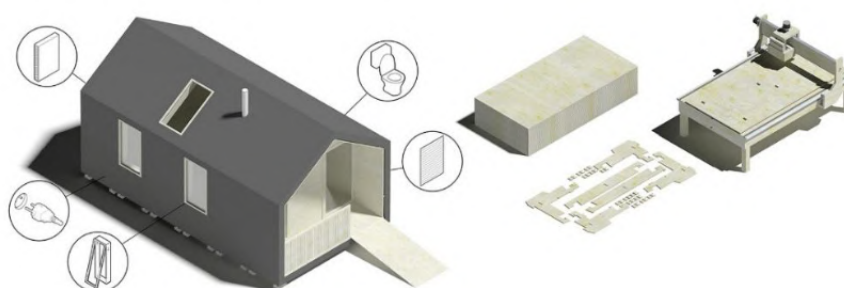


Figura 14 – WikiHouse apresentada por Alastair Parvin no TED2013, ilustrando processo de fabrico e montagem modular. Fonte: Parvin (2013)



Figura 15 - Montagem de módulos WikiHouse em madeira. Reproduzido de WikiHouse (2022).



Figura 16 - Estrutura de parede WikiHouse em fase de montagem. Reproduzido de WikiHouse (2022).

A filosofia do projeto assenta na democratização do acesso à construção, eliminando barreiras técnicas e financeiras associadas a métodos convencionais. Parvin (2013), fundador da iniciativa, defende que a arquitetura deve ser acessível a todos, através da partilha de conhecimento e do uso de processos descentralizados de fabrico. A lógica de User Provided Housing referida por Cerulli et al. (2010, pp. 14–15) está presente nesta proposta, colocando o utilizador como agente ativo na configuração e execução do seu próprio espaço.

O sistema estrutural da WikiHouse é baseado num conjunto de peças que se encaixam por pressão, formando paredes e elementos estruturais sem recurso a fixações permanentes. Este sistema reduz significativamente o tempo de construção, simplifica a montagem e dispensa mão-de-obra especializada.

A abertura do código e a parametrização das ferramentas possibilita a adaptação do projeto a diferentes contextos e requisitos funcionais. A possibilidade de fabricar as peças em oficinas locais, a partir de ficheiros digitais, reduz custos de transporte, diminui a pegada de carbono e estimula a economia local.

No presente trabalho, a WikiHouse influenciou diretamente a definição de estratégias de produção distribuída e de parametrização. A lógica de partilha de ficheiros e a simplicidade dos encaixes serviram de base para o desenvolvimento do algoritmo configurador do sistema proposto, capaz de gerar variantes modulares adaptadas às necessidades de cada aplicação.

3.4 Digital Wood Joints - Jochen Gros

O trabalho de Jochen Gros, apresentado originalmente como 50 Digital Joints, constitui uma referência central na investigação de sistemas de encaixe em madeira concebidos para fabricação digital (Gros & Sulzer, 1997). A compilação reúne e organiza mais de cinquenta tipologias de ligações, explorando variações geométricas e modos de funcionamento que tiram partido da fresagem CNC e da montagem a seco.

A disponibilização contemporânea desta coleção, com ficheiros e modelos 3D acessíveis online, facilitou a análise comparativa das diferentes tipologias e o teste das suas implicações de fabrico e montagem (Winterdienst, 2018). Foi a partir deste repositório que se procedeu à observação sistemática das ligações utilizadas nesta dissertação.

Para além da sua relevância histórica, o trabalho de Gros evidencia o potencial de uma abordagem sistemática ao desenho de encaixes em madeira. Ao organizar um repertório extenso de soluções, o autor não apenas catalogou tipologias existentes, mas também demonstrou como a lógica paramétrica pode ser aplicada à conceção de encaixes. Esta visão antecipa práticas atuais de design generativo, em que a variação controlada se torna ferramenta para explorar alternativas construtivas (Robeller, Mayencourt, & Weinand, 2014, pp. 189–190). No contexto desta investigação, esta perspetiva foi fundamental para compreender a importância da adaptabilidade dos encaixes, permitindo que o sistema modular desenvolvido possa evoluir em função de diferentes requisitos de projeto, mantendo a coerência estrutural e a desmontabilidade.

Neste trabalho, a taxonomia proposta por Gros foi utilizada como base para a seleção e o redesenho dos encaixes do sistema modular. As tipologias escolhidas foram redesenhadas para se adaptarem ao projeto e material utilizado.

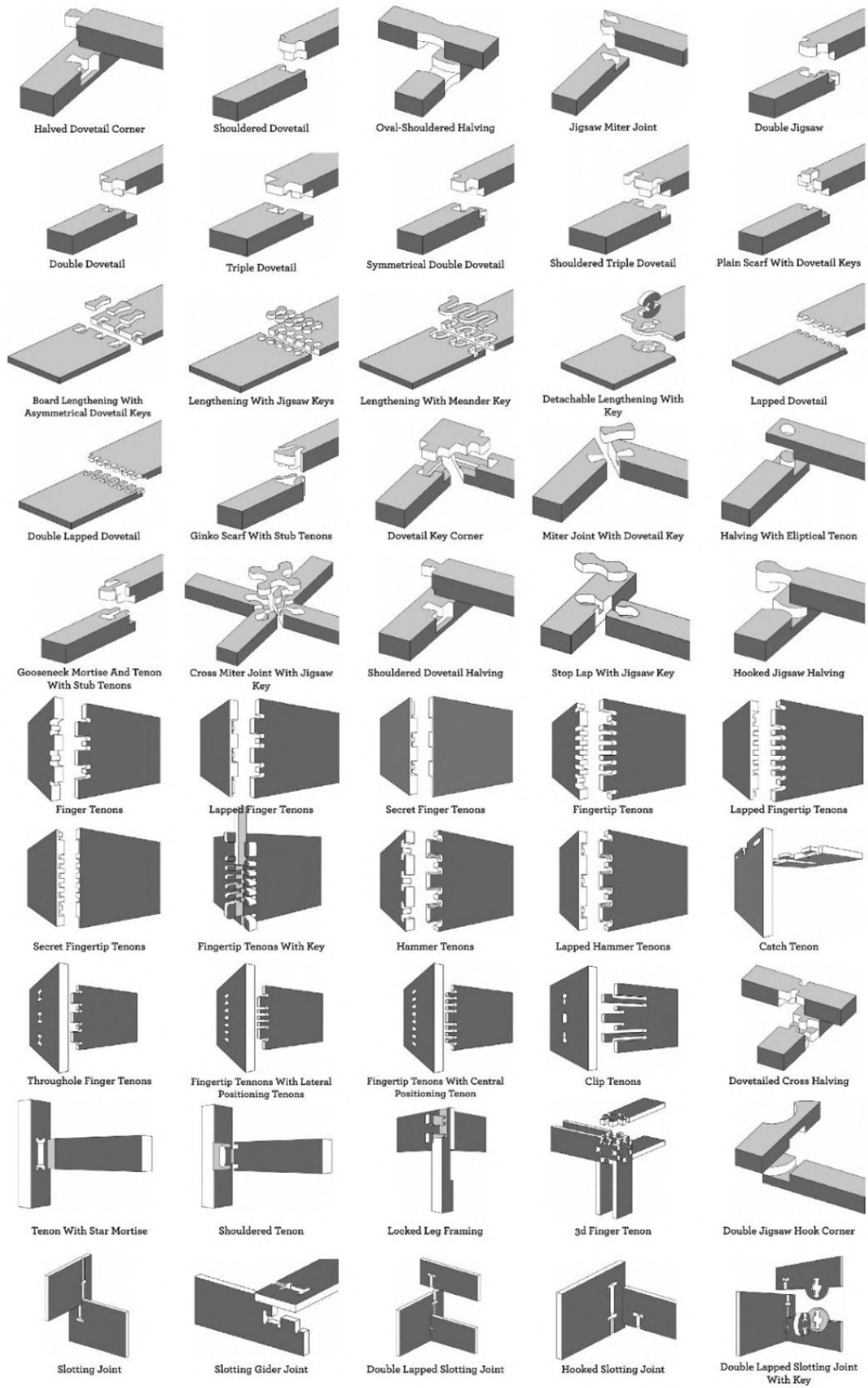


Figura 17 – 50 Digital Wood Joints: seleção de encaixes madeira-madeira para fabrico CNC. Layout: Meredith Scheff-King; projeto: Jochen Gros. Fonte: Flexible Stream.

3.5 Open ReWall - Filipe Brandão

O projeto Open reWall, desenvolvido por Filipe Jorge da Silva Brandão no âmbito do seu doutoramento, apresenta-se como um sistema de divisórias interiores desmontáveis e configuráveis, pensado para contextos de reabilitação e enquadrado no conceito de Mass Customization Construction (MCC). A proposta articula um fluxo de trabalho survey-to-production, que relaciona a caracterização do espaço existente, obtida através da ferramenta RoomSurvey, baseada em algoritmos de triangulação e interação, com o desenho paramétrico e a produção por fresagem CNC, suportados por um configurador online (Brandão, 2022, pp. 227–234).

No desenvolvimento do sistema, o autor distingue dois perfis de intervenção: os meta-designers, responsáveis por definir as regras e parâmetros estruturais da solução, e os instance-designers, que configuram instâncias específicas para cada aplicação (Brandão, 2022, pp. 36–72). O processo evolutivo materializou-se em quatro versões principais, cada uma incorporando melhorias na estabilidade estrutural, na precisão dos encaixes e na simplicidade de montagem e desmontagem (Brandão, 2022, pp. 153–183). Entre as soluções testadas, destacam-se os encaixes reversíveis do tipo snap-fit e T-slot, validados através de protótipos à escala real.



Figura 18 – ORW v4.2: Com quatro componentes montados. (Reproduzido de Brandão, 2022, Fig. 5-54, p. 183).

No contexto desta investigação, o Open reWall constituiu uma referência relevante, sobretudo pela aplicação e desenvolvimento de encaixes do tipo T-slot, que foram reinterpretados no sistema proposto, demonstrando a pertinência de estratégias assentes em encaixes reversíveis e configuradores digitais no âmbito da construção modular.

3.6 EDFAB - McCulloch, Patel e Potauaine

O EDFAB – Eco-digital Fabrication Research Project, desenvolvido por McCulloch, Patel e Potauaine (2021), explora como a fabricação digital pode ser aplicada de forma descentralizada para criar sistemas construtivos acessíveis e replicáveis. Partindo da realidade da construção na Nova Zelândia, marcada pela predominância de pequenas e médias empresas, o objetivo foi demonstrar que máquinas CNC de três eixos e software acessível podiam ser integrados em fluxos de trabalho simples, sem necessidade de grandes infraestruturas industriais (McMeel, Patel & Potauaine, 2021, pp. 182–186).



Figura 19 – EDFAB 3.0 na BuildNZ | Designex expo. Fotografia de Yusef Patel (Reproduzido de McCulloch, Patel e Potauaine, 2021.)

O sistema foi desenvolvido e testado ao longo de quatro iterações, entre 2014 e 2019. Cada fase teve objetivos específicos, desde a construção de um protótipo de 10 m² para um festival, até à realização de uma habitação de 65 m² com a participação de estudantes, investigadores e empreiteiros (McMeel et al., 2017, pp. 1–4; McCulloch, Patel & Potauaine, 2021, pp. 182–189). As peças estruturais eram produzidas em madeira laminada (LVL) e contraplacado fresado por CNC, recorrendo a workflows file-to-factory que incluíam simulação CAM e maquetização em corte a laser antes da execução em escala real.

Os resultados revelaram as vantagens da fabricação digital na redução de custos e na melhoria da precisão, e demonstraram que a produção local com maquinaria relativamente acessível, pode aumentar a autonomia e a participação dos utilizadores no processo construtivo. No entanto, os autores também apontaram desafios, como a complexidade na gestão de variáveis paramétricas e a necessidade de formação técnica para utilizar as ferramentas digitais eficientemente, limitando a apropriação por utilizadores sem experiência prévia (McCulloch, Patel & Potauaine, 2021, pp. 186–189).

A abordagem iterativa de conceção, fabrico e validação prática adotada no EDFAB influenciou diretamente a metodologia utilizada nesta dissertação, especialmente na articulação entre parametrização digital, fresagem CNC e montagem manual, bem como na valorização de processos abertos e adaptáveis a diferentes realidades.

3.7 Sistema UBuild – Studio Bark

O sistema UBuild, desenvolvido pelo estúdio britânico Studio Bark, foi concebido como uma solução de autoconstrução modular em madeira, pensada para ser montada por utilizadores sem formação técnica especializada. Baseia-se numa lógica kit-of-parts, com componentes produzidos em CNC que se ligam através de encaixes mecânicos, dispensando colas ou fixações permanentes (Studio Bark, 2022).

A proposta centra-se na simplicidade do processo construtivo e na redução da pegada ambiental, não apenas pela escolha de materiais sustentáveis, mas também pela possibilidade de desmontar integralmente os módulos, permitindo a sua reutilização ou reconfiguração. O sistema também privilegia a produção local, viabilizando que

pequenas oficinas fabriquem as peças a partir de ficheiros digitais fornecidos pelo projeto (Studio Bark, 2022).



Figura 20 - U-Build, Internal Living Pods: montagem de módulo interior. (Reproduzido de U-Build, (s.d.).



Figura 21 - Kit de ferramentas e componentes utilizados no sistema U-Build. Reproduzido de U-Build (s.d.).

Um aspeto distintivo do UBuild é a atenção dada à ergonomia e à experiência do utilizador na montagem. As peças são dimensionadas para serem manuseadas por uma ou duas pessoas, e a sequência de montagem foi desenhada para ser intuitiva, minimizando a necessidade de instruções complexas ou a utilização de ferramentas adicionais (Studio Bark, 2022).

No contexto desta investigação, o UBuild serviu como referência para reforçar a importância da redução do número de operações na montagem. A abordagem adotada pelo Studio Bark confirma que é possível conciliar modularidade reversível, fresagem CNC e facilidade de montagem num sistema que seja simultaneamente sustentável, acessível e adaptável.

3.8 De Demontabele Lantaarn - Floris van der Kleij

Edifício em madeira concebido de raiz para ser totalmente desmontável, reutilizável e ampliável, o The Demountable Lantern, projetado pelo Studio Floris van der Kleij, concretiza uma estratégia de DfMAD. Todos os nós estruturais são aparafusados e mantidos acessíveis, a modulação é regular e o projeto tira partido de fundações pré-existentes, reduzindo o impacto ambiental e permitindo a futura transferência do conjunto para outro local (Schouten, 2020; Studio florisvanderkleij, s.d.).



Figura 22 - The Demountable Lantern: vista exterior da fachada principal. Reproduzido de Studio florisvanderkleij (s.d.).



Figura 23- The Demountable Lantern: detalhe de ligação estrutural em madeira. Reproduzido de Studio florisvanderkleij (s.d.).

A solução estrutural combina um núcleo rígido em CLT com pórticos em Glulam, organizados numa grelha de $3,6 \times 3,6$ m que simplifica o fabrico, a logística e as operações de montagem e desmontagem. A ligação à base é realizada através de placas metálicas ancoradas e de um encaixe por ranhura deslizante, permitindo que o edifício seja desapertado e reconstruído e que, quando necessário, possa crescer por adição de pisos (Schouten, 2020).

Este edifício reforça a ideia de que a desmontabilidade total é alcançável através de soluções técnicas diretas e acessíveis, como o uso de ligações a seco e reversíveis e de uma estrutura reconfigurável. Estes princípios alinham-se com a metodologia explorada nesta dissertação, onde a definição de um módulo desmontável em madeira procurou incorporar a mesma lógica de simplicidade construtiva e adaptabilidade.

3.9 AUAR – Automated Architecture

A iniciativa Automated Architecture (AUAR), liderada por Manuel Jiménez Garcia, Gilles Retsin e Mollie Claypool, explora a integração entre fabricação digital, design paramétrico e processos de montagem robotizada para o desenvolvimento de sistemas modulares em madeira. Esta abordagem propõe a utilização de pequenos robôs colaborativos para a construção de unidades modulares, combinando automação na montagem com flexibilidade na configuração dos espaços (Claypool, 2020).

O sistema baseia-se em blocos modulares fabricados por CNC, que podem ser unidos em diferentes combinações para gerar tipologias variadas de habitação. A lógica

de produção segue um modelo distribuído, em que as peças são produzidas localmente e montadas de forma robotizada, assegurando precisão e consistência no resultado final (Claypool et al., 2020).



Figura 24 – Braço robótico a montar um protótipo de edifício. Reproduzido de AUAR (s.d.).

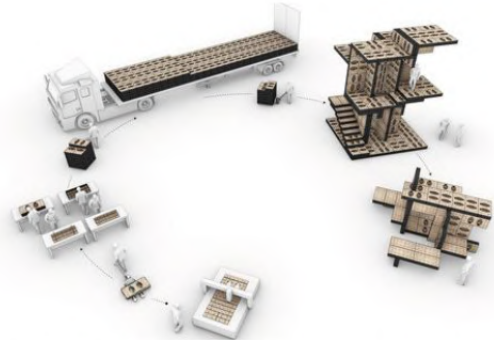


Figura 25– Esquema de produção e montagem robotizada do sistema modular AUAR. Reproduzido de AUAR (s.d.).

A proposta da AUAR destaca-se pela tentativa de democratizar o acesso a tecnologias avançadas de construção, aproximando processos de design paramétrico de comunidades e iniciativas locais. Porém, a necessidade de equipamentos de montagem robotizada e o investimento associado limitam a sua aplicabilidade imediata em contextos de autoconstrução ou com recursos reduzidos (Claypool, 2020).

No âmbito desta investigação, a AUAR constituiu um exemplo de como a produção distribuída e a configuração digital podem ser combinadas para gerar soluções modulares escaláveis. A inspiração centrou-se na flexibilidade de configuração e na articulação entre design paramétrico e produção local, embora tenha sido adotado aqui um processo adaptado a oficinas convencionais, eliminando a dependência de sistemas robotizados de elevado custo.

3.10 Reconfigurable Wood Architecture – Anja Kunic

O projeto Reconfigurable Wood Architecture, desenvolvido por Anja Kunic (2023) no âmbito do seu doutoramento na SDU – University of Southern Denmark, propõe um sistema modular em madeira concebido para ser reconfigurável, totalmente desmontável e produzido através de fabricação digital. A investigação combina encaixes

de fricção, modelação paramétrica e fluxos de produção distribuída, permitindo que as estruturas se adaptem a diferentes programas e contextos (Kunic, 2023, pp. 45–47).

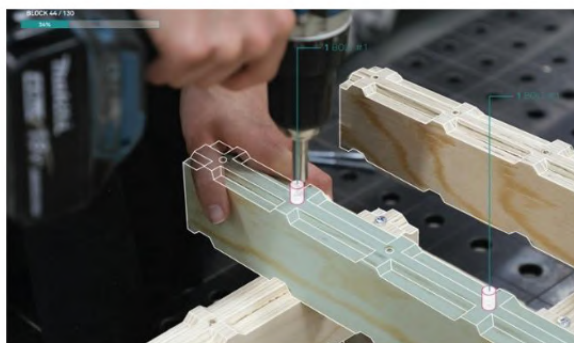


Figura 26 – Processo de montagem do sistema Reconfigurable Wood Architecture, com detalhe dos encaixes modulares. Reproduzido de Kunic (2023, p. 93).



Figura 27 – Protótipo físico do sistema Reconfigurable Wood Architecture. Reproduzido de Kunic (2023, p. 107).

A abordagem de Kunic destaca-se pela aplicação de princípios incrementais, em que o sistema pode ser expandido ou modificado ao longo do tempo sem necessidade de substituição integral dos componentes. A utilização de parametrização digital garante que as peças sejam ajustadas automaticamente às dimensões e características específicas de cada projeto, preservando a compatibilidade entre elementos (Kunic, 2023, pp. 82–85).

Estes princípios foram posteriormente aprofundados por Kunic, Cognoli e Naboni (2024), que introduzem o conceito de Material Digital Twin como ferramenta de reforço da circularidade. Esta abordagem evidencia como a integração de dados digitais no ciclo de vida da madeira pode apoiar processos de reconfiguração e reutilização, aproximando a investigação de cenários de construção circular em larga escala (pp. 409–412).

Apesar das vantagens, a complexidade do processo de configuração e a necessidade de software especializado representam desafios para a adoção em contextos de pequena escala ou de autoconstrução. A implementação requer competências avançadas em modelação paramétrica e um controlo rigoroso da precisão no fabrico (Kunic, 2023, pp. 102–105).

No desenvolvimento desta dissertação, a lógica de reconfiguração modular proposta por Kunic foi reinterpretada, procurando simplificar o processo de configuração e reduzir a dependência de ferramentas digitais avançadas. Mantiveram-se

os princípios de desmontabilidade, flexibilidade estrutural e produção local, alinhando o sistema com uma filosofia aberta e evolutiva.

3.11 Discussão dos casos estudados

A análise dos casos de estudo permitiu identificar um conjunto de princípios comuns às abordagens mais relevantes no campo da construção modular contemporânea. Entre eles destacam-se: a racionalização do número de componentes, a desmontabilidade integral, a exploração das potencialidades da fabricação digital e a produção descentralizada como alternativa aos modelos industriais centralizados.

Apesar desta base partilhada, os projetos analisados também revelam desafios que condicionam a sua adoção em contextos mais amplos. Em algumas propostas, a complexidade dos fluxos de trabalho digitais e a dependência de software ou equipamentos especializados surgem como entraves à replicação em pequena escala ou em regimes de autoconstrução, como se verifica em sistemas baseados em parametrização avançada e montagem robotizada, exemplificados pela AUAR (Claypool, 2020; Claypool et al., 2020) e pela proposta de Kunic (2023). Noutras, a resistência estrutural e a durabilidade dos encaixes constituem pontos críticos, sobretudo quando se pretende escalar as soluções para usos permanentes ou de maior exigência técnica, como demonstrado nos testes de prototipagem do Open reWall (Brandão, 2022) ou nas experiências iniciais do EDFAB (McCulloch, Patel & Potauaine, 2021).

O sistema desenvolvido nesta investigação procura responder a estas questões através da integração seletiva de metodologias e soluções identificadas nos diferentes casos. Foram reinterpretadas estratégias de encaixe sistematizadas por Jochen Gros (Gros & Sulzer, 1997) e exploradas no Open reWall (Brandão, 2022); adotou-se a lógica de produção distribuída e de código aberto presente na WikiHouse (WikiHouse Foundation, 2023; Parvin, 2013); e incorporou-se a simplicidade construtiva defendida por propostas como o UBuild (Studio Bark, 2022) e a De Demontabele Lantaarn (Schouten, 2020).

Ao adaptar estas referências ao contexto específico de fabricação CNC em contraplacado de 18 mm e a um modelo paramétrico acessível, pretendeu-se criar um sistema modular aberto, de montagem intuitiva e compatível com recursos técnicos

limitados. Esta abordagem conjuga a precisão e a eficiência da fabricação digital com a viabilidade de implementação em oficinas locais, mantendo a desmontabilidade e a possibilidade de evolução futura como princípios centrais.

No capítulo seguinte, estas influências são materializadas num módulo com estrutura perimetral portante, concebido segundo os princípios de DfMAD e otimizado para fresagem CNC.

4 DESENVOLVIMENTO, PROTOTIPAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DIGITAL

Este capítulo apresenta o processo de desenvolvimento do sistema construtivo modular proposto, acompanhando todas as etapas desde a definição dos critérios de projeto até à produção física e validação em contexto real. A abordagem combinou conceção digital, fabrico por CNC e prototipagem em escala real, seguindo um método iterativo em que cada ensaio informava e refinava as fases seguintes.

As decisões resultaram da articulação entre a base teórica consolidada nos capítulos anteriores, a análise crítica dos casos de estudo e a experimentação prática em oficina. Todo o trabalho foi orientado por princípios claros: modularidade, desmontabilidade, eficiência no uso de materiais e compatibilidade com processos de fabricação digital, procurando sempre desenvolver um sistema aberto, adaptável e passível de replicação. Um aspeto central desta investigação foi a opção de recorrer apenas a um único material, o contraplacado de 18 mm, decisão justificada por razões ecológicas e logísticas, explorando integralmente o seu potencial estrutural, a precisão do corte CNC e a viabilidade de encaixes reversíveis sem recurso a colas, fixações metálicas ou compósitos.

Para estruturar esta descrição, o capítulo organiza-se em sete secções. Na primeira secção (4.1) apresentam-se o conceito do sistema e os requisitos que orientaram a sua conceção. A secção 4.2 compara diferentes materiais e fundamenta a escolha final. A secção 4.3 dedica-se ao estudo e validação das ligações mecânicas em madeira, enquanto a secção 4.4 descreve a configuração estrutural e as tipologias de módulo desenvolvidas. A secção 4.5 apresenta a sequência de montagem do módulo; a secção 4.6 detalha a preparação dos ficheiros para fabrico e a execução da fresagem CNC; e a secção 4.7 documenta a montagem física do protótipo e a avaliação do seu desempenho. A lógica paramétrica de configuração dos módulos é abordada em detalhe no Capítulo 5.

4.1 Conceito e requisitos de projeto

A definição conceptual do sistema construtivo desenvolvido neste projeto, designado por Loop – Sistema de Construção Modular, parte da aplicação prática dos princípios apresentados no enquadramento teórico (ver ponto 2.5), com particular

atenção à desmontabilidade integral e à eficiência de fabrico. A designação Loop sublinha a sua dupla vocação: Sistema Construtivo e Sustentabilidade, reforçando o compromisso com soluções circulares e replicáveis.

A fase inicial do desenvolvimento incluiu a elaboração de esboços e estudos volumétricos no Rhino, explorando proporções e relações espaciais antes de avançar para definições construtivas detalhadas. Esta etapa permitiu avaliar a viabilidade de diferentes hipóteses formais e compreender de que modo as dimensões e a organização dos elementos influenciavam a montagem, a estabilidade e a compatibilidade estrutural do sistema.

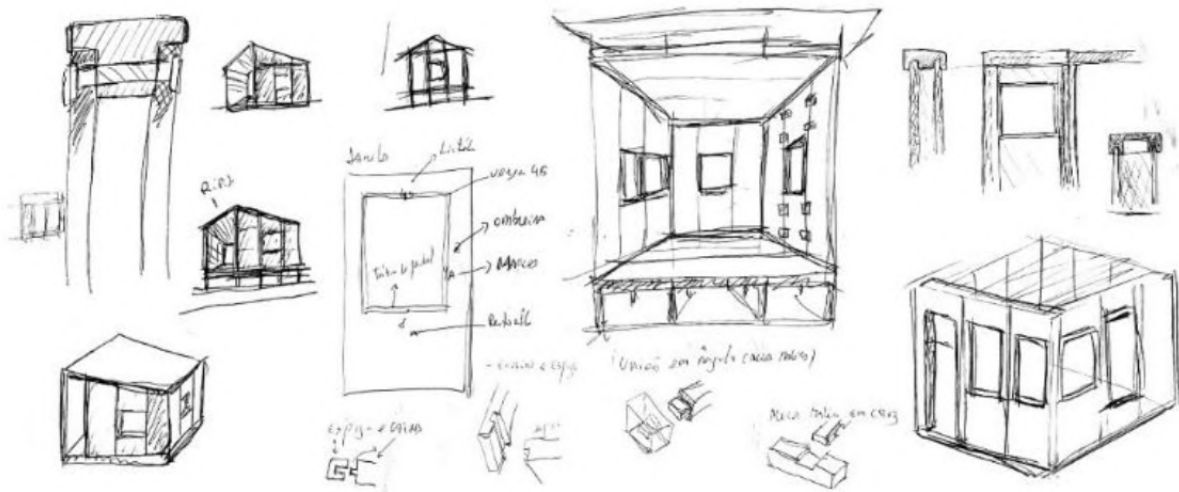


Figura 28 – Esboços. Elaboração própria (2025).

Numa fase preliminar, foi considerada a criação de módulos complementares para laje e cobertura (Figura 29). Contudo, o projeto foi reorientado para se concentrar exclusivamente no módulo de parede, decisão motivada pela limitação de tempo. Apesar desta redução, o módulo de parede foi desenhado com furações para ligação futura a uma estrutura de laje, assegurando compatibilidade modular e possibilidade de expansão vertical.

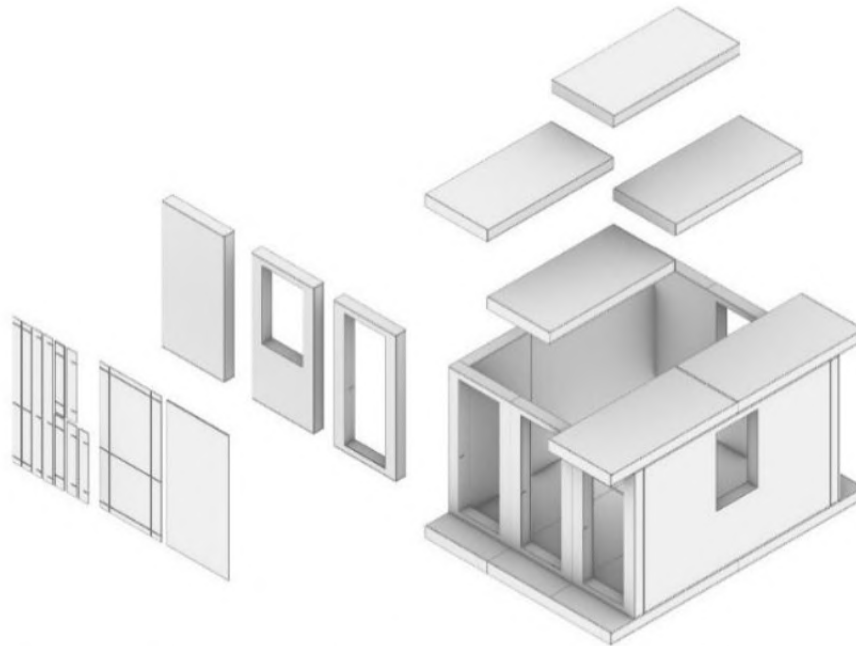


Figura 29 – Estudo de módulos de laje e cobertura. Elaboração própria (2025).

A análise crítica de referências evidenciou a necessidade de simplificar a biblioteca de componentes e reduzir tempos de corte e desperdícios, orientando o projeto para uma solução de montagem mais direta e de produção mais económica. O estudo das Casas Desmontáveis de Jean Prouvé reforçou a importância de o módulo adquirir rigidez global no ato de montagem: daí resulta o conceito de aro exterior como moldura estrutural que fecha e consolida o conjunto. Adicionalmente, definiu-se como premissa que as diferentes variantes partilhassem o maior número possível de peças, facilitando reconversões e manutenção ao longo do ciclo de vida.

O sistema é constituído por peças produzidas em fresadora CNC de 3 eixos, concebidas para se unirem através de encaixes mecânicos que permitem montagem rápida e manual, sem recurso a ferramentas especializadas. Esta estratégia assegura igualmente a desmontagem sem perda de material ou degradação dos componentes, requisito essencial para garantir a circularidade do sistema e a sua reutilização em diferentes configurações.

Desde a fase inicial de conceção foi também necessário considerar as condicionantes do fabrico digital, em particular a impossibilidade de realizar cantos internos a 90° com fresas circulares. Para ultrapassar essa limitação e assegurar a precisão dos encaixes, adotaram-se T-bones, técnica descrita por Filson, Rohrbacher e Kaziunas France (2017) como solução eficaz em sistemas desmontáveis.

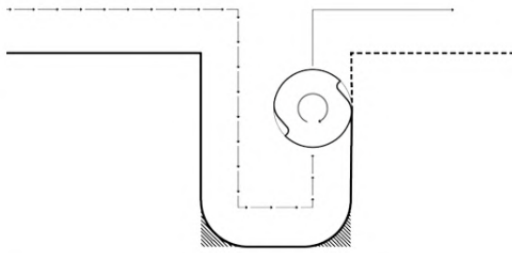


Figura 30 - Problema do canto interior em corte CNC.

Fonte: Filson et al., Design for CNC, 2017.

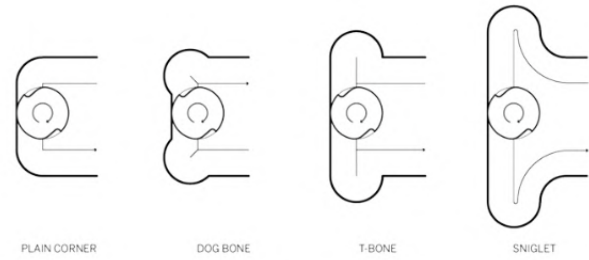


Figura 31– Tipos de fillets aplicados a cantos interiores: plain corner, dog bone, t-bone e sniglet.

Fonte: Filson et al., Design for CNC, 2017.

No caso específico deste projeto, a fresa utilizada foi de 6 mm de diâmetro, correspondendo à execução de T-bones com raio de 3 mm, garantindo o correto encaixe entre peças.

Foram definidos critérios funcionais e produtivos que orientaram o processo:

- **Modularidade** – unidades repetíveis, intercambiáveis e adaptáveis a múltiplas configurações;
- **Eficiência de material** – aproveitamento otimizado das placas de contraplacado de 2400 x 1200 mm, reduzindo desperdícios;
- **Reversibilidade** – todos os componentes removíveis e reutilizáveis, mantendo a integridade após vários ciclos de montagem;
- **Compatibilidade digital** – concepção paramétrica, com tolerâncias integradas no modelo, permitindo adaptação a diferentes espessuras de material e contextos de fabrico;
- **Racionalização de componentes** – biblioteca reduzida e partilha de peças entre tipologias, simplificando produção, manutenção e reconversão.

A escolha do contraplacado de 18 mm resultou da sua resistência mecânica, estabilidade dimensional e elevada compatibilidade com o corte CNC, aliada à disponibilidade no mercado local.

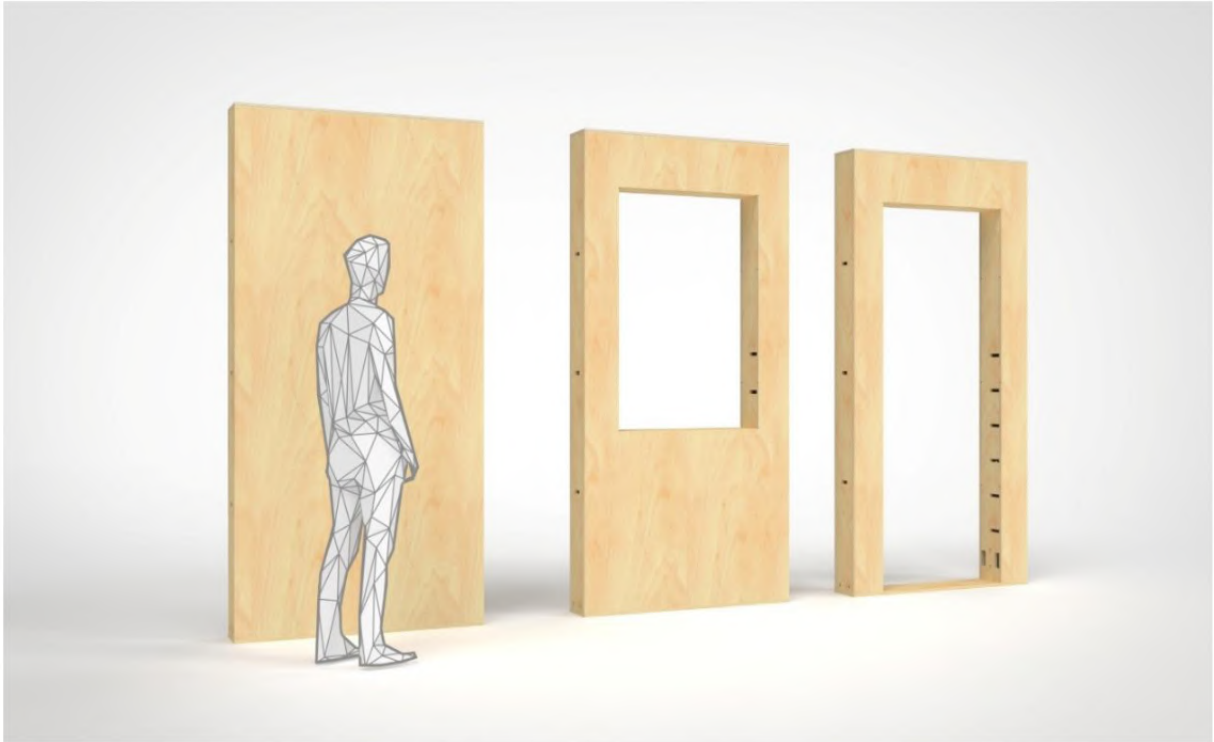


Figura 32 – As três tipologias principais de módulo de parede: opaco, com vão e com porta. Elaboração própria (2025).

O sistema contempla três tipologias principais de módulo de parede: opaco, com vão e com porta.

Cada variante pode ser selecionada no configurador desenvolvido no software Grasshopper (ver ponto 4.5), ajustando dimensões e adaptando uniões às condições de montagem. Estes ficheiros são exportados com layers diferenciados por operação (corte total, rebaixo ou fresagem T-slot), simplificando a preparação para fabrico (as dimensões dos vãos são detalhadas no ponto 4.4).

Deste modo, os requisitos de projeto estruturam-se como uma estratégia aberta e iterativa que alia modularidade, desmontabilidade e o potencial da fabricação digital distribuída, permitindo criar sistemas acessíveis e adaptáveis a diferentes contextos de aplicação. A estratégia de validação física, com protótipo à escala 1:2 e encaixes/espessura em tamanho real, é detalhada no ponto 4.7.

4.2 Seleção de materiais: Comparação e justificação

A definição do material constituiu uma etapa central, pois condiciona não apenas o desempenho estrutural do sistema, mas também a sua viabilidade de fabrico e

desmontagem. Na revisão de literatura (ver ponto 2.10) foram analisados diferentes derivados de madeira, MDF, OSB, CLT e contraplacado, avaliando-se propriedades técnicas, limitações e adequação ao fabrico digital. Após esta análise, o contraplacado de bétula com 18 mm foi selecionado como a solução mais adequada.

A sua composição em lâminas cruzadas confere-lhe resistência mecânica e estabilidade dimensional, assegurando a durabilidade e a possibilidade de encaixes reversíveis, em linha com os princípios do DfMAD. A compatibilidade com o corte CNC garante a precisão dos encaixes e reforça a desmontabilidade integral (Ottenhaus et al., 2023). Esta escolha revelou-se adequada também na fase de prototipagem, em que a execução de ensaios confirmou a fiabilidade das uniões.

A decisão articula-se igualmente com práticas de produção distribuída, como salientam McCulloch et al. (2021), que destacam a importância de materiais de fácil acesso para a replicabilidade de sistemas digitais em oficinas locais. Além disso, a possibilidade de recorrer a placas com certificação FSC (Forest Stewardship Council) ou PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification) assegura coerência com os objetivos ambientais do projeto, reforçando a ligação entre desempenho técnico e sustentabilidade.

4.3 Encaixes reversíveis em madeira: Referências e desenvolvimento

A conceção do sistema modular obrigou a uma reflexão cuidada sobre as uniões entre peças, uma vez que destas dependem a precisão, a estabilidade estrutural e a possibilidade de desmontagem sem perda de material. Tal como assinalam Ottenhaus et al. (2023, pp. 4–6), a eficácia de um sistema construtivo desmontável reside, em grande parte, na reversibilidade das ligações, condição indispensável para prolongar o ciclo de vida dos componentes e para garantir a sua reutilização em diferentes contextos.

A relevância dos encaixes em madeira não é um tema novo, mas o desenvolvimento recente da fabricação digital permitiu reinterpretar soluções tradicionais com maior rigor e consistência. Schutzer et al. (2024, pp. 104–108), por exemplo, demonstram como o corte CNC pode ser explorado para criar uniões de elevada precisão, enquanto Gros & Sulzer (1997) sistematizam uma taxonomia de mais

de cinquenta tipologias, propondo um verdadeiro vocabulário de ligações aplicáveis à produção local.

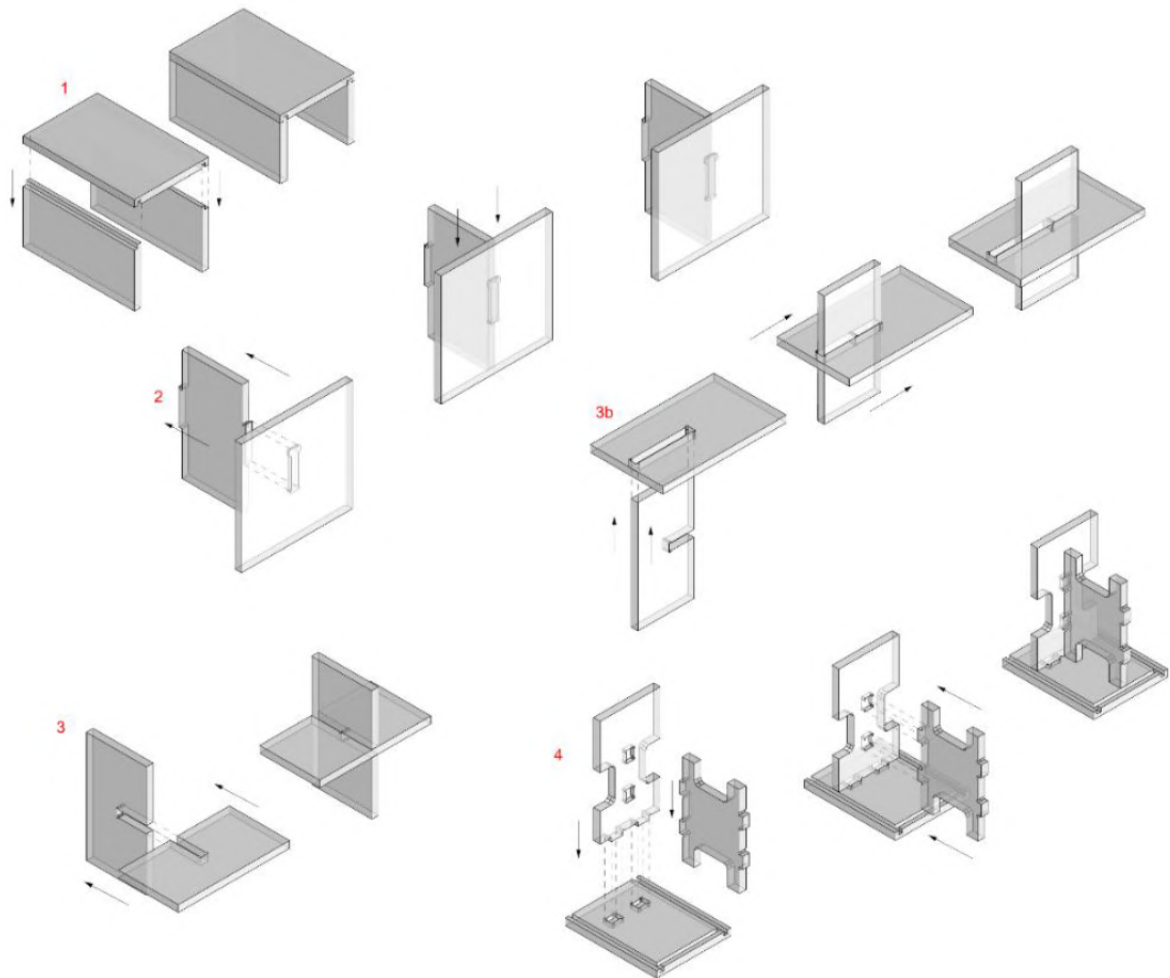


Figura 33 – Tipologias de encaixes selecionadas para o sistema modular Loop: (1) lingueta e ranhura, (2) T-slot, (3) meia-madeira e (4) espiga e furo. Elaboração própria (2025)

No presente trabalho foram selecionados quatro tipos principais de encaixe (Figura 33), cada um adaptado às exigências do contraplacado de 18 mm:

- **Lingueta e Ranhura**– utilizado em uniões perpendiculares, garante alinhamento;
- **T-slot**– desenvolvido após o primeiro teste físico, para evitar o desencaixe perpendicular das placas frontais. Inspirado por Brandão (2022, pp. 169–173) que no projeto Open reWall desenvolveu e validou este sistema;

- **Meia-madeira**– aplicado em peças de secção semelhante, assegura continuidade estrutural e poupança de material (Di Gioia, Cattete, & Raymundo, 2019, pp. 2–3);
- **Espiga e furo** – conhecido pela sua resistência e longevidade, documentado na carpintaria tradicional japonesa (Sato & Nakahara, 1995, pp. 34–36), foi usado nos travamentos para reforçar a coesão sem recurso a colas ou parafusos.

A definição destas soluções foi acompanhada por testes seccionais (ver ponto 4.7.1), que permitiram aferir o desempenho real dos encaixes. A execução digital incorporou uma tolerância de 0,5 mm, definida no desenho, de modo a compensar pequenas variações e assegurar uniões firmes, mas reversíveis. Estes ensaios demonstraram que as peças podem suportar vários ciclos de montagem e desmontagem sem degradação visível.

Além das uniões internas, foram concebidas cunhas de travamento contraplacado para a ligação entre módulos. Estes elementos funcionam por pressão, garantem estabilidade e podem ser removidos facilmente, reforçando a desmontabilidade e permitindo reconfigurações rápidas da estrutura.



Figura 34 - Tampa e cunhas de travamento para ligação entre módulos. Elaboração própria (2025)

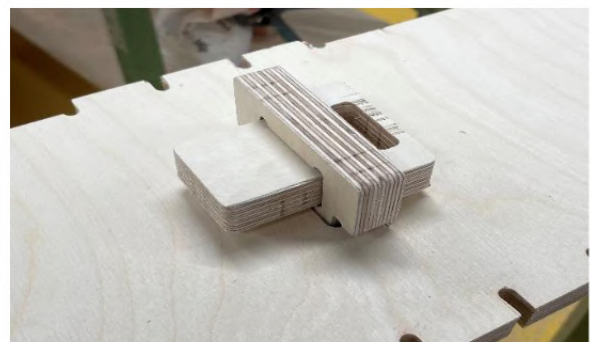


Figura 35 – Cunhas de travamento para ligação entre módulos. Elaboração própria (2025).

4.4 Estrutura modular e tipologias de módulo

A estrutura do sistema proposto foi concebida segundo uma lógica modular que privilegia repetição, intercambiabilidade e compatibilidade dimensional entre diferentes

tipologias. A configuração do módulo de parede está otimizada para a utilização de placas de contraplacado de 2400 × 1200 mm, garantindo otimização do material e facilidade de substituição de componentes.

Cada módulo é constituído por um conjunto de 20 peças em contraplacado de 18 mm, maquinadas em CNC, que se unem através de encaixes mecânicos de fricção, complementados por cunhas de travamento. Esta solução assegura montagem e desmontagem repetidas sem perda de tolerância ou estabilidade. A ligação entre as peças é reforçada por uma estrutura perimetral portante, que confere coesão ao conjunto sem recurso a fixações metálicas permanentes, mantendo a reversibilidade integral do sistema. O módulo apresenta uma espessura total de 200 mm, incorporando um espaço técnico interno destinado à passagem de cabos, tubagens e instalação de isolamento, permitindo intervenções posteriores sem comprometer a integridade estrutural.

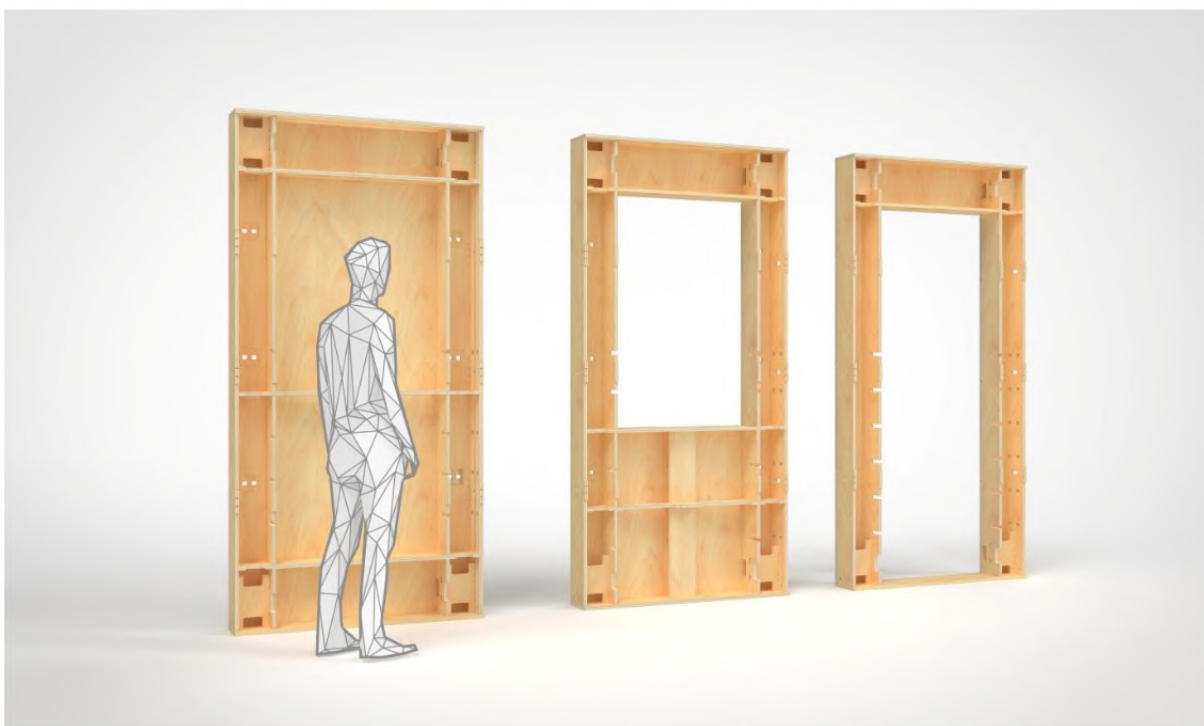


Figura 36 – Estrutura interna. Espaço técnico interno. Elaboração própria (2025).

Com o objetivo de simplificar a produção e facilitar reparações ou substituições, optou-se por reduzir o número de componentes distintos: das 20 peças que constituem os módulos, 17 são comuns a todas as tipologias. Esta estratégia agiliza o fabrico e diminui a complexidade de montagem, encontrando paralelo noutras investigações que

demonstram que a redução da variabilidade de peças aumenta a eficiência produtiva e favorece a replicabilidade em contextos de produção distribuída.

Foram definidas três tipologias principais de módulo de parede:

- **Opaco** – módulo A - destinado ao fecho integral;
- **Com vão (6 variantes)** - para integração de janelas, com larguras normalizadas de 800 mm e alturas de 800 mm (módulo B), 1000 mm (módulo C), 1200 mm (módulo D), 1400 mm (módulo F), 1600 mm (módulo G) e 1800 mm (módulo H);
- **Com porta** – módulo H- destinado a acessos, com altura de 2100 mm.

As peças organizam-se em quatro grupos (Figura 37):

- **Grupo 1**– reúne os componentes comuns a todas as oito tipologias (peças 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15 e 16).
- **Grupo 2B**– é partilhado por sete tipologias (peças 12 e 11).
- **Grupo 2C**– partilhado por seis (peça 10).
- **Grupo 3**– inclui os elementos específicos de cada módulo (peças 1, 2 e 3).

As peças P.1 possuem três variantes, relacionadas com o posicionamento do módulo no edifício. Por exemplo: a P.1.A (contígua, sem furação para cunhas), a P.1.A.DIR (com furação do lado direito) e a P.1.A.ESQ (com furação do lado esquerdo).

Esta estratégia de agrupamento permite maximizar a intercambiabilidade e simplificar tanto a produção como a substituição de peças danificadas.

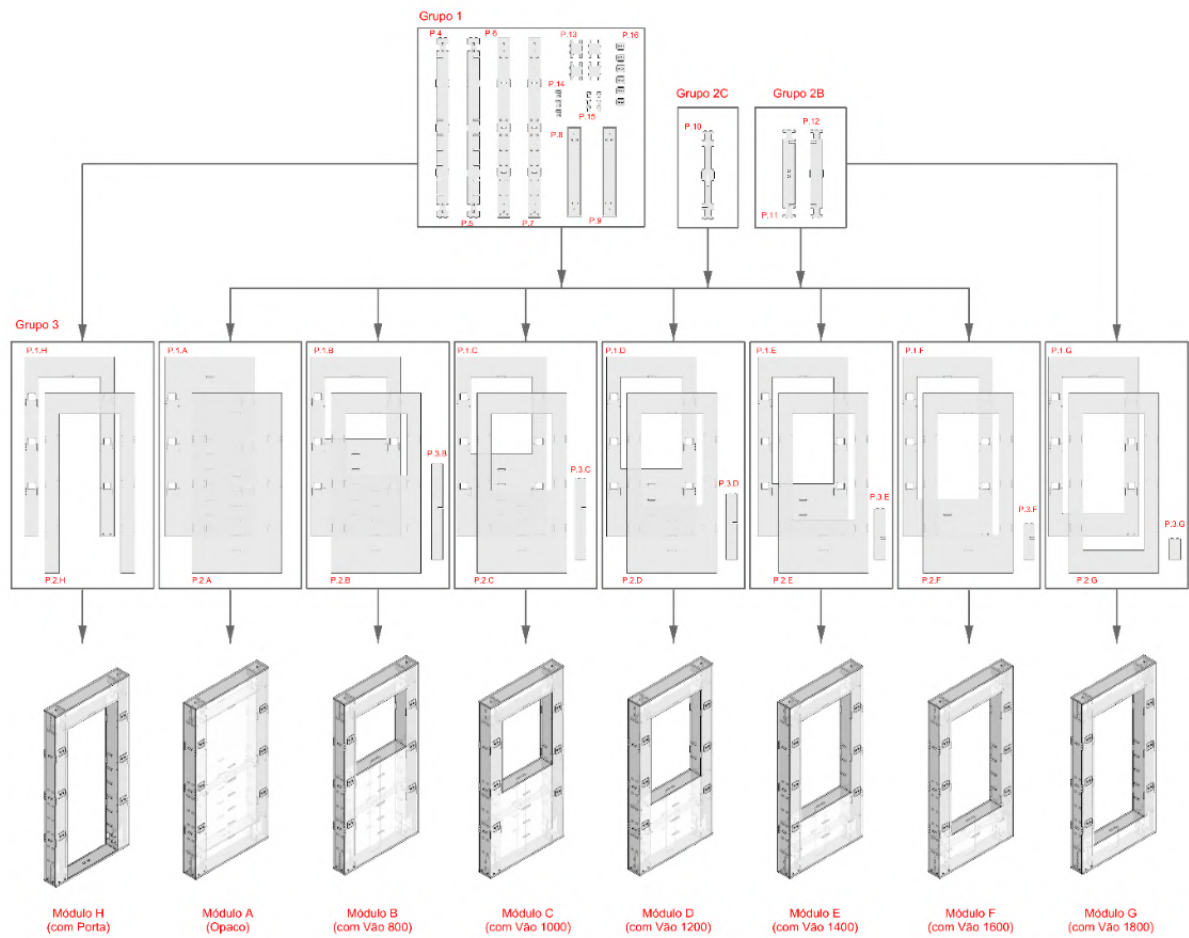


Figura 37 – Peças que constituem os módulos do sistema proposto. Elaboração própria (2025).

Todas as tipologias podem ser selecionadas através do configurador desenvolvido em Grasshopper (ver Capítulo 5), que distribui e numera os módulos na área definida pelo utilizador, permite a escolha tipológica módulo a módulo e gera os outputs necessários ao fabrico: visualização 3D da configuração final, ficheiros DXF organizados por layers de operação e tabela Excel com quantidades e custos.

O sistema foi desenhado para permitir extensões incrementais, possibilitando a expansão ou reorganização dos módulos conforme as necessidades do utilizador (Figuras 38 e 39). Esta abordagem mantém-se fiel aos princípios de acessibilidade, adaptabilidade e compatibilidade com produção local, permitindo a replicação em diferentes contextos e escalas sem comprometer a simplicidade construtiva ou a desmontabilidade.



Figura 38 – Módulos montados para configurar um espaço habitável de 4,8 x 6,4 m. Elaboração própria (2025).



Figura 39 – Módulos montados para configurar um espaço habitável de 4,8 x 6,4 m. Elaboração própria (2025).

As Figuras 40 e 41 apresentam, respectivamente, o módulo opaco e o módulo com vão de 1200 mm. Cada uma ilustra a organização das peças em nesting, a vista explodida com numeração dos componentes e a representação do módulo montado. Estes diagramas estabelecem uma ligação direta entre a lógica digital de desenho e fabrico e a materialização física em oficina, funcionando como referência para a sequência de montagem detalhada no ponto 4.5.

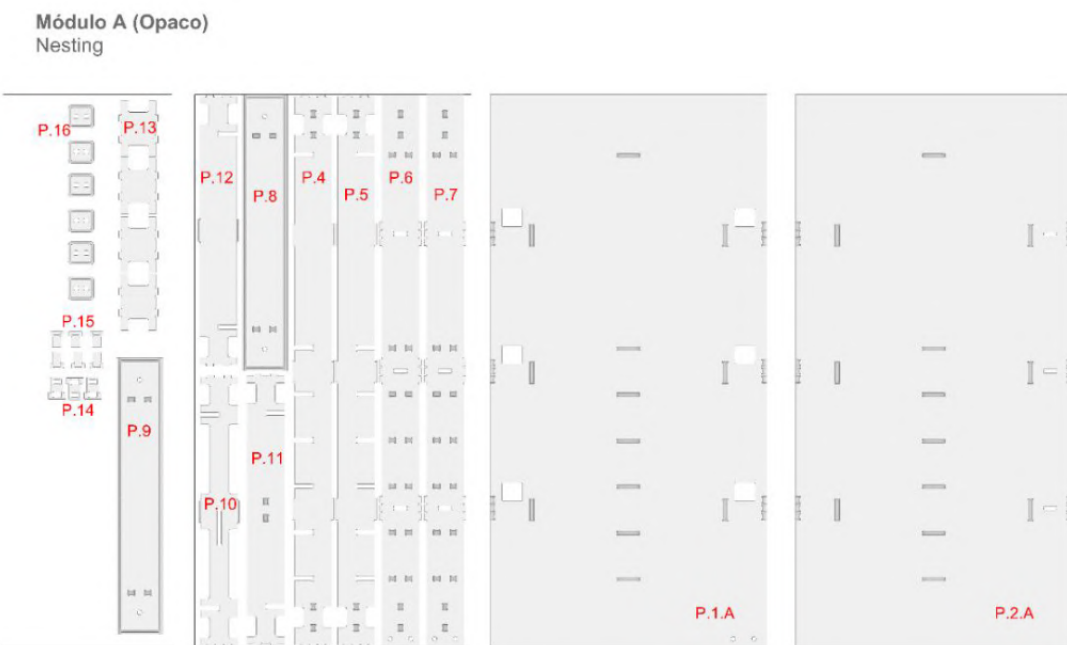
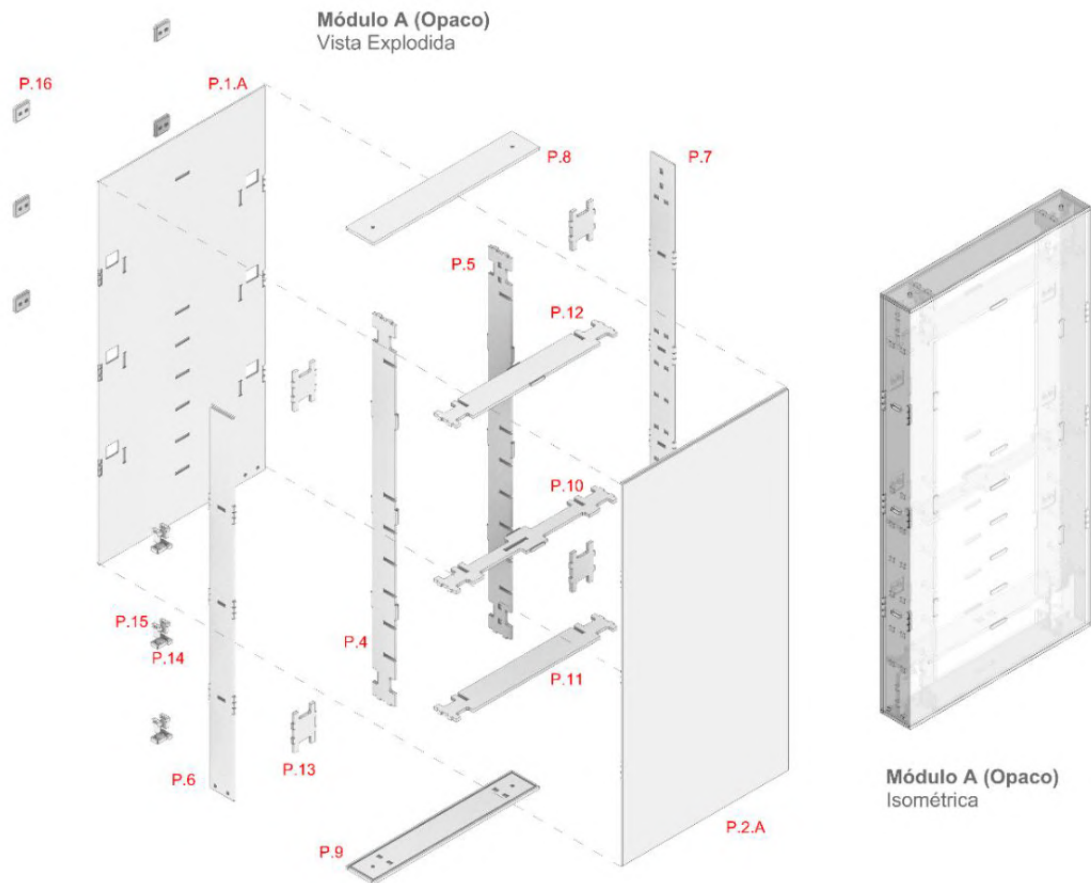
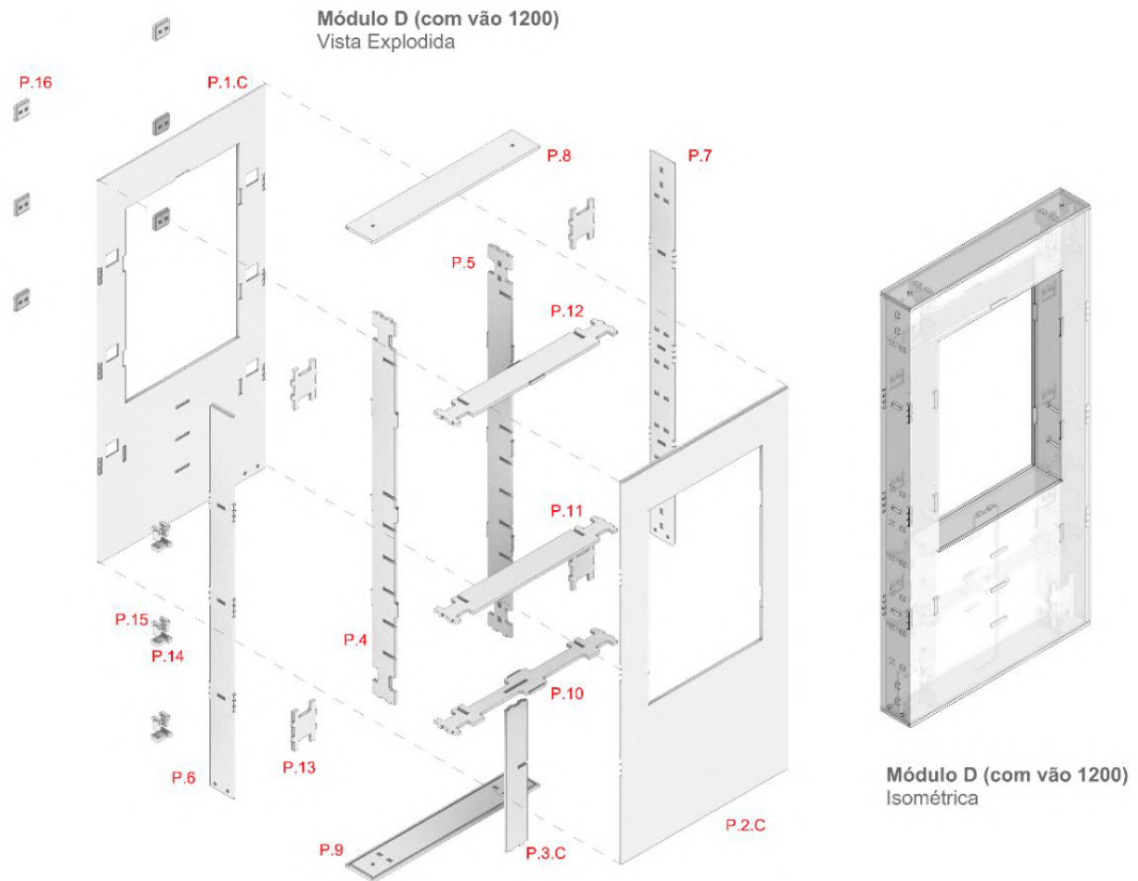


Figura 40 – Módulo A (opaco) – Vista explodida, módulo montado e nesting. Elaboração própria (2025).

Legenda: (P.1.A e P.2.A) painéis frontais; (P.4 e P.5) montantes verticais; (P.6 e P.7) painéis laterais; (P.8 e P.9) placas de fecho inferior e superior; (P.10 e P.11) travessas horizontais inferiores; (P.12) travessa horizontal superior; (P.13) peças de travamento intermédio; (P.14 e P.15) conjuntos de cunhas de fixação; (P.16) tampas de acesso.



Módulo D (com vão 1200)
Nesting

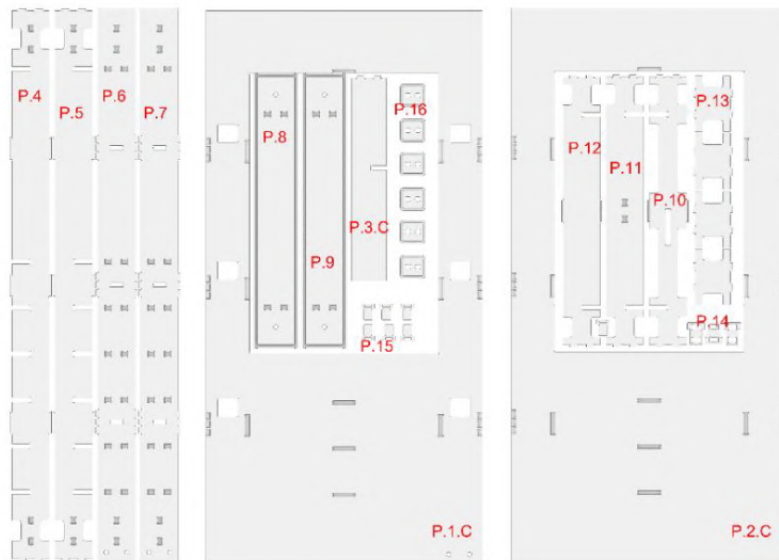


Figura 41 – Módulo D (vão de 1200 mm) – Vista explodida, módulo montado e nesting. Elaboração própria (2025).

Legenda: (P.1.C e P.2.C) painéis frontais; (P.3) montante central (P.4 e P.5) montantes verticais; (P.6 e P.7) painéis laterais; (P.8 e P.9) placas de fecho inferior e superior; (P.10 e P.11) travessas horizontais inferiores; (P.12) travessa horizontal superior; (P.13) peças de travamento intermédio; (P.14 e P.15) conjuntos de cunhas de fixação; (P.16) tampas de acesso.

4.5 Sequência de montagem do módulo

A montagem dos módulos foi concebida segundo uma lógica progressiva de encaixe, pensada para garantir rapidez, precisão e total reversibilidade. O processo inicia-se pela estrutura interna e conclui-se com o fecho das placas exteriores, assegurando a estabilidade e a coesão dimensional do conjunto.

O desenho desta sequência resultou de várias iterações, apoiadas nos protótipos produzidos, que permitiram validar encaixes, tolerâncias e soluções de travamento.

A sequência foi desenhada para ser intuitiva, para poder ser executada por utilizadores sem formação técnica especializada. Tal opção enquadra-se na lógica de autoconstrução e de produção local defendida por projetos como o UBuild e a WikiHouse, em que a simplificação do processo é condição fundamental para a apropriação por diferentes comunidades.

Os passos principais são os seguintes (ver o ponto A.2 do Anexo A):

1. Coloca-se a peça P.2 em posição horizontal e ligeiramente elevada.
2. Encaixa-se a P.10 e a P.12 na P.2;
3. Montagem do montante vertical central (P3.);
4. Fixação dos montantes verticais (P.4 e P.5) ao conjunto;
5. Inserção das quatro peças de travamento intermédio (P13), que bloqueiam as uniões e estabilizam a armação;
6. Montagem da placa frontal P.1;
7. Adição das placas laterais de fecho;
8. Colocação da placa superior e da placa inferior de fecho;
9. Finalização do módulo, pronto para ligação a outros através das cunhas de travamento (P.14, P.15 e P.16);
10. Coloca-se o módulo em posição vertical.

A desmontagem integral segue a ordem inversa, mantendo a integridade das peças e confirmando a reversibilidade das ligações. Os ensaios realizados no protótipo (ver 4.7.2) comprovaram que, após múltiplos ciclos de montagem e desmontagem, as

peças mantêm o seu desempenho estrutural, validando a estratégia de encaixes e a pertinência das tolerâncias adotadas

4.6 Geração de ficheiros para fabrico CNC

A etapa de fabrico foi organizada de forma a assegurar precisão dimensional e a otimização do uso do material. A partir do modelo tridimensional desenvolvido em Rhino3D, foram exportados ficheiros DXF separados por layers.

Foi utilizado o AutoCAD para facilitar a integração no software CAM utilizado para gerar o G-code (o VCarve na CNC utilizada).

Os ficheiros foram preparados com a seguinte lógica de separação de operações:

- **Layer 1 – Corte total:** contornos externos das peças, realizados com fresa de topo de 6 mm (Amarelo);
- **Layer 2 – Rebaixo de 9 mm:** encaixes intermédios para ligação entre peças, realizados com fresa de topo de 6 mm (Magenta);
- **Layer 3 – Fresagem T-slot:** canais específicos para o sistema de travamento mecânico, executados com fresa em “T” (Verde);
- **Layer 4 – Rebaixo adicional de 9 mm:** operações complementares na face oposta da placa, realizados com fresa de topo de 6 mm (Ciano).

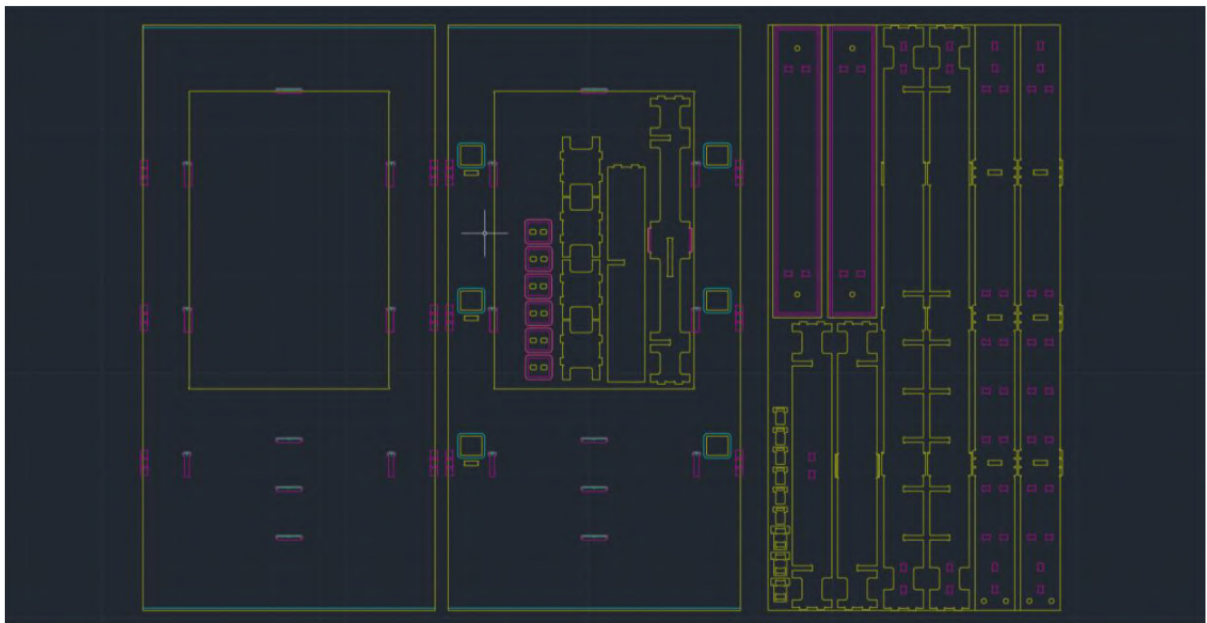


Figura 42 – Desenho DXF de módulo D separado por layers de trabalho. Elaboração própria (2025).

Esta organização clara das operações permitiu racionalizar o processo de fabrico, assegurando que cada peça fosse cortada com a sequência correta e evitando sobreposições de comandos.

O nesting, organização das peças nas placas standard de 2400 x 1200 mm, foi realizada de forma manual, garantindo ainda assim um aproveitamento adequado do material e redução de desperdícios. A implementação futura do nesting automatizado será determinante para reforçar a eficiência do processo e encontra-se prevista como linha de desenvolvimento subsequente.

O controlo dos parâmetros de corte (velocidade, profundidade e número de passagens) deverá de ser afinado de acordo com as características das ferramentas utilizadas na produção, de forma a equilibrar rapidez de execução e qualidade de acabamento para obter arestas limpas e reduzir a necessidade de pós-processamento.

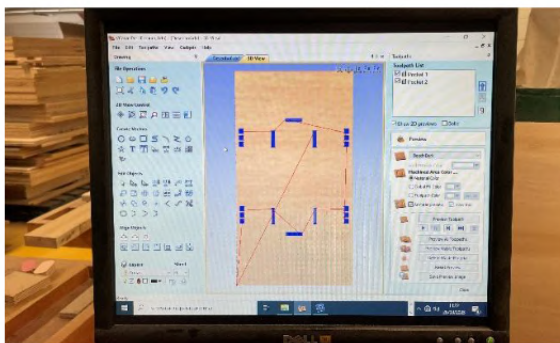


Figura 43 – Simulação das operações de maquinação no software V-Carve. Elaboração própria (2025).

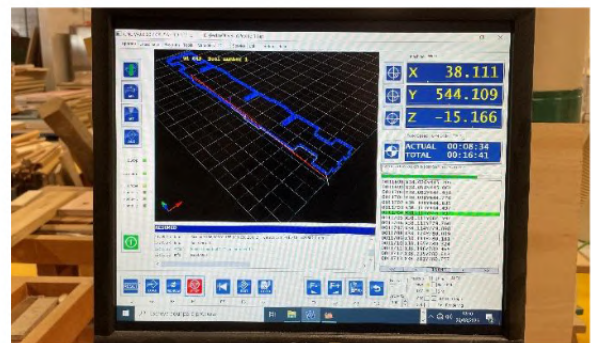


Figura 44 – Software de controlo da máquina CNC. Elaboração própria (2025).

Resumindo, a geração dos ficheiros e a preparação para fabrico confirmam a eficácia do fluxo digital desenvolvido: o algoritmo paramétrico gera listas para a seleção dos modelos a cortar, a separação das operações em layers assegura precisão e repetibilidade, e a integração com software CAM valida a coerência entre conceção digital e produção física.

4.7 Prototipagem e testes

Devido às limitações de escala da máquina CNC disponível na Oficina de Design Industrial da ESMAD, cuja área útil de corte é reduzida, o módulo foi adaptado para uma

validação parcial. Optou-se pela execução das uniões em escala real, organizadas num módulo de dimensões reduzidas. Esta estratégia permitiu testar a precisão dos encaixes, a desmontabilidade e a resistência local dos componentes, aspetos fundamentais para avaliar a viabilidade do sistema. Estratégia semelhante foi seguida por Brandão (2022, pp. 175–185) no desenvolvimento do Open reWall, onde a validação se apoiou em protótipos iterativos concebidos para testar hipóteses construtivas específicas.

4.7.1 Ensaios seccionais

Inicialmente foram realizados três ensaios seccionais à escala 1:1 para testar o processo necessário para passar do módulo digital para o físico, validar os encaixes e a calibrar as tolerâncias.

O primeiro ensaio correspondeu a uma secção lateral. A partir da modelação tridimensional, foi seleccionada e separada a zona inferior lateral do módulo. Esta secção foi depois transformada em linhas, organizadas em layers de trabalho, e exportada em DXF para o software VCarve, responsável pela geração do G-Code carregado posteriormente no software controlador da máquina CNC (CNC V4 da Pronum). Este teste evidenciou a necessidade de ajustar folgas para compensar variações na espessura do contraplacado e resíduos de corte.

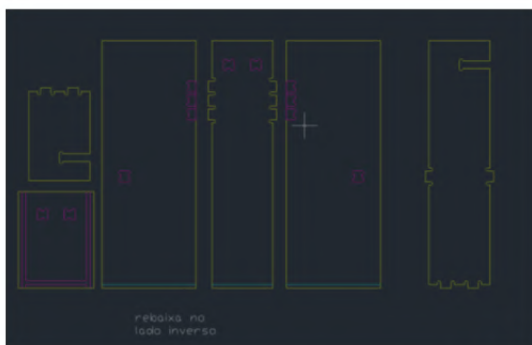


Figura 45 – Primeiro ensaio seccional. DXF com layers para fabrico. Elaboração própria (2025).

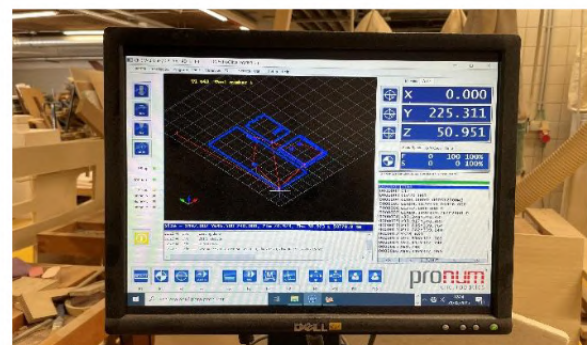


Figura 46 – Primeiro ensaio seccional. Software de controlo da CNC. Elaboração própria (2025).

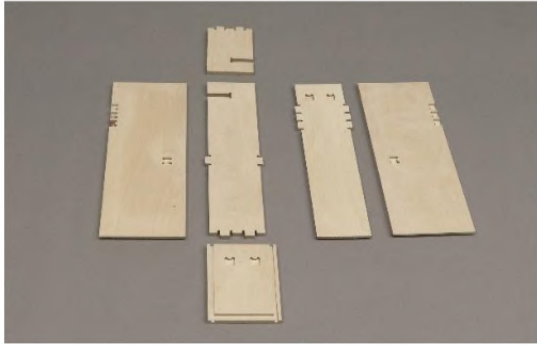


Figura 47 – Primeiro ensaio seccional. Peças produzidas. Elaboração própria (2025).



Figura 48 – Primeiro ensaio seccional. Secção montada. Elaboração própria (2025).

Após a análise à secção prototipada, foi decidido desenvolver e testar dois novos tipos de encaixe: o T-slot e uma variante do encaixe tipo espiga e lingueta, totalmente oculto.

O segundo ensaio focou-se no encaixe T-slot, que demonstrou maior robustez no bloqueio à normal, embora tenha implicado maior complexidade de fabrico. Para além da necessidade de troca de fresa, as limitações do VCarve obrigaram ao desenho manual do toolpath diretamente no DXF.

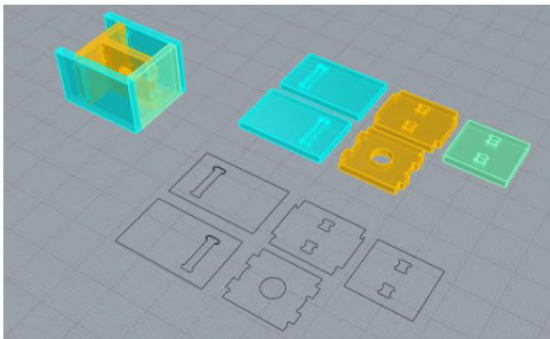


Figura 49 – Segundo ensaio seccional. Modelo 3D e 2D. Elaboração própria (2025).



Figura 50 – Segundo ensaio seccional. Fresagem do encaixe T-slot. Elaboração própria (2025).

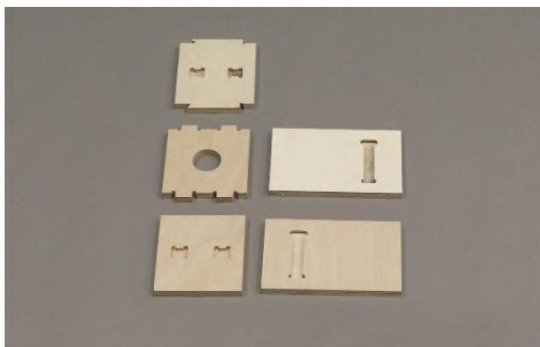


Figura 51 – Segundo ensaio seccional. Peças produzidas. Elaboração própria (2025).



Figura 52 – Segundo ensaio seccional. Secção montada. Elaboração própria (2025).

O terceiro ensaio consistiu na aplicação de uma variante dos encaixes tipo espiga e furo nas laterais das peças P1 e P2, permitindo ocultação total das uniões externas. Apesar de gerar superfícies mais limpas, esta opção revelou maior complexidade técnica e incompatibilidade com o sistema T-slot durante a montagem, o que levou à decisão de manter os encaixes laterais visíveis na versão final.

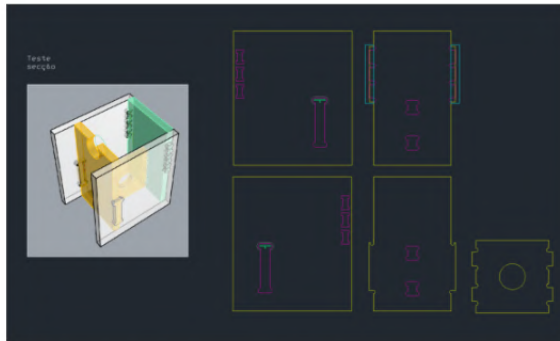


Figura 53 – Terceiro ensaio seccional. DXF com layers para fabrico. Elaboração própria (2025).
Elaboração própria (2025).



Figura 54 – Terceiro ensaio seccional. Troca da fresa. Elaboração própria (2025).

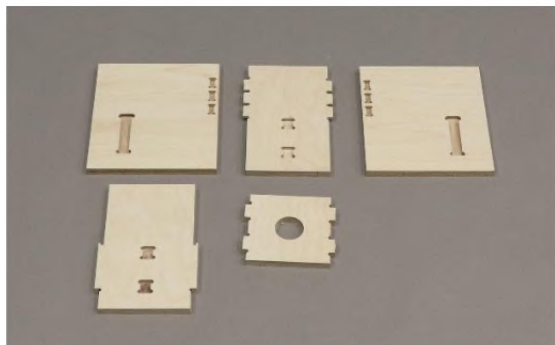


Figura 55 – Terceiro ensaio seccional. Peças produzidas. Elaboração própria (2025).



Figura 56 – Terceiro ensaio seccional. Secção montada. Elaboração própria (2025).

Os testes realizados foram essenciais para compreender as limitações e o funcionamento dos diferentes tipos de encaixe, bem como a sua compatibilidade quando usados em conjunto. Ficou também evidente que, em máquinas CNC sem troca de ferramenta automatizada, a manipulação das placas e a substituição das fresas deve ser efetuada com extremo cuidado, sob pena de provocar desalinhamentos e comprometer a precisão do corte. Após esta análise, procedeu-se à atualização da modelação 3D dos módulos.

4.7.2 Protótipo do módulo

Foi desenvolvido digitalmente um módulo com dimensões adaptadas à área de trabalho da CNC utilizada (1180 x 1000 mm). Apesar da redução da largura e altura gerais, optou-se por não realizar um escalonamento integral: a profundidade do módulo, a espessura do material (contraplacado de 18 mm) e os encaixes foram mantidos em escala real. Esta decisão permitiu conciliar a limitação do equipamento da ESMAD com a necessidade de validar aspetos críticos do sistema:

- Precisão dos encaixes e tolerâncias, ajustadas após montagem e desmontagem;
- Desmontabilidade integral, assegurada pelas uniões de fricção e pelas cunhas de travamento;
- Robustez e estabilidade local, confirmadas pelo comportamento estrutural do protótipo, mesmo em escala reduzida.

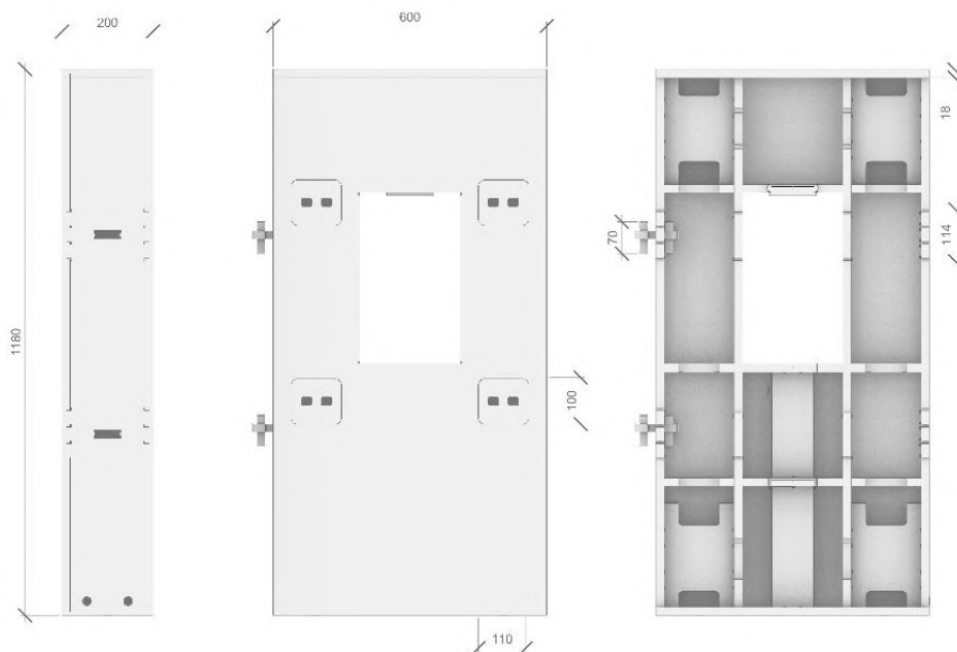
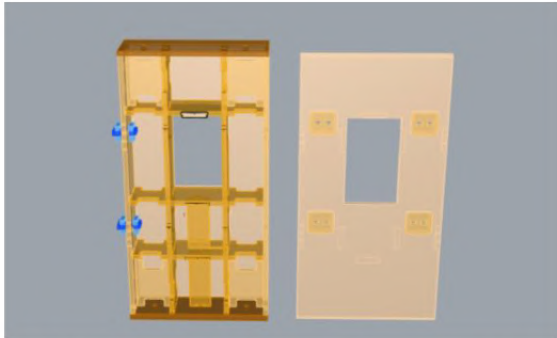


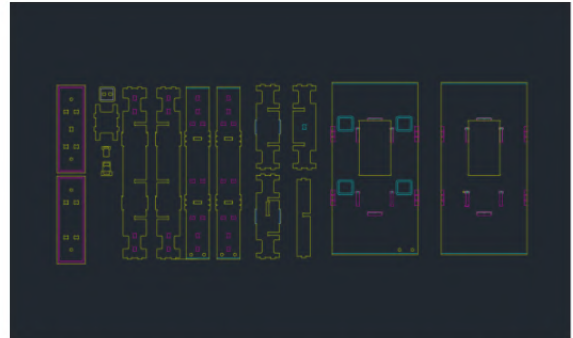
Figura 57 – Módulo prototipado. Dimensões gerais. Elaboração própria (2025).

As figuras seguintes documentam as diferentes fases do processo de desenvolvimento e fabrico: a modelação 3D (Fig. 59), a exportação dos ficheiros DXF (Fig. 60), a criação dos toolpaths no VCarve (Fig. 61), o carregamento do G-Code (Fig. 62), a

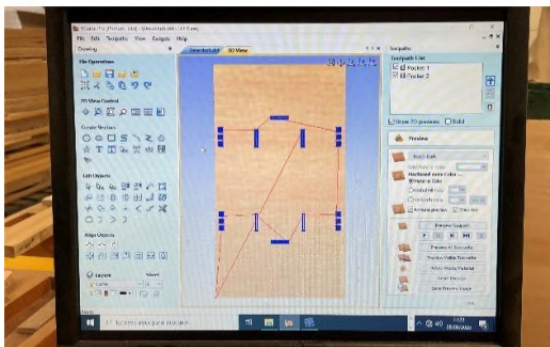
fresagem (Fig. 63), o acabamento manual (Fig. 64) e, por fim, a montagem do módulo (Figs. 65 a 68, ver também o anexo A). Esta sequência ilustra a correspondência entre o modelo digital e a execução prática em oficina, validando a pertinência da estratégia adotada.



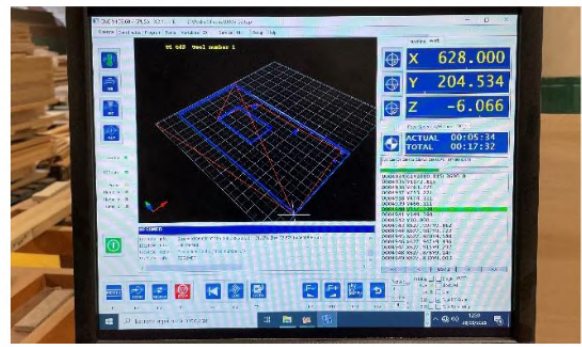
Módulo de teste. Modelação 3D Elaboração própria (2025).



Módulo de Teste. DXF com layers de trabalho. Elaboração própria (2025).



Módulo de Teste. Criação de Toolpath no Vcarve. Elaboração própria (2025).



Módulo de Teste. Controlador da CNC. Elaboração própria (2025).



Módulo de Teste. Fresagem em CNC. Elaboração própria (2025).



Módulo de Teste. Retificação manual das peças. Elaboração própria (2025).

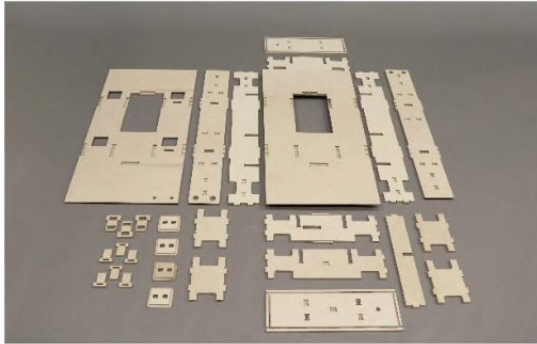


Figura 58 – Módulo de Teste. Peças produzidas. Elaboração própria (2025).

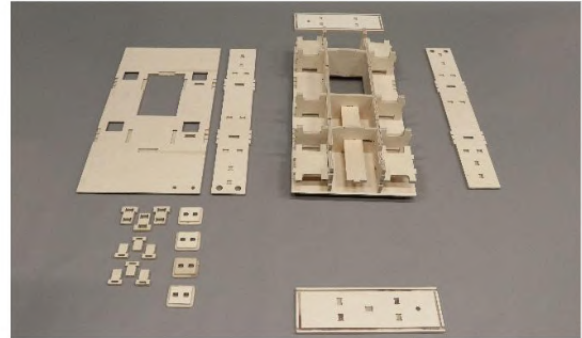


Figura 59 – Módulo de Teste. Estrutura interna montada. Elaboração própria (2025).

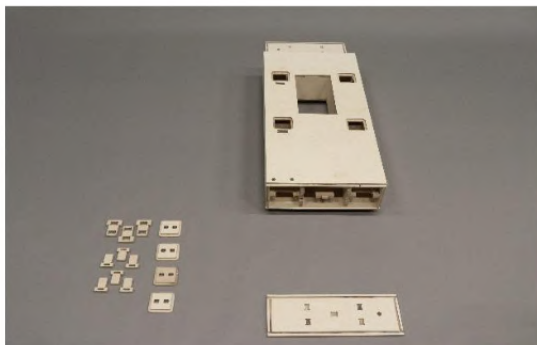


Figura 60 – Módulo de Teste. Montagem das últimas peças. Elaboração própria (2025).



Figura 61 – Módulo de Teste montado. Elaboração própria (2025).

No total, o conjunto integrou dezasseis peças principais, além de tampas, cunhas e travões.

O tempo total de fresagem foi de 245 minutos e o acabamento manual das peças, cerca de 120 minutos.

A montagem, com duração aproximada de dez minutos, revelou-se simples: os encaixes, embora necessitando de retificação para compensar pequenas irregularidades resultantes da espessura variável do contraplacado e da acumulação de detritos de corte, funcionaram como previsto, dispensando ferramentas adicionais. A desmontagem decorreu com igual facilidade, e todas as peças puderam ser reutilizadas sem sinais relevantes de desgaste, confirmando a reversibilidade do sistema.

Os ensaios demonstraram que, mesmo à escala 1:2, o sistema assegura rapidez de montagem, estabilidade dimensional e desmontabilidade integral. Em síntese, a prototipagem realizada na CNC da ESMAD funcionou não apenas como validação técnica, mas também como exercício de aprendizagem. Confirmou que o sistema cumpre os objetivos propostos e destacou aspetos a melhorar em fases posteriores,

nomeadamente a realização de protótipos à escala 1:1 e a avaliação do desempenho estrutural, térmico e acústico em condições reais de utilização.

Durante o processo foram também analisadas questões construtivas que, embora relevantes, não evoluíram para a fase de prototipagem. Entre elas destacam-se a integração de soluções de isolamento térmico e acústico, a impermeabilização e o acabamento das superfícies expostas. Estes aspetos, fundamentais para garantir conforto e durabilidade em contextos de uso real, permanecem como dimensões a aprofundar em futuros desenvolvimentos do sistema.



Figura 62 – Módulo de Teste montado. Elaboração própria (2025).

5 ALGORITMO PARAMÉTRICO: CONFIGURAÇÃO E PERSONALIZAÇÃO

O desenvolvimento do algoritmo paramétrico constituiu uma etapa relevante desta investigação, ao articular de forma direta o processo de conceção digital com a preparação de ficheiros para fabrico físico.

Implementado no ambiente Grasshopper, o configurador foi concebido para transformar um conjunto de regras geométricas e construtivas em resultados acessíveis a utilizadores sem conhecimentos técnicos avançados, assegurando uma lógica sequencial simples de utilização.

O seu objetivo principal é disponibilizar uma ferramenta capaz de: (1) gerar automaticamente a distribuição tridimensional dos módulos num espaço previamente definido; (2) permitir a seleção tipológica de cada módulo através de menus interativos; e (3) produzir relatórios quantitativos e ficheiros de fabrico diretamente utilizáveis em máquinas CNC. Desta forma, o algoritmo atua como interface entre o modelo paramétrico e a produção distribuída, simplificando a customização do sistema e garantindo a coerência com os princípios do DfMAD.

Este capítulo descreve a estrutura do algoritmo, a lógica de funcionamento e o fluxo de utilização, apresentando igualmente a interface desenvolvida e os diferentes outputs gerados. Serão ainda discutidas as limitações atuais do sistema e perspetivadas as evoluções futuras, nomeadamente a integração de um módulo de nesting automático, a parametrização de tolerâncias e a disponibilização do configurador em plataformas online como o ShapeDiver. A descrição detalhada do algoritmo encontra-se no Anexo B.

5.1 Estrutura do algoritmo e fluxo de utilização

O algoritmo foi concebido no ambiente Grasshopper, estruturado como um conjunto de módulos interligados que traduzem regras geométricas e construtivas em resultados configuráveis. A sua lógica baseia-se na definição de inputs simples, no processamento paramétrico e na produção de outputs diretamente utilizáveis em fabrico digital.

Devido à complexidade visual do algoritmo, optou-se por apresentar fluxogramas simplificados e capturas parciais, que evidenciam a lógica de funcionamento sem comprometer a legibilidade.

O fluxo de utilização organiza-se em cinco etapas principais.

- **Definição da área de implantação** – o utilizador introduz as dimensões do espaço disponível;
- **Distribuição inicial dos módulos** – é gerada automaticamente a malha tridimensional com os módulos A distribuídos e numerados;
- **Seleção tipológica módulo a módulo** – para cada módulo identificado, é disponibilizado um menu que permite escolher, preenchendo a letra correspondente, entre as tipologias definidas: fechado, com vão (em diferentes alturas) ou com porta;
- **Visualização tridimensional** – a configuração resultante é apresentada em tempo real, possibilitando verificar a coerência espacial e a articulação entre os módulos;
- **Geração de outputs** – após a confirmação da configuração, o algoritmo compila a informação necessária para fabrico e avaliação (DXF com a biblioteca de peças, ficheiro Excel com quantidades, imagens).

Fluxograma do Algoritmo paramétrico

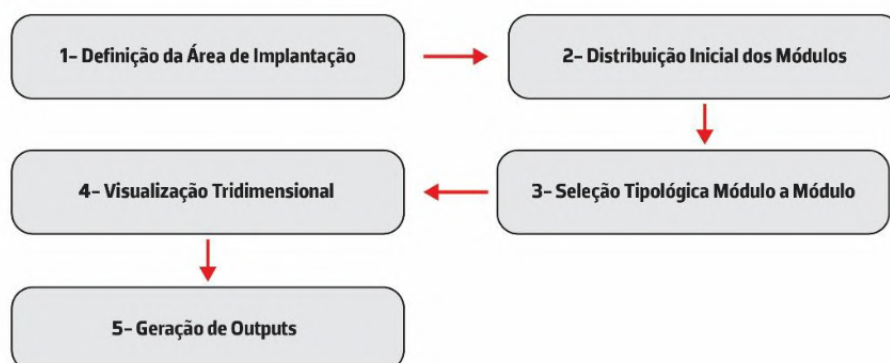


Figura 63 – Fluxograma do algoritmo paramétrico. Elaboração própria (2025)

Este encadeamento sequencial garante a usabilidade e aproxima a lógica paramétrica do utilizador final, traduzindo variáveis complexas em escolhas intuitivas.

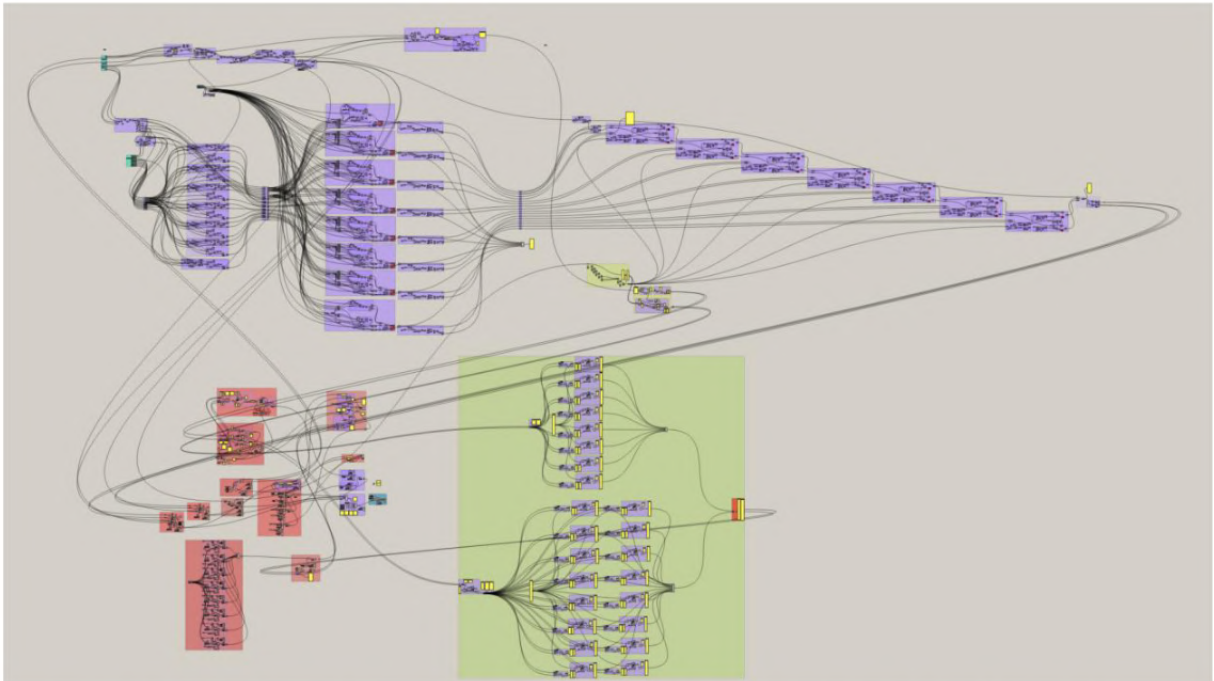


Figura 64 – Algoritmo paramétrico desenvolvido em Rhino. Elaboração própria (2025)

5.2 Interface e experiência do utilizador

A interface do configurador foi desenvolvida de forma a privilegiar a simplicidade de interação. Cada módulo é identificado numericamente e associado a um menu de seleção tipológica. A alteração de qualquer parâmetro atualiza automaticamente a visualização tridimensional, assegurando transparência no processo de decisão.

Os menus foram organizados de modo evitar redundâncias e a manter consistência entre opções. Esta lógica incremental permite que o utilizador compreenda facilmente o impacto de cada escolha, reforçando o carácter pedagógico da ferramenta e a sua aplicabilidade em contextos de autoconstrução ou ensino. A descrição detalhada da interface encontra-se no ponto B.3 do Anexo B.

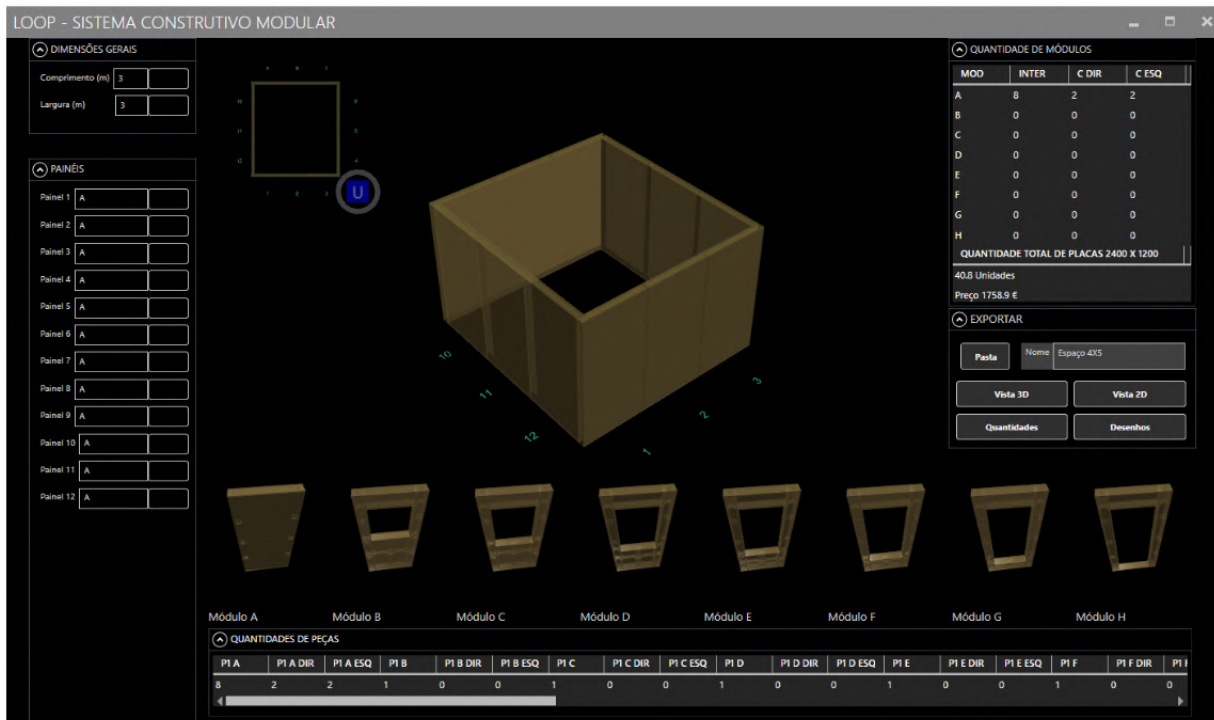


Figura 65– Interface do configurador do sistema construtivo. Elaboração própria (2025)

5.3 Relatórios automáticos e outputs gerados

Após a configuração completa, o algoritmo disponibiliza um conjunto de resultados que consolidam o fluxo file-to-factory (ver o ponto B.4 do Anexo B):

- **Imagem 3D** – representação da configuração final dos módulos;
- **Ficheiro DXF** – exporta a biblioteca de peças do sistema em dxf, com a separação por *layers* de operação: corte total, rebaiços a 9 mm e fresagem T-slot;
- **Tabela Excel** – relatório quantitativo com:
 - número de módulos por tipologia;
 - número e tipo de peças;
 - quantidade de placas de contraplacado necessárias;
 - custo total, calculado a partir do preço introduzido no algoritmo.

Este conjunto de outputs garante a passagem direta da concepção digital para a produção em CNC, reduzindo erros de transposição e assegurando consistência entre projeto e fabrico.

5.4 Limitações atuais e perspectivas futuras

Esta secção foca exclusivamente o configurador paramétrico em Grasshopper.

Assinalam-se as limitações atuais e as perspectivas de evolução futura:

- **Ausência de nesting automático** – a disposição das peças nas placas standard não é ainda gerida pelo algoritmo, sendo realizada manualmente. A integração de um módulo de nesting permitirá otimizar o aproveitamento do material e reduzir desperdícios.
- **Tolerâncias não parametrizadas** – a versão atual não ajusta automaticamente as folgas de encaixe em função das variações de espessura do contraplacado. A possibilidade de introduzir tolerâncias adaptativas reforçará a robustez do sistema em diferentes contextos de produção.
- **Acessibilidade limitada ao ambiente Grasshopper** – a utilização exige software especializado, o que restringe o acesso a utilizadores não técnicos. A disponibilização online, através de plataformas como o ShapeDiver, constitui uma perspectiva de disseminação futura.

Estas evoluções representam a continuidade natural do trabalho, reforçando a lógica incremental e aberta que caracteriza o projeto.

6 DISCUSSÃO E AVALIAÇÃO CRÍTICA

A discussão tem por base os ensaios de prototipagem apresentados no Capítulo 4 e a experiência de utilização do configurador paramétrico descrito no Capítulo 5, procurando avaliar criticamente o desempenho do sistema em relação aos objetivos definidos.

Este capítulo estrutura-se em três vertentes: a avaliação do protótipo, a identificação de limitações e potenciais de escalabilidade, e os contributos para a sustentabilidade e inovação na construção modular. Este exercício crítico não encerra o tema, mas abre espaço para desenvolvimentos futuros, preparando a síntese final apresentada na Conclusão.

6.1 Avaliação do sistema desenvolvido

A prototipagem permitiu confirmar a viabilidade do sistema modular, mas sobretudo revelou aspetos críticos para a sua consolidação futura. Em termos gerais, os ensaios validaram a correspondência entre o modelo digital e a execução física, o que demonstra a eficácia do fluxo paramétrico file-to-factory. A precisão dos encaixes confirmou que é possível assegurar montagem rápida e desmontagem integral sem comprometer a integridade do contraplacado.

O protótipo resultante demonstrou também a viabilidade técnica do sistema em termos de desmontagem integral sem perdas significativas e reutilização total das peças. O configurador paramétrico acrescentou valor ao processo ao permitir a personalização tipológica dos módulos, o cálculo automático de materiais e a geração de ficheiros CNC, confirmando o potencial da fabricação digital para democratizar processos de conceção e fabrico.

A comparação com os casos de estudo analisados evidencia tanto convergências como diferenças. Projetos como a WikiHouse, o EDFAB, o Open reWall e o UBuild partilham princípios de modularidade aberta, desmontabilidade e compatibilidade com CNC. Todavia, o sistema aqui desenvolvido distingue-se por quatro aspetos principais:

- Número reduzido de peças, simplificando a produção e a montagem;
- Ausência de elementos metálicos, eliminando dependência de fixadores externos;
- Uso exclusivo de contraplacado, explorando as potencialidades do material em CNC;
- Compatibilidade com CNC de média escala, reforçando a replicabilidade em oficinas locais.

Estes fatores contribuem para que o sistema Loop não se posicione como alternativa industrial em larga escala, mas como um sistema aberto, acessível e evolutivo, com aplicação em contextos de autoconstrução, ensino ou produção distribuída.

Contudo, mais do que comprovar o funcionamento do protótipo, a experiência evidenciou pontos de reflexão. A tolerância de 0,5 mm, definida digitalmente, mostrou-se adequada em grande parte das uniões, mas também expôs a dependência do sistema face à qualidade do material. Variações mínimas na espessura do contraplacado, bem como resíduos do corte, geraram fricções inesperadas em algumas ligações. Este facto não inviabilizou a montagem, mas alerta para a necessidade de calibragem mais fina ou de pós-processamento regular.

Outro aspeto relevante prende-se com a dimensão do módulo. O manuseamento exige sempre duas ou mais pessoas, o que limita parcialmente a autonomia do utilizador. Este dado não diminui a pertinência da proposta, mas sugere a importância de pensar em versões complementares de menor escala ou em mecanismos auxiliares de apoio à montagem.

De notar ainda que a opção por um número reduzido de componentes simplificou a execução, mas pode, em certos casos, restringir possibilidades de adaptação estrutural. A lógica adotada comprovou a robustez da solução, embora abra espaço para investigar variantes mais flexíveis ou híbridas que conciliem estabilidade e maior liberdade de configuração.

Em síntese, a avaliação do protótipo confirma a coerência entre conceção, fabrico e montagem, demonstrando que o sistema responde aos critérios estabelecidos. Todavia, o ensaio também destacou limitações práticas que só a experiência física

poderia revelar. Estas observações constituem não apenas um juízo sobre o desempenho atual, mas sobretudo um ponto de partida para futuras melhorias.

6.2 Limitações e potencial de escalabilidade

Desde a conceção, o sistema foi pensado para produção em CNCs de média dimensão, correntes em carpintarias, operando sobre placas inteiras de 2400 × 1200 mm. Esta opção diferencia o sistema Loop de abordagens baseadas em componentes pequenos e fragmentados, reduz o número de encaixes, diminui a acumulação de tolerâncias, acelera a montagem e simplifica a gestão de inventário e substituição de peças. No contexto da produção distribuída, esta estratégia é compatível com a realidade de muitas oficinas equipadas com CNC, favorecendo a replicabilidade do sistema sem aumentar a complexidade construtiva.

Outro aspeto a considerar é a variabilidade do contraplacado (espessura e densidade), que pode afetar a fricção das uniões. Esta realidade reforça a necessidade de procedimentos de calibração e boas práticas de fabrico/montagem (acabamentos das arestas, limpeza de resíduos de corte, ensaio prévio de folgas).

No plano da escalabilidade, a robustez demonstrada ao nível do módulo não garante, por si só, o desempenho da sua utilização como sistema. Serão necessários ensaios adicionais para avaliar o comportamento estrutural em composições mais complexas e o desempenho térmico e acústico com a integração de materiais de isolamento e soluções de revestimento compatíveis com a lógica de desmontabilidade.

A produção distribuída e a simplicidade de montagem apontam para boa replicação em diferentes contextos. Para tal, tornam-se determinantes guias de montagem claros, procedimentos de controlo de qualidade e rotinas de manutenção que assegurem consistência entre oficinas. A disponibilização digital dos ficheiros (com DXF por layers e tabela de quantidades) contribui para esse objetivo, articulando-se com práticas correntes em carpintarias com CNC.

Em suma, a escalabilidade do sistema depende da conjugação entre robustez construtiva, normalização de componentes/kits e infraestrutura de produção distribuída.

6.3 Contributos para a sustentabilidade e inovação em construção modular

O sistema desenvolvido inscreve-se num quadro mais amplo de práticas construtivas que procuram reduzir o impacto ambiental e aumentar a eficiência dos recursos. A sua principal contribuição reside na combinação entre desmontabilidade integral e fabrico digital acessível. Ao privilegiar encaixes reversíveis, garantiu-se que todas as peças podem ser reutilizadas em diferentes configurações, prolongando o ciclo de vida do material e evitando a geração de resíduos.

A opção por contraplacado certificado FSC e PEFC nesta perspetiva, assegurando a utilização de madeira proveniente de florestas geridas de forma responsável. Associada à otimização do corte e à racionalização do processo, esta escolha contribui para uma redução significativa de desperdício.

Do ponto de vista social e económico, a simplicidade construtiva permite que a montagem seja realizada por utilizadores sem formação técnica avançada, democratizando o acesso a soluções modulares. Esta característica, aliada à possibilidade de produção distribuída em oficinas locais, aponta para modelos de fabrico mais próximos do utilizador, com benefícios em termos de custos, logística e dinamização comunitária.

No domínio da inovação, o desenvolvimento de um algoritmo paramétrico com capacidade de gerar automaticamente a visualização do espaço habitável configurado, ficheiros de fabrico, cálculos de consumo de material e relatórios quantitativos abre caminho a processos mais flexíveis e personalizados. Este fluxo digital-físico aproxima-se das tendências de mass customization, mas aplicado a um contexto de autoconstrução e de pequena escala, o que o torna distinto em relação a abordagens industriais convencionais. Entre os contributos mais relevantes do trabalho destacam-se:

- a simplificação do processo construtivo, que garante montagem intuitiva sem ferramentas especializadas;
- a desmontabilidade integral, alinhada com os princípios da economia circular;
- a integração de parametrização digital, que abre caminho a novas práticas de produção colaborativa e distribuída.

Concluindo, o contributo do sistema não se limita à validação técnica de um protótipo. Ele demonstra que é possível articular princípios de economia circular, design paramétrico e fabricação digital de forma simples, replicável e acessível, ampliando o leque de soluções disponíveis para uma construção modular sustentável.

7 CONCLUSÃO

A investigação confirmou a viabilidade do Loop – Sistema de Construção Modular, concebido em contraplacado de 18 mm, cortado em CNC e montado através de encaixes reversíveis. O processo de desenvolvimento, ancorado nos princípios do Design for Manufacturing, Assembly and Disassembly (DfMAD), demonstrou ser possível articular simplicidade construtiva, desmontabilidade integral e sustentabilidade ambiental em soluções modulares replicáveis.

A prototipagem e os ensaios realizados validaram a precisão dos encaixes, a robustez estrutural do módulo e a possibilidade de reaproveitamento dos componentes, garantindo a coerência entre conceção digital e fabrico físico. O configurador paramétrico em Grasshopper reforçou esta abordagem ao oferecer uma interface sequencial capaz de estruturar o processo de personalização tipológica, cálculo de materiais e geração automática de ficheiros de fabrico, consolidando o fluxo file-to-factory.

O contributo principal do trabalho reside na apresentação de um sistema modular aberto e evolutivo, concebido como proposta complementar às soluções existentes. O sistema Loop procura simplificar processos, reduzir o número de componentes e reforçar a viabilidade da autoconstrução em contextos de produção distribuída e de ensino de fabricação digital. Afirma-se, assim, como alternativa acessível às soluções convencionais, evidenciando que modularidade reversível e fabricação digital podem ser combinadas de forma eficaz em modelos orientados para simplicidade e replicabilidade.

O desenvolvimento de um sistema de encaixes em madeira que elimina a necessidade de fixações metálicas constituiu um contributo relevante, assegurando estabilidade estrutural e coerência formal apenas com componentes de contraplacado. A conceção dos encaixes, dimensionadas especificamente para 18 mm de espessura, demonstrou que robustez e desmontabilidade podem ser alcançadas sem recurso a elementos externos, explorando plenamente o potencial do material num equilíbrio entre design e engenharia.

Foi igualmente alcançado o objetivo de criar um sistema simples, constituído por um conjunto reduzido de peças, com elementos intercambiáveis e reconvertíveis. Esta

racionalização não só facilitou a montagem e desmontagem, como também reforçou a versatilidade e a durabilidade do sistema, permitindo a sua adaptação a diferentes configurações e contextos.

Paralelamente, foram identificadas limitações e oportunidades de evolução. Destacam-se a necessidade de ensaios estruturais em configurações mais complexas, a introdução de materiais complementares que reforcem o desempenho térmico e acústico, bem como a integração futura de um módulo de nesting automático e da parametrização das tolerâncias em função das variações de espessura do contraplacado. A disponibilização online do configurador, através de plataformas como o ShapeDiver, constitui igualmente uma perspetiva relevante para ampliar a acessibilidade e a replicabilidade do sistema.

Concluindo, os resultados obtidos demonstram que a conjugação entre modularidade, fabrico digital e design paramétrico constitui uma via promissora para repensar práticas construtivas em madeira. Mais do que uma solução final, o sistema desenvolvido deve ser entendido como um contributo incremental e aberto, capaz de evoluir em resposta a novos desafios da construção e do design sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albright, K., Russell, D., & Bell, S. (2017). *Environmental footprints and eco-design of products and processes: A practical guide*. Springer.

American Institute of Timber Construction (AITC), & Linville, J. D. (2012). *Timber construction manual* (6.^a ed.). Wiley.

ARCCA Digest. (s.d.). Walter Gropius and prefab. ARCCA Digest. <https://arccadigest.org/walter-gropius-and-prefab/> (Acedido em agosto de 2025)

Automated Architecture (AUAR). (s.d.). *Projects and prototypes*. Disponível em <https://automatedarchitecture.io>

Bachman, D. (2017). *Grasshopper: Visual scripting for Rhinoceros 3D*. Industrial Press.

Barbieri, C. (2015). Reclaiming Jean Prouvé piece by piece. *Modern Magazine*, Fall 2015, 62–68.

Battaia, O., Dolgui, A., Heragu, S. S., Meerkov, S. M., & Tiwari, M. K. (2018). Design for manufacturing and assembly/disassembly: Joint design of products and production systems. *International Journal of Production Research*, 56(24), 7181–7189. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1549795>

Beaman, M. L. (2017). Mass customization and design democratization [Comunicação]. *Symposium: Mass Customization and Design Democratization*.

Berthier, S. (2015). Timber in the buildings of Jean Prouvé: An industrial material. *Construction History*, 30(2), 87–102.

Brandão, F. J. da S. (2022). *Open reWall: Survey-to-production workflow for building renovation* (Tese de doutoramento). ISCTE-IUL.

Cerulli, C., Schneider, T., Saxby, D., & Parvin, A. (2010). *User provided housing: A 21st century industrial revolution in housing*. Sheffield School of Architecture.

Chiesse, R. C. (2025). *Autoconstrução evolutiva por processo de design e fabrico digital* (Trabalho de Projeto, Mestrado Integrado em Arquitetura). Universidade do Minho.

Claypool, M. (2020). *Automation, architecture and labour*. The Bartlett School of Architecture, UCL.

Claypool, M., Retsin, G., Jimenez Garcia, M., Jaschke, C., & Saey, K. (2020). Combinatorial design: Designing collaborative models for construction. The Bartlett School of Architecture, UCL.

Coetsee, N. A., & Grobbelaar, S. (2023). WikiHouse: A sustainable alternative to the South African housing problem. ASOCSA 17th Built Environment Conference.

Colabella, L., & Gardiner, A. (2019). Housing prototypes: Timber tectonic culture and the digital age. In Proceedings of ICSA2019 – Structural Architecture (pp. 911–918).

De Carlo, G. (1969). *Architecture's public*. Londres: Academy Editions.

Di Gioia, L., Cattete, V., & Raymundo, G. (2019). Catálogo de encaixes em madeira. Departamento de Arquitetura e Urbanismo, PUC-Rio.

Dunn, N. (2012). *Digital fabrication in architecture*. Laurence King Publishing.

Eberhardt, L. C. M., Birgisdottir, H., & Birkved, M. (2019). Potential of circular economy in sustainable buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 471, 092051.

Ellen MacArthur Foundation. (2019). Circular economy systems diagram. Ellen MacArthur Foundation. <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram> (Acedido em agosto de 2025)

Ellen MacArthur Foundation. (2019). Completing the picture: How the circular economy tackles climate change. Ellen MacArthur Foundation. <https://ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture>

Filson, A., Rohrbacher, G., & Kaziunas France, A. (2017). Design for CNC: Furniture projects and fabrication technique. Maker Media.

Frayling, C. (1993). Research in art and design. Royal College of Art Research Papers, 1(1), 1–5.

Galerie Patrick Seguin. (2014). Casa desmontável 6x6, 1944: Montada na Camarga. <https://www.jeanprouve.com/en/fiche/1944-6> (Acedido em agosto de 2025)

Guldager Jensen, K., & Sommer, J. (2018). Building a circular future (3.^a ed.). GXN Innovation.

Green, S. D. (2022). Modern methods of construction: Reflections on the current research agenda. Buildings & Cities, 3(1), 653–662.

Gropius, W., & Wachsmann, K. (1942). *Building structure* (U.S. Patent No. 2,287,204). U.S. Patent and Trademark Office.

Gros, J., & Sulzer, F. (1997). *50 digital joints* [CD-ROM]. C-Lab, Hochschule für Gestaltung Offenbach. <https://jochen-gros.de/A/C-Lab.html> (Acedido em novembro de 2024)

Gros, J. (s.d.). *50 digital wood joints* [Poster]. Flexible Stream. <https://www.flexiblestream.org/project/50-digital-wood-joints> (Acedido em agosto de 2025)

Hossain, M. U., & Ng, S. T. (2023). Flexible design: An innovative approach for achieving sustainability in modular construction. *Buildings*, 13(2), 174.

Imperiale, A. (2012). An American wartime dream: The Packaged House system of Konrad Wachsmann and Walter Gropius. In *Proceedings of the 2012 ACSA Fall Conference* (pp. 39–44). ACSA.

Isbilen, E. (2022). The unbearable lightness of an open system: The Packaged House 1941–47. *Open Architecture: Tradition, Possibilities and Shortcomings*, 67–84.

Koskinen, I., Zimmerman, J., Binder, T., Redström, J., & Wensveen, S. (2011). *Design research through practice: From the lab, field, and showroom*. Elsevier.

Krohn, C. (2019). *Walter Gropius: Buildings and projects*. Basel: Birkhäuser.

Kunic, A. (2023). *Reconfigurable Wood Architecture* (Tese de Doutorado). University of Southern Denmark, Faculty of Engineering. Disponível em <https://www.create-sdu.com/phd-dissertations/anja-kunic>

Kunic, A., Cognoli, R., & Naboni, R. (2024). RE: Thinking timber architecture: Enhancing design and construction circularity through material digital twin. In M. Ramsgaard Thomsen, M. Tamke, & C. Ratti (Eds.), *Sustainable Development Goals Series: Proceedings of the UIA World Congress of Architects Copenhagen 2023* (pp. 409–422). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36554-6_26

Liu, Y., & Zhao, N. (2023). *AI-assisted design: Generative architectural design*. Tianjin Academy of Fine Arts.

Lobner, P. (2025). *Jean Prouvé and the Demountable House* [PDF]. Retrieved from <https://lynceans.org>

Mercader-Moyano, P., & Porras-Pereira, P. (Eds.). (2023). *Circular economy in emergency housing: Eco-efficient prototype design*. Springer

McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press.

McCulloch, N., Patel, Y., & Potauaine, S. (2021). EDFAB: Design and building of a plywood research house. *CAADRIA 2021: Proceedings of the 26th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia* (pp. 182–189). Hong Kong: CAADRIA.

McMeel, D., Chapman, J., Manfredini, M., Leardini, P., Raftery, G., & Patel, Y. (2017). EDFAB: Is a digital revolution possible for the construction industry? *Building a Better New Zealand Conference* (pp. 1–11). Auckland: University of Auckland.

Norman, D. A. (2013). *The design of everyday things: Revised and expanded edition*. Basic Books.

Ojeda Escoto, P. A., & Zamarripa Muñoz, M. A. (2020). Design for disassembly (DfD) as strategy for redesign and optimization of products. In *Proceedings IRF2020*.

Oliveira, S., Burch, J., Hutchison, K., Adekola, O., Jaradat, S., & Jones, M. (2017). *Making modular stack up: Modern methods of construction in social housing*. Bristol: University of the West of England, CABER.

Ottenhaus, L., Yan, Z., Brandner, R., Leardini, P., Fink, G., & Jockwer, R. (2023). Design for adaptability, disassembly and reuse: A review of reversible timber connection systems. *Construction and Building Materials*, 400, 132823.

Parvin, A. (2013). *Architecture for the people by the people* [TED talk]. https://www.ted.com/talks/alastair_parvin_architecture_for_the_people_by_the_people (Acedido em agosto de 2025)

Parvin, A. (2013). *WikiHouse design proposal* [Imagem]. TED. <https://blog.ted.com/the-diy-house-of-the-future-alastair-parvin-at-ted2013/> (Acedido em agosto de 2025)

Robeller, C., Mayencourt, P., & Weinand, Y. (2014). Snap-fit joints: CNC fabricated, integrated mechanical attachment for structural wood panels. In *ACADIA 2014 Design Agency: Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 189–198). ACADIA.

Sato, H., & Nakahara, Y. (1995). *The complete Japanese joinery*. Hartley and Marks Publishers.

Schouten, J. (2020). Extreem remontabel in Amsterdam-Zuid. *Het Houtblad*, 32 (3).

Schutzer, K., Ordoñez, R., & Chedid, R. (2024). Projetando com encaixes para CNC: Abordagem didática com modelos virtuais. *Actas de Diseño*, 40(1), 104–108.

Smith, R. E. (2010). *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*. Wiley.

Srnicek, N., & Williams, A. (2015). *Inventing the future: Postcapitalism and a world without work*. Verso.

Studio Bark. (s.d.). UBuild system. Londres: StudioBrak. <https://ubuild.org> (Acedido em agosto de 2025)

Studio florisvanderkleij. (s.d.). The Demountable Lantern. <https://florisvanderkleij.nl/projects/the-demountable-lantern/> (Acedido em agosto de 2025)

U-Build. (s.d.). U-Build system. Disponível em <https://u-build.org>

U-Build. (s.d.). The SHED Project, Internal living pods. <https://u-build.org/projects/internal-living-pods/> (Acedido em agosto de 2025)

UNECE & FAO. (2023). *Circularity concepts in wood construction* (Geneva Timber and Forest Study Paper 95). United Nations.

van der Leer, J., & Ploeger, H. (2023). Circular construction practices and design strategies: Towards resource efficiency in the built environment. *Buildings*, 15(21), 174.

THE PLAN. (2021, 7 de maio). *The U.S. pavilion, American framing: Rediscovering wood structures*. https://www.theplan.it/eng/whats_on/the-us-pavilion-american-framing-rediscovering-wood-structures (Acedido em agosto de 2025)

Winterdienst. (2018, 26 de abril). *50 Digital Wood Joints by Jochen Gros*. <https://winterdienst.info/50-digital-wood-joints-by-jochen-gros/> (Acedido em novembro de 2024)

WikiHouse. (2022, dezembro 22). *2022 recap. Substack*. Disponível em <https://wikihouse.substack.com/p/2022-recap> (Acedido em agosto de 2025)

WikiHouse Foundation. (2023). *WikiHouse Skylark system documentation*. <https://wikihouse.cc> (Acedido em agosto de 2025)

World Economic Forum. (2016, 5 de maio). Can the circular economy transform the world's number one consumer of raw materials?

Zárate, W., Figueiredo, B., Brandão, F., Pires, M., & Carneiro, P. (2024). Generative design of modular/industrial architectural system. *Atas do 5º Congresso Português de Building Information Modelling*, 299–310

Zimmerman, J., Forlizzi, J., & Evenson, S. (2007). Research through design as a method for interaction design research in HCI. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 493–502). ACM.

ANEXOS

Anexo A – Prototipagem e testes à escala real

A.1 Resumo Técnico

Objetivo: Validar encaixes, tolerâncias e desmontabilidade do Loop – Sistema de Construção Modular, recorrendo a prototipagem parcial devido a limitações da CNC utilizada.

Metodologia:

- Três testes seccionais à escala 1:1;
- Protótipo de módulo com vão à escala 1:2, utilizando contraplacado de 18 mm e encaixes em tamanho real.

Resultados principais:

- Precisão dos encaixes confirmada após montagem/desmontagem.
- Desmontabilidade integral assegurada sem fixações permanentes.
- Estabilidade local mantida em escala reduzida.
- Montagem em 10 minutos, realizada por duas pessoas, sem ferramentas adicionais.
- Reutilização das peças sem desgaste significativo.

Observações:

Alguns encaixes apresentaram fricção superior ao esperado, devido a variações na espessura do material e à acumulação de poeiras do corte CNC – evidenciando a necessidade de afinação de tolerâncias no algoritmo.

Conclusão:

O protótipo confirmou a robustez, a rapidez de montagem e a reversibilidade do sistema. Relevou, no entanto, melhorias necessárias (ajuste de tolerâncias e pós-processamento). Futuros desenvolvimentos devem incluir prototipagem à escala 1:1 e testes estruturais, térmicos e acústicos

A.2 Fotografias do processo de Montagem

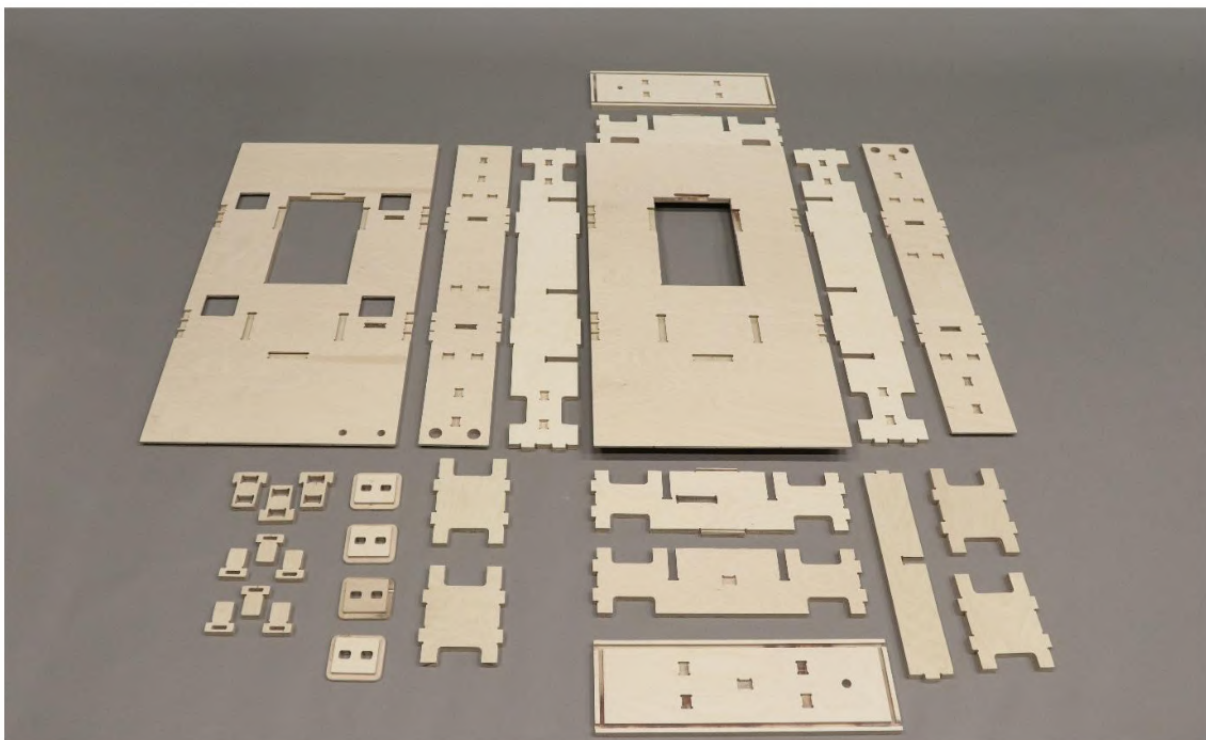


Figura A1 – Montagem do módulo. 1.º passo: colocação da peça P.2 em posição horizontal e ligeiramente elevada. Elaboração própria (2025).

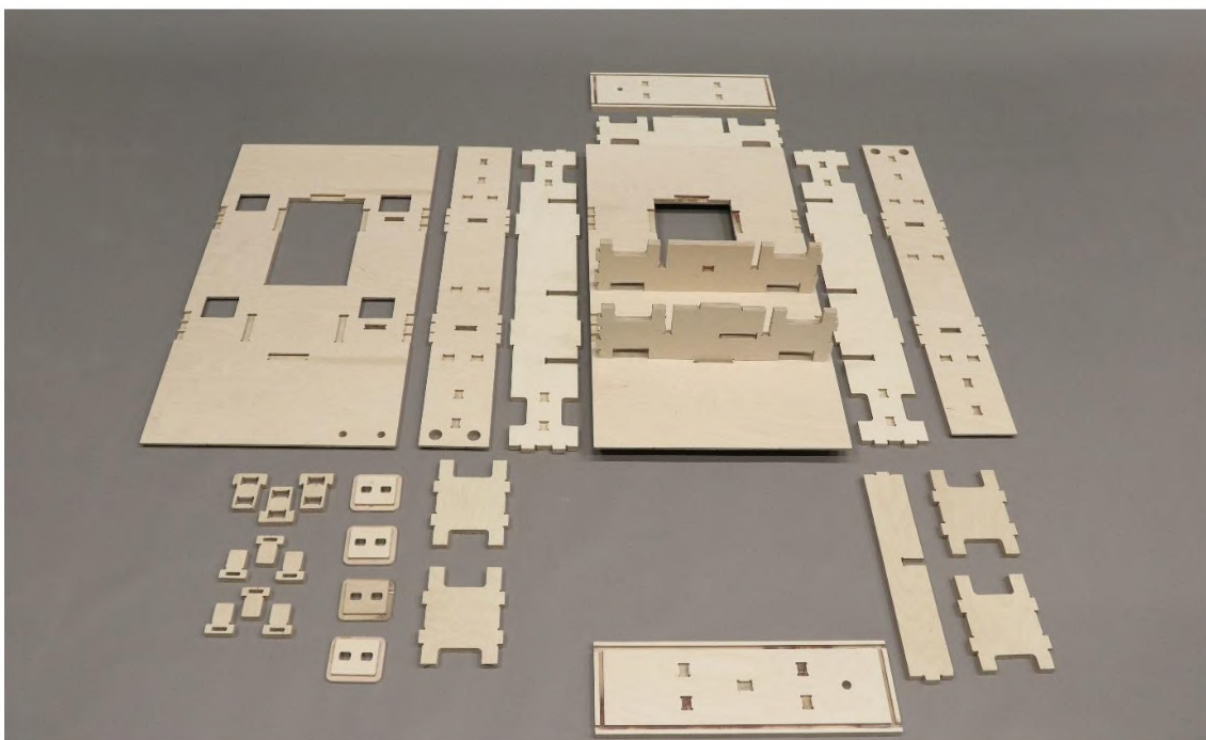


Figura A2 – Montagem do módulo. 2.º passo: encaixe das peças P.10 e P.12 na P.2. Elaboração própria (2025).

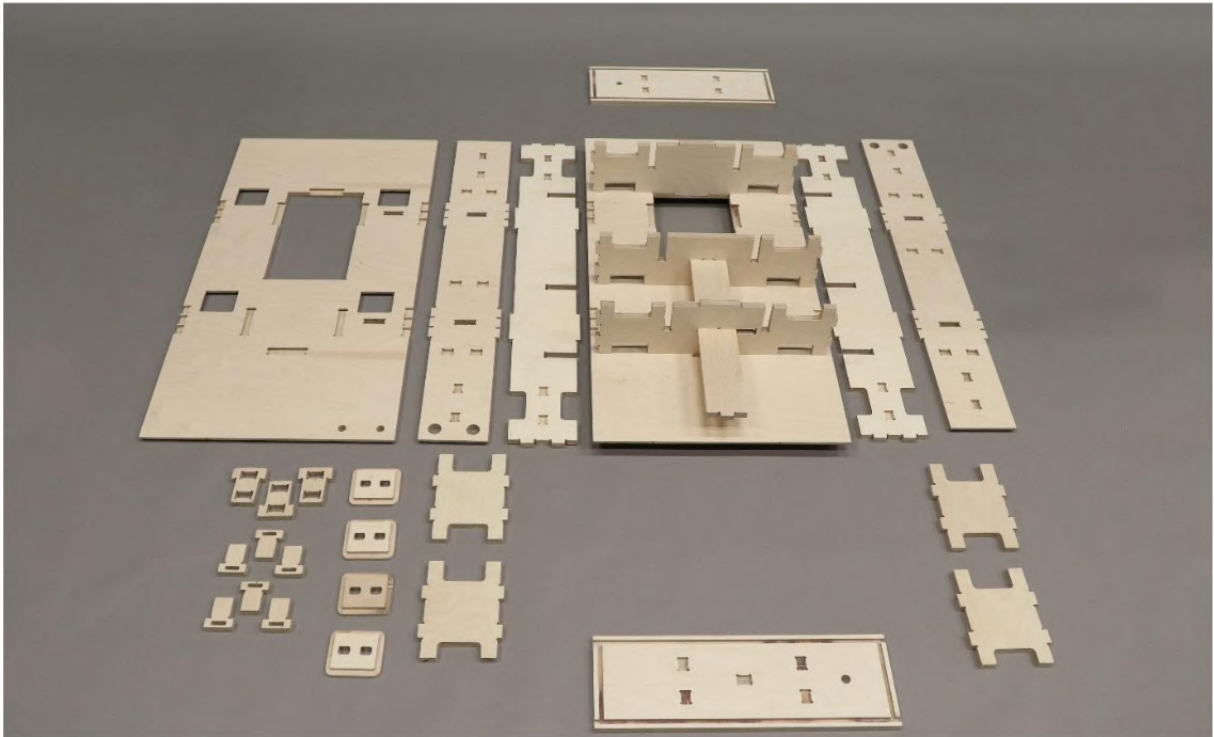


Figura A3 – Montagem do módulo. 3.º passo: fixação do montante vertical central (P.3) e da P.12.
Elaboração própria (2025).

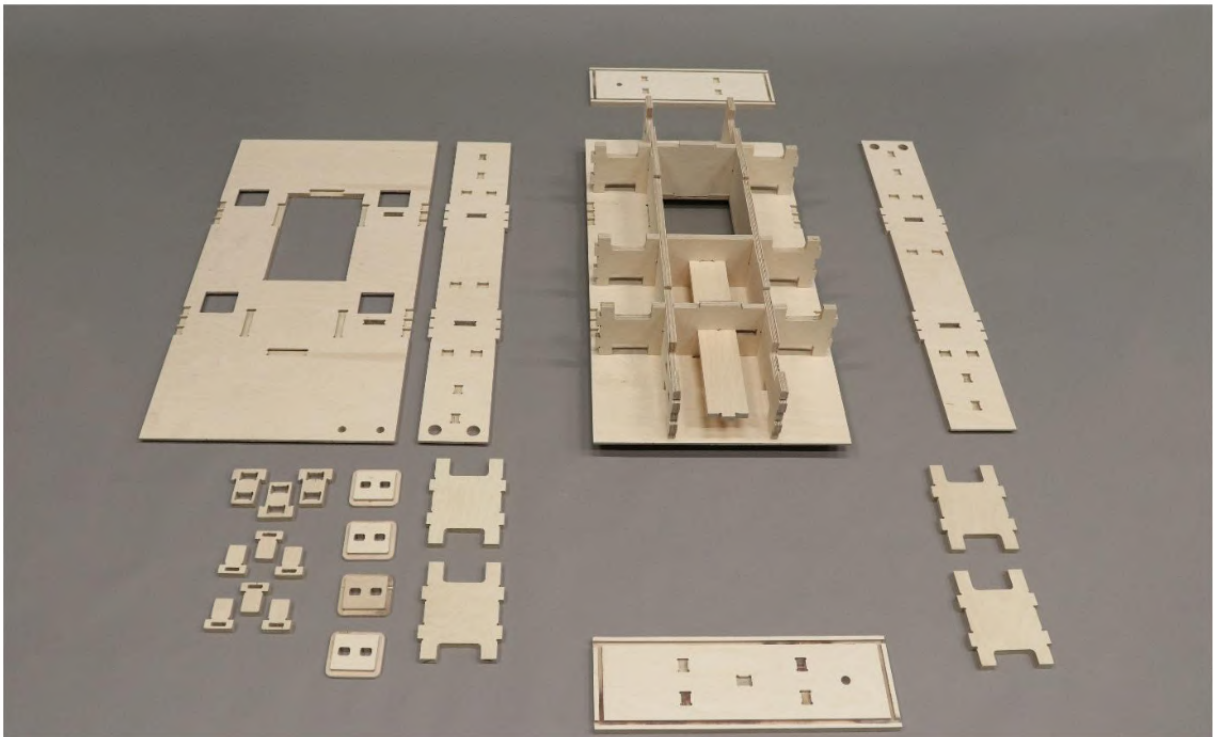


Figura A4 – Montagem do módulo. 4.º passo: colocação dos montantes verticais P.4 e P.5. Elaboração própria (2025).

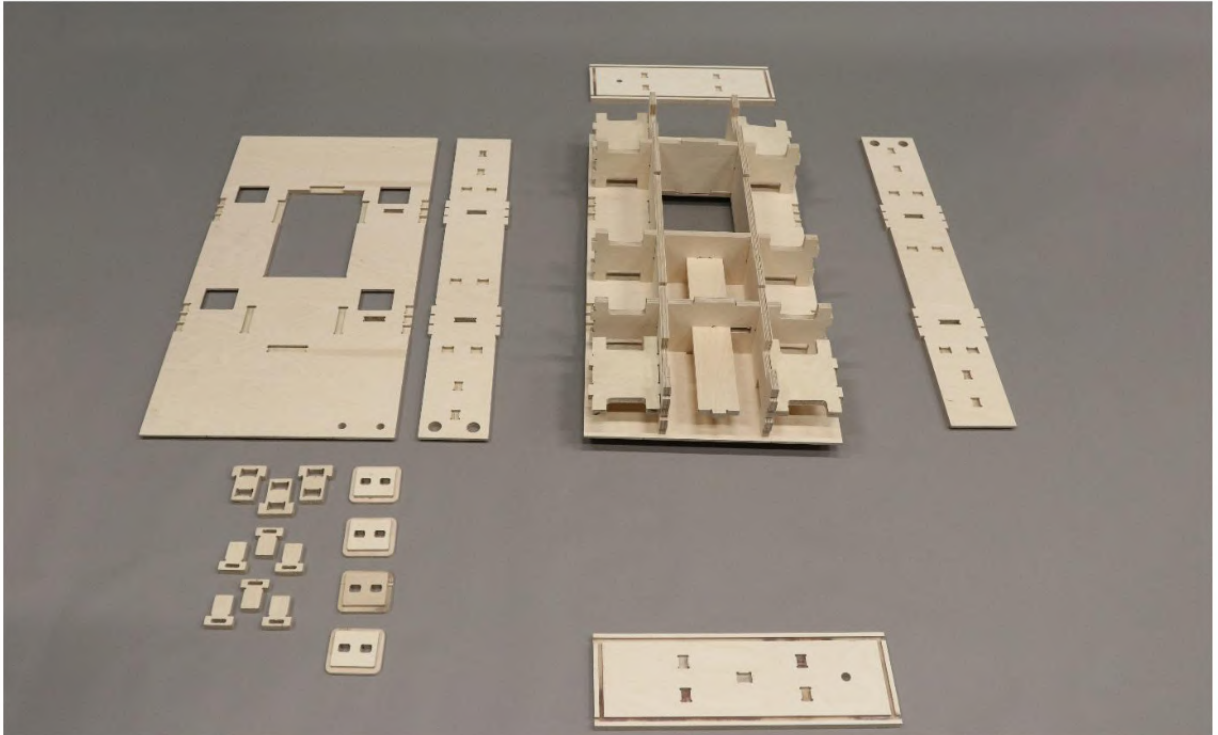


Figura A5 – Montagem do módulo. 5.º passo: inserção das quatro peças de travamento intermédio (P.13). Elaboração própria (2025).

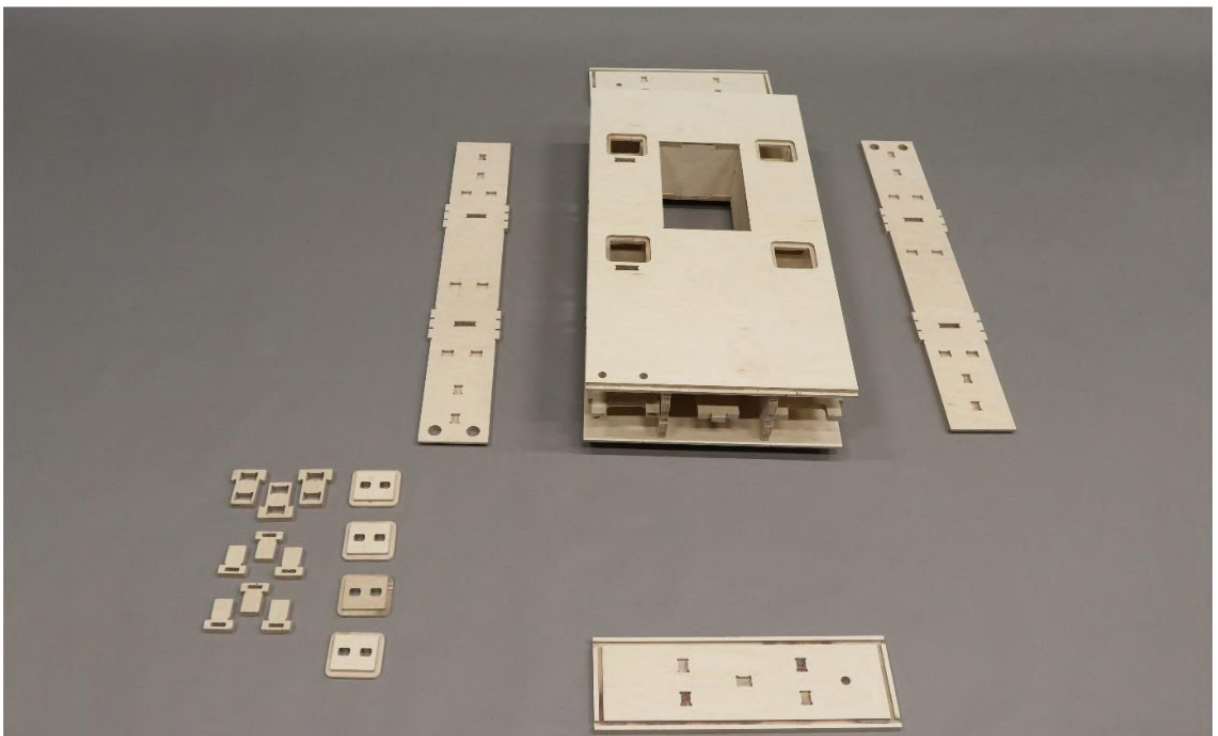


Figura A6 – Montagem do módulo. 6.º passo: montagem da placa frontal P.1. Elaboração própria (2025).

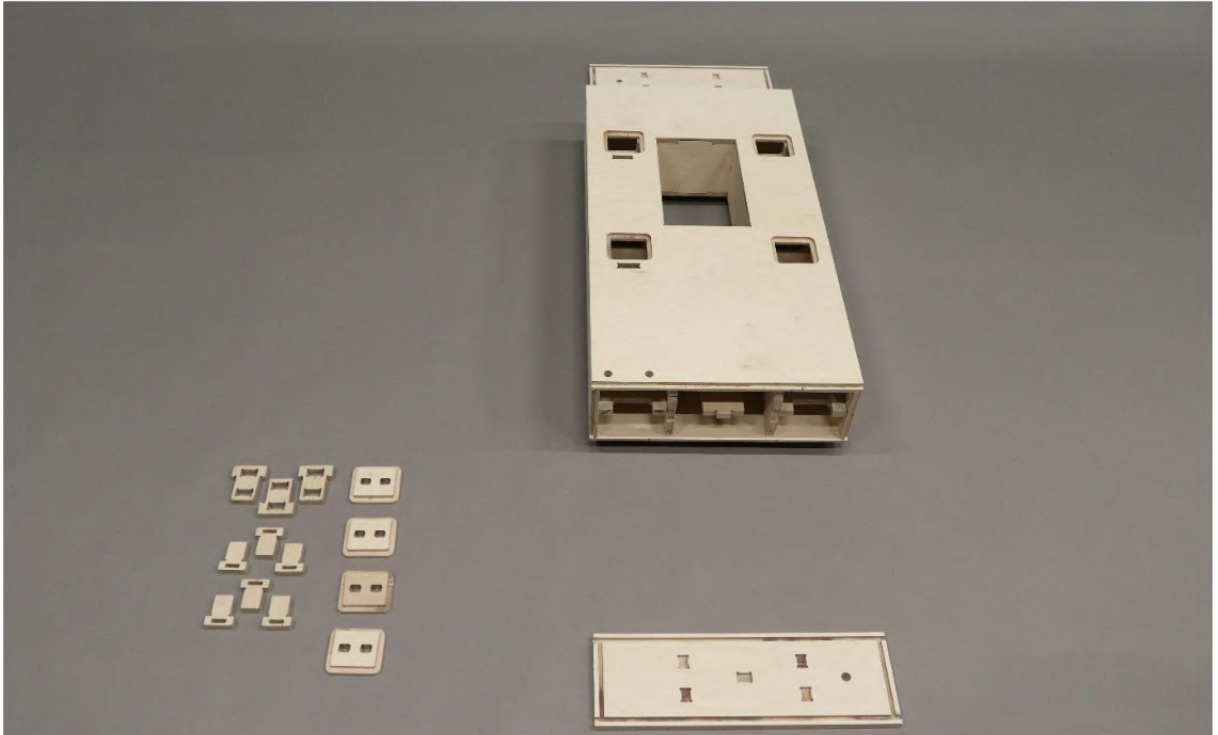


Figura A7 – Montagem do módulo. 7.º passo: adição das placas laterais de fecho. Elaboração própria (2025).

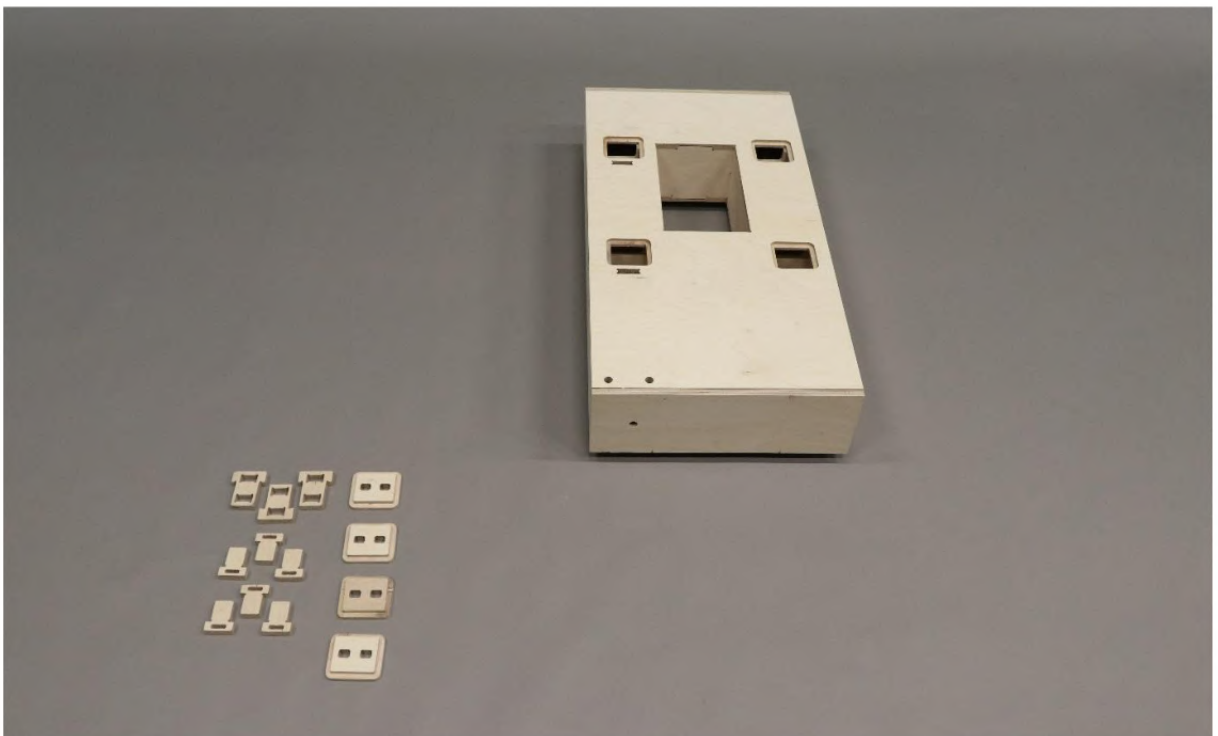


Figura A8 – Montagem do módulo. 8.º passo: colocação da placa superior e da placa inferior de fecho. Elaboração própria (2025).

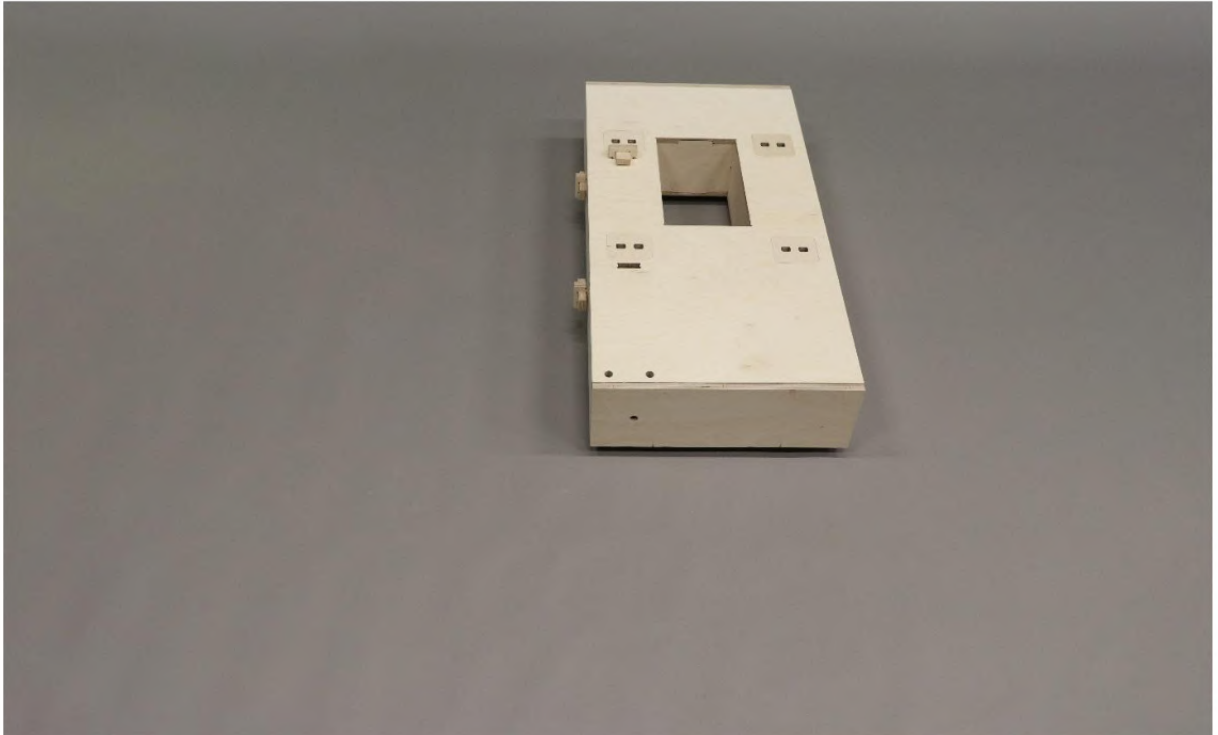


Figura A9 – Montagem do módulo. 9.º passo: finalização do módulo, preparado para ligação a outros através das cunhas de travamento (P.14, P.15 e P.16). Elaboração própria (2025).



Figura A10 – Montagem do módulo. Colocação do módulo na vertical após finalização. Elaboração própria (2025).

A.3 Fotografias do processo de prototipagem



Figura A11 – Oficina de Design Industrial da ESMAD. Máquina CNC Pronum utilizada no processo de fabrico. Elaboração própria (2025).

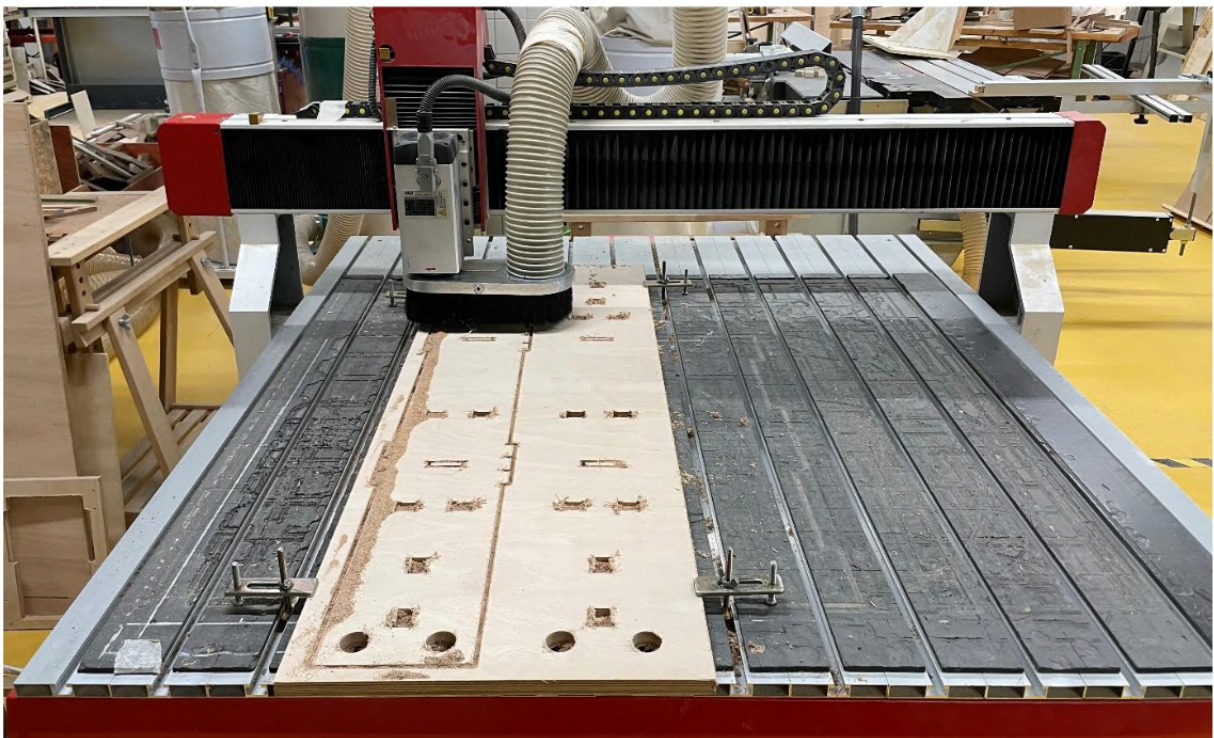


Figura A12 – Prototipagem das peças P.6 e P.7 em contraplacado de 18 mm. Elaboração própria (2025).



Figura A13 – Prototipagem da peça P.1B. Elaboração própria (2025).



Figura A14 – Prototipagem da peça P.12.
Elaboração própria (2025).

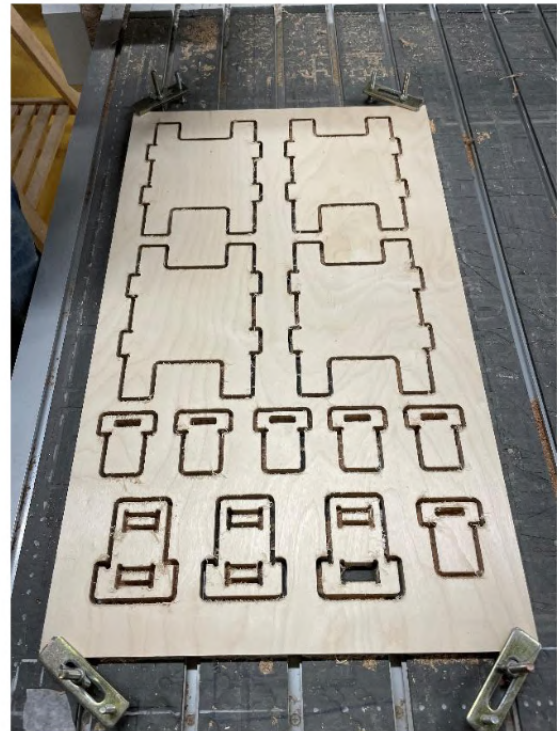
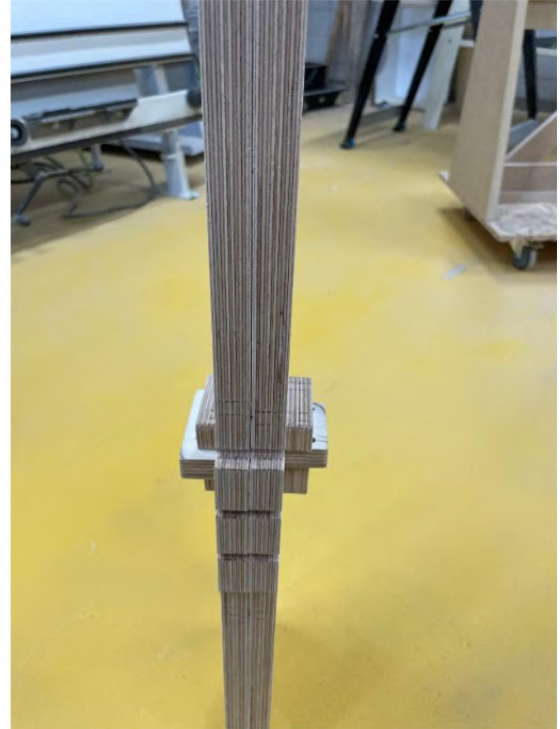
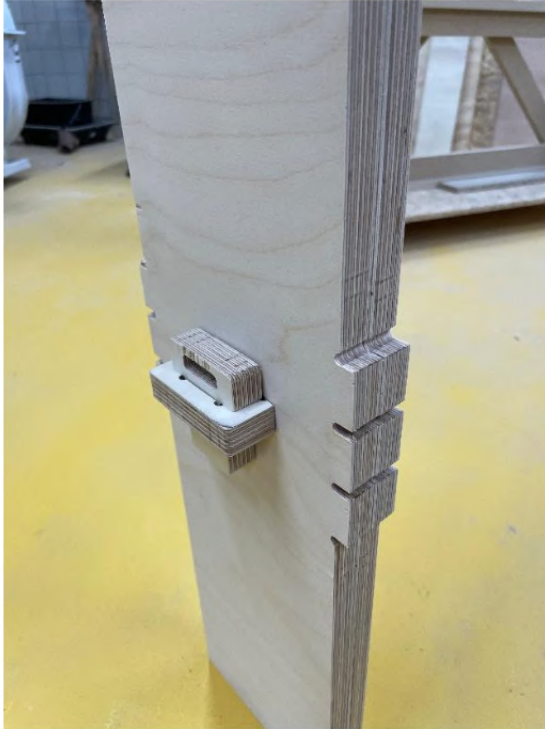
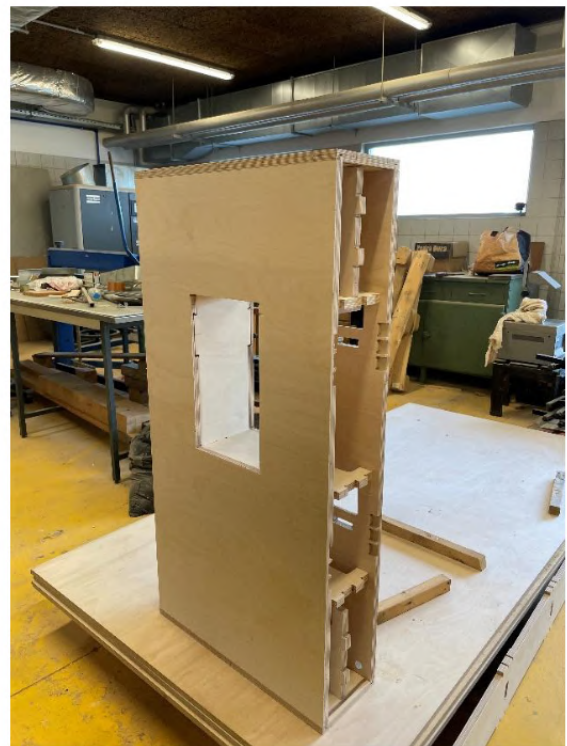
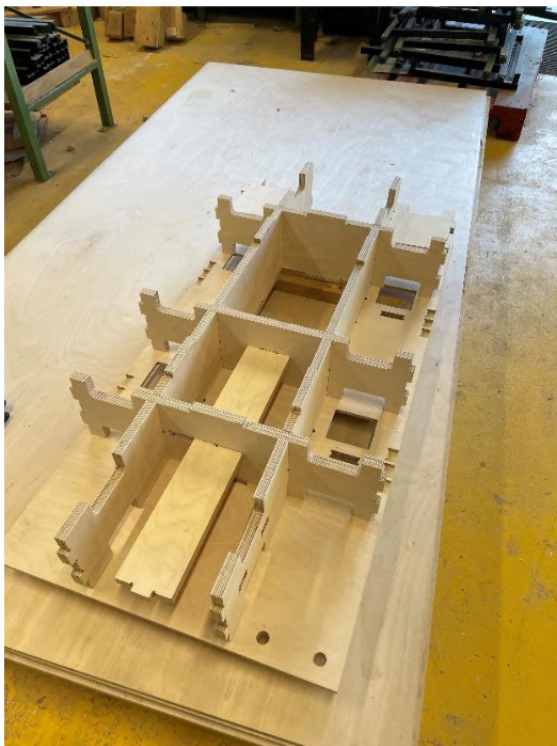


Figura A15 – Prototipagem das peças P.13, P.14 e
P.15. Elaboração própria (2025).



Figuras A16 e A17 – Teste de união de dois módulos utilizando as peças P.14 e P.15. Elaboração própria (2025).



Figuras A18 e A19 – Teste de montagem na oficina, validando sequência construtiva. Elaboração própria (2025).



Figura A20 – Teste de encaixe T-slot. A profundidade do rebaixo revelou-se excessiva, trespassando a placa. Elaboração própria (2025).



Figura A21 – Teste de encaixe T-slot. A profundidade do rebaixo revelou-se excessiva, fragilizando a união. Elaboração própria (2025).

Anexo B – Algoritmo paramétrico (Grasshopper)

B.1 Objetivo e enquadramento

O algoritmo paramétrico foi desenvolvido em **Grasshopper** (ambiente visual de programação do Rhino 3D) com o objetivo de configurar o sistema modular concebido nesta investigação. A ferramenta permite transformar variáveis de projeto, como dimensões do espaço, tipologia de módulos e custos, em outputs de fabrico diretamente utilizáveis em máquinas CNC.

A sua relevância reside no papel de interface file-to-factory, alinhado com os princípios do DfMAD. O configurador simplifica a personalização do sistema, e garante a coerência entre conceção digital e fabrico físico, contribuindo para uma lógica de produção distribuída e acessível a utilizadores não especialistas.

B.2 Estrutura e fluxograma geral

A organização lógica do algoritmo assenta em cinco etapas principais:

Inputs → geração da grelha → configuração tipológica → visualização tridimensional → exportação.

O fluxograma representativo deste processo encontra-se já no Capítulo 5 (Figura 69), pelo que neste anexo não se repete a ilustração. Em vez disso, detalham-se nas secções seguintes os clusters principais, a interface do configurador, e os outputs gerados, complementando a explicação apresentada no corpo da dissertação.

B.3 Clusters Principais

O algoritmo foi estruturado em clusters temáticos, cada um responsável por uma etapa específica do processo paramétrico. Esta organização modular facilita a leitura do código no Grasshopper e permite compreender de forma sequencial a passagem de inputs a outputs.

B.3.1 Inputs & Checks

O primeiro cluster concentra os parâmetros de entrada do sistema: dimensões da área de implantação, altura e largura dos módulos, espessura do material e custo unitário das placas. Inclui ainda controlos básicos de consistência para evitar valores inválidos.

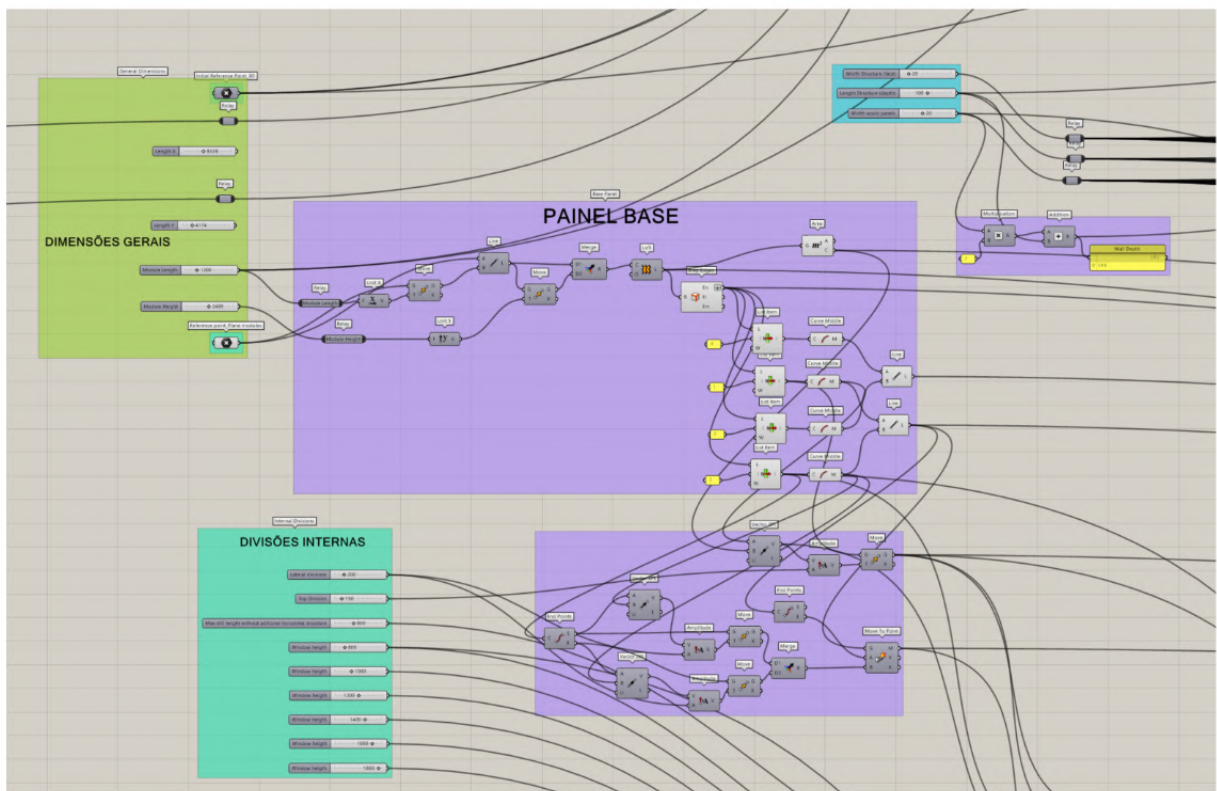


Figura B1 – Cluster “Inputs & Checks”: parâmetros globais e validações iniciais.

Elaboração própria (2025).

B.3.2 Grid & Layout

Este cluster é responsável pela geração da grelha tridimensional que estrutura a disposição inicial dos módulos. Cada posição recebe um identificador único, garantindo a rastreabilidade do processo ao longo de toda a configuração.

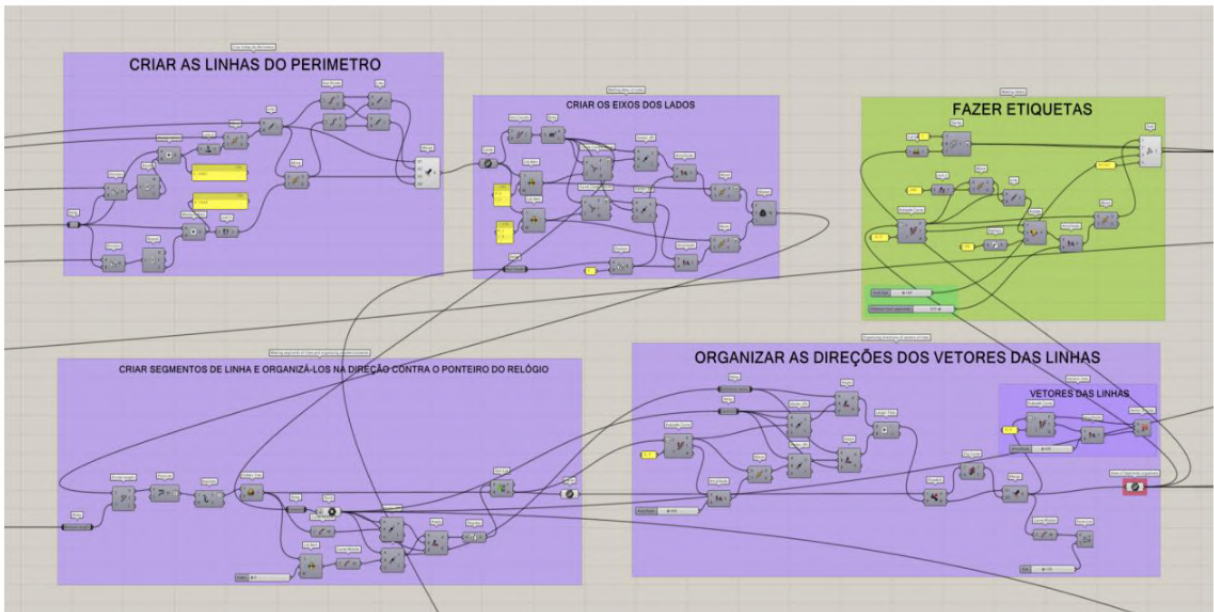


Figura B2 – Cluster “Grid & Layout”: geração da grelha modular com indexação dos módulos.

Elaboração própria (2025).

B.3.3 Typology Mapper

Depois da definição da grelha, cada módulo pode ser editado através de menus interativos (dropdowns) que permitem selecionar tipologias diferentes: módulo fechado, módulo com vão (em várias dimensões) ou módulo com porta. A escolha tipológica atualiza automaticamente a biblioteca de peças associada.

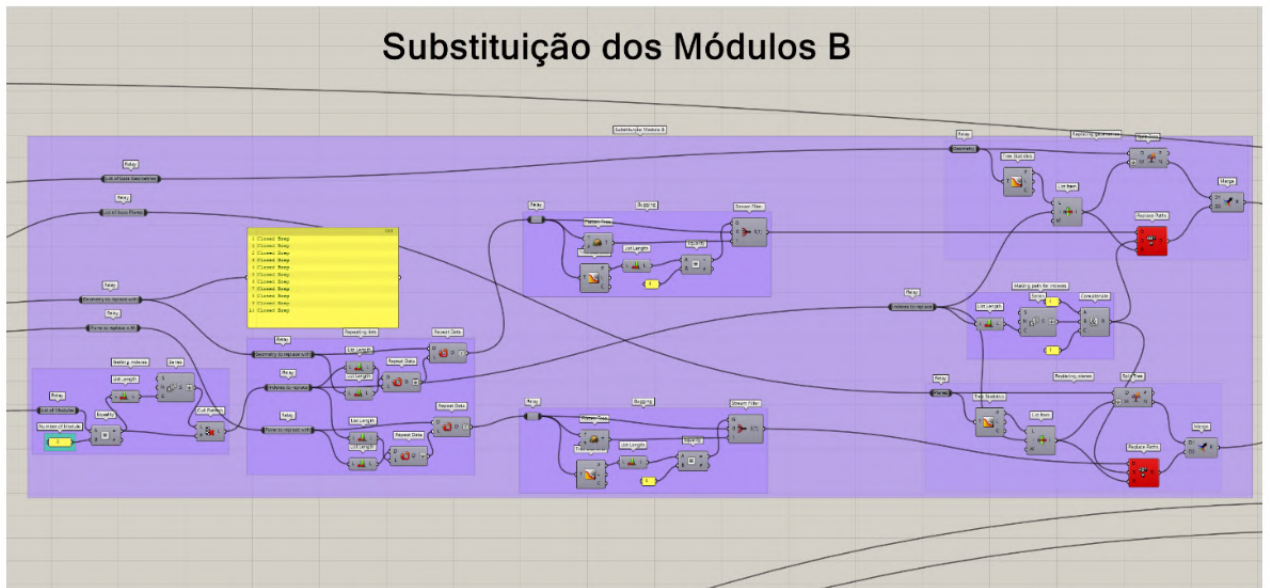


Figura B3 – Cluster “Typology Mapper”: associação entre tipologias e bibliotecas de peças. Elaboração própria (2025).

B.3.4 Preview & Checks

Este cluster assegura a visualização tridimensional em tempo real, permitindo ao utilizador verificar a coerência espacial da configuração e detetar eventuais incompatibilidades geométricas. A pré-visualização inclui elementos de controlo de sobreposição e alinhamento.

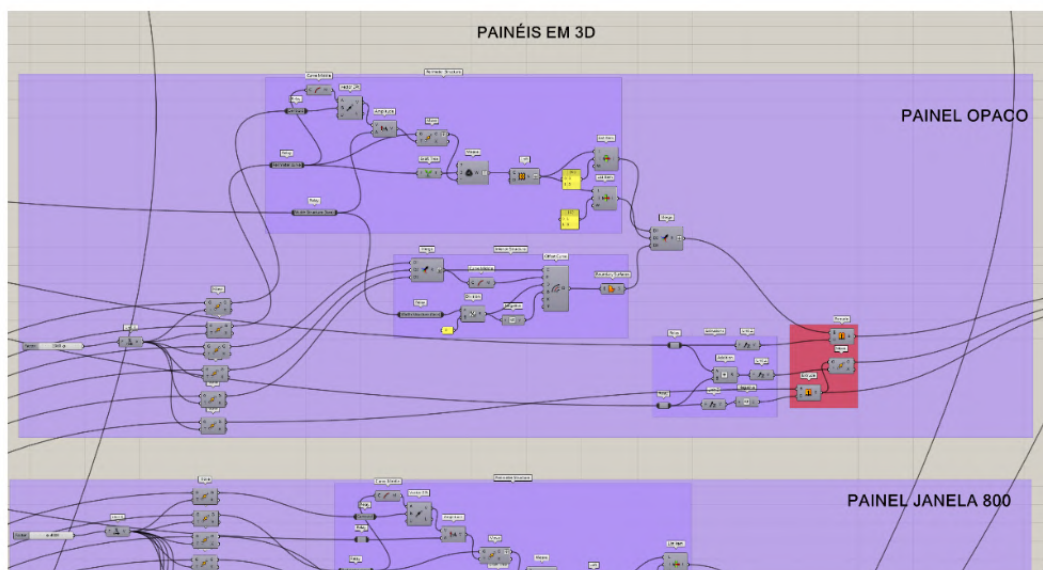


Figura B4 – Cluster “Preview & Checks”: visualização tridimensional e validações espaciais. Elaboração própria (2025).

B.3.5 Export

Por fim, o cluster de exportação organiza a informação necessária à produção. Gera ficheiros DXF com layers diferenciados para operações de CNC (corte total, rebaixos e fresagem T-slot), um ficheiro Excel com as quantidades de módulos, peças e custos, e uma imagem 3D da configuração final.

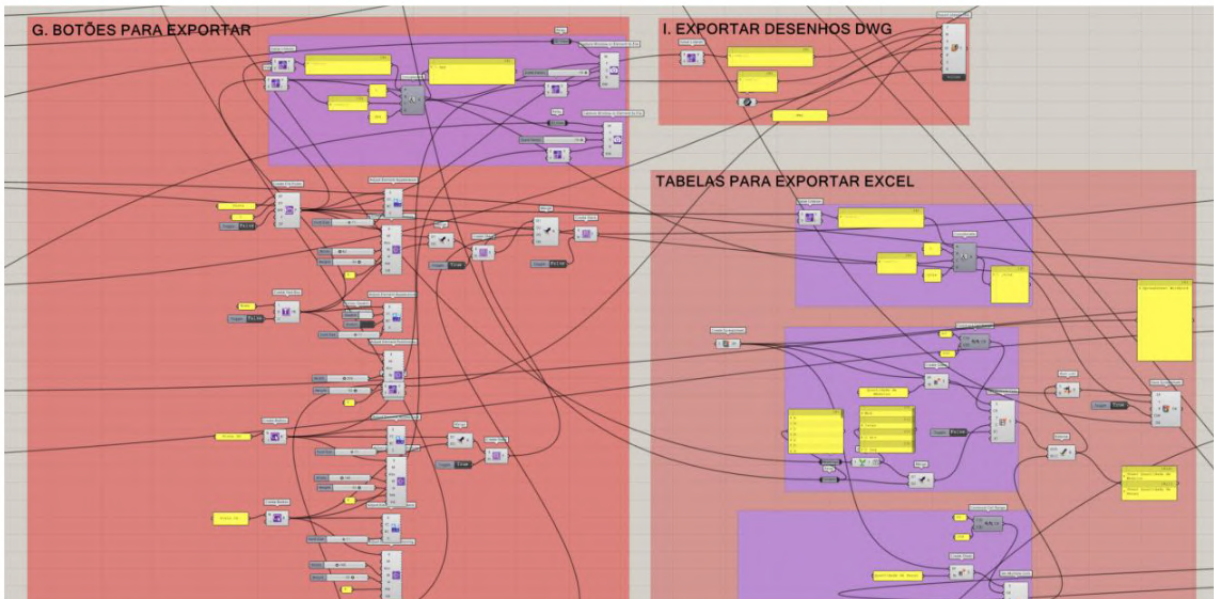


Figura B5 – Cluster “Export”: outputs em DXF, Excel e imagem 3D. Elaboração própria (2025).

B.4 Interface do configurador

A interface desenvolvida em Grasshopper foi desenhada para privilegiar a simplicidade de utilização. Cada módulo é identificado por um número único e associado a um menu de seleção tipológica. Qualquer alteração é imediatamente refletida na visualização 3D e nos relatórios de fabrico.

Esta lógica incremental facilita a compreensão do impacto de cada decisão e aproxima o sistema de contextos de autoconstrução ou ensino, onde a transparência e a facilidade de interação são essenciais.

B.5 Procedimento de utilização:

1. Definir a área de implantação gerar a distribuição de módulos (menu 1).
2. Selecionar tipologias módulo a módulo (menu 2).
3. Validar a configuração através das visualizações (menus 3 e 4).
4. Verificar as quantidades e preço (menus 5).
5. Exportar os outputs : DXF, Excel e imagem 3D (menu6).

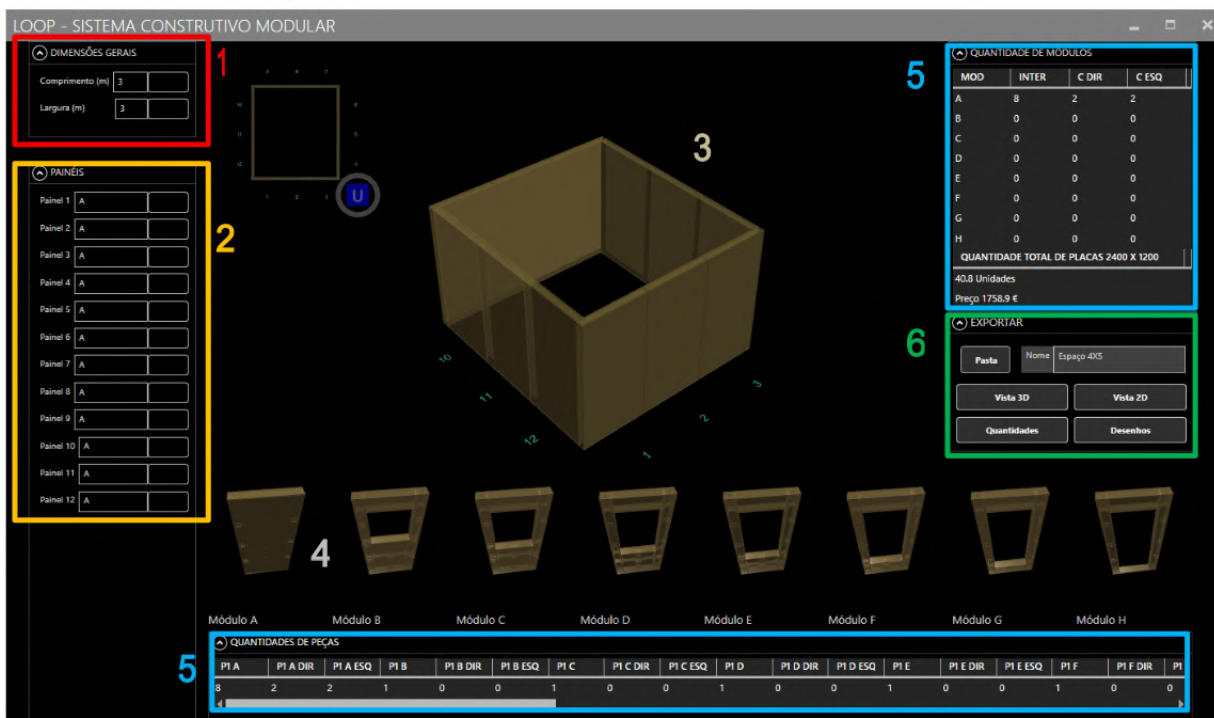


Figura B6 – Interface do configurador: menus de seleção (1 e 2), vista tridimensional (3), catálogo de módulos (4) e painéis de outputs (5), painel de exportação (6). Elaboração própria (2025).

B.6 Outputs gerados

O algoritmo disponibiliza três tipos de outputs automáticos:

- **DXF** – biblioteca de peças organizada por layers de operação CNC (corte total, rebaixo 9 mm e fresagem T-slot).
- **Excel** – relatório quantitativo com número de módulos por tipologia, número de peças, placas necessárias e custo total.
- **Imagem 3D** – snapshot da configuração final, útil para documentação e comunicação de projeto.

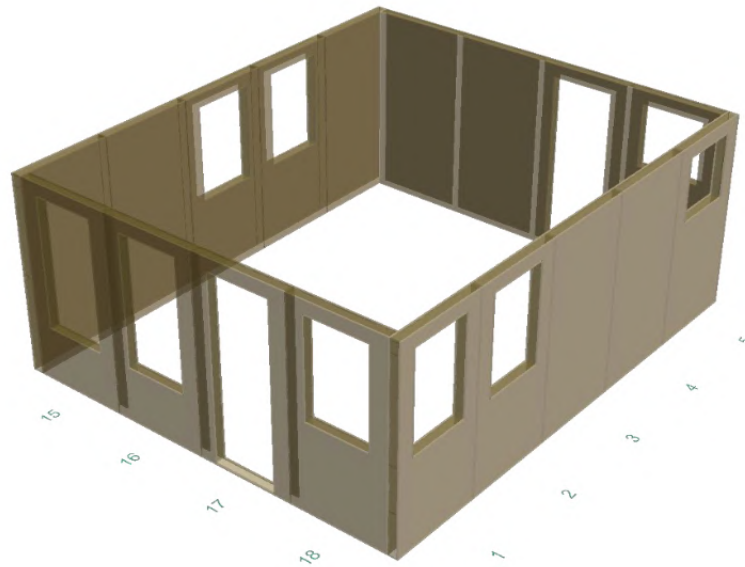


Figura B7– Output gerados automaticamente pelo algoritmo: Imagem 3D gerada pelo configurador e gravada na pasta de projeto. Elaboração própria (2025).

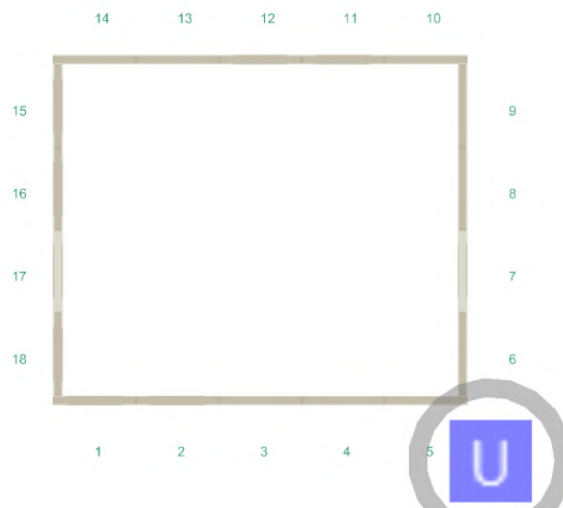


Figura B8– Output gerados automaticamente pelo algoritmo: Imagem 2D gerada pelo configurador e gravada na pasta de projeto. Elaboração própria (2025).

B.7 Limitações conhecidas e roadmap

O protótipo atual apresenta algumas limitações: ausência de nesting automático, tolerâncias de encaixe não parametrizadas e dependência do ambiente Grasshopper/Rhino.

Como perspectivas de evolução, destaca-se a integração de um módulo de nesting automático, a parametrização adaptativa de tolerâncias e a disponibilização online através de plataformas como o ShapeDiver, ampliando o acesso a utilizadores não técnicos.

B.8 Reprodutibilidade

- **Requisitos:** Rhino 8, Grasshopper
- **Passos:** abrir o ficheiro Sistema Loop.3dm, carregar Sistema Loop_30.08.2025.gh, definir parâmetros, seleccionar tipologias e correr os exportadores.

Anexo C – Projeto Corkuka

C.1 Objetivo e contexto

O projeto Corkuka – kids chair foi desenvolvido no âmbito do Curso em Fabricação Robótica em Design, Arquitetura e Construção (EAAD – Universidade do Minho, março 2025). Este exercício teve como objetivo explorar metodologias de fabrico digital em CNC e testar a aplicação dos princípios do DfMAD.



Figura C1 – Render da cadeira Corkuka com as três bases desenvolvidas. Elaboração própria (2025).

C.2 Conceção e princípios de projeto

A Corkuka é uma cadeira infantil produzida em blocos de aglomerado de cortiça (960 × 650 × 150 mm), fresados em CNC. A conceção seguiu os princípios do DfMAD, resultando numa peça composta apenas por três componentes encaixáveis, sem necessidade de colas ou fixações metálicas.

Esta opção simplificou a montagem, facilitou o transporte e permitiu a reciclagem integral do material. O exercício enquadrou-se como ensaio metodológico, funcionando como exploração prévia de conceitos de parametrização, desmontabilidade

e sustentabilidade, mais tarde aplicados ao sistema modular Loop desenvolvido nesta dissertação.

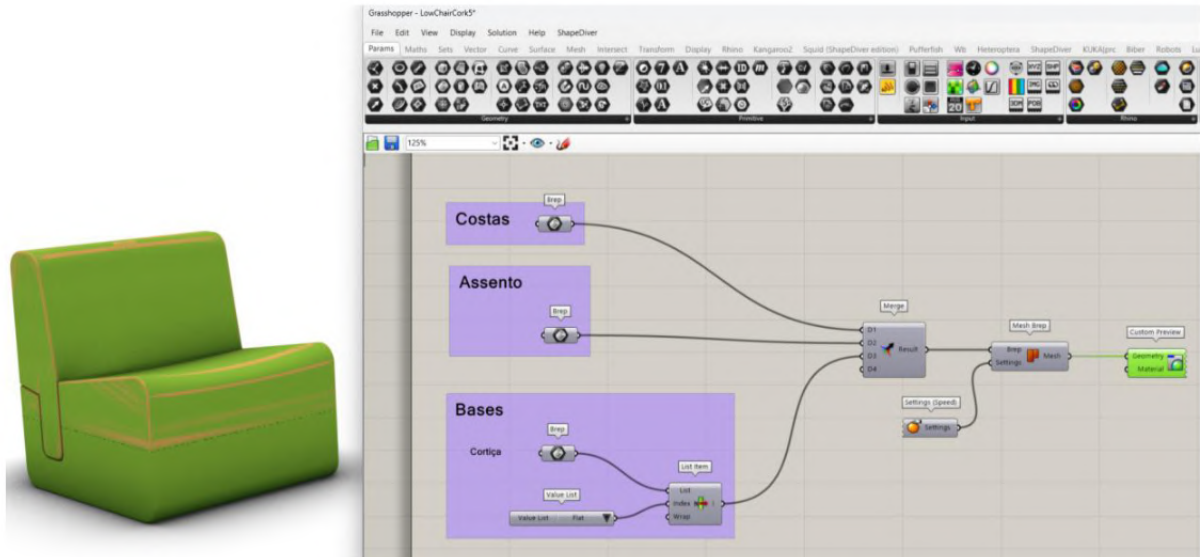


Figura C2 - Algoritmo de seleção da base desenvolvido em Grasshopper. Elaboração própria (2025).

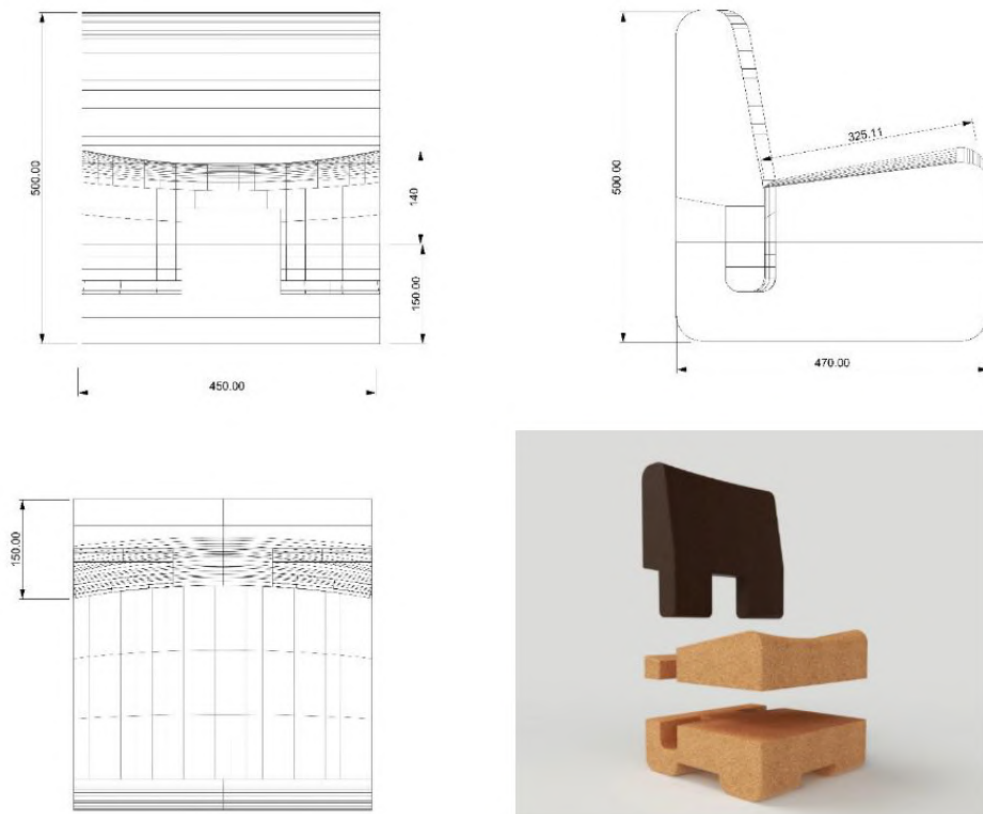


Figura C3 - Desenhos técnicos e vista explodida da cadeira Corkuka. Elaboração própria (2025).

C.3 Fluxo digital de fabrico

O processo de fabrico digital seguiu uma lógica sequencial:

- **Exploração digital:** modelação paramétrica no Rhino e no Grasshopper.
- **Preparação de fabrico:** nesting e exportação de ficheiros no Fusion 360.
- **Programação:** criação de toolpaths em Fusion 360 e simulação em KUKA|prc, com geração de G-code para fresagem CNC.

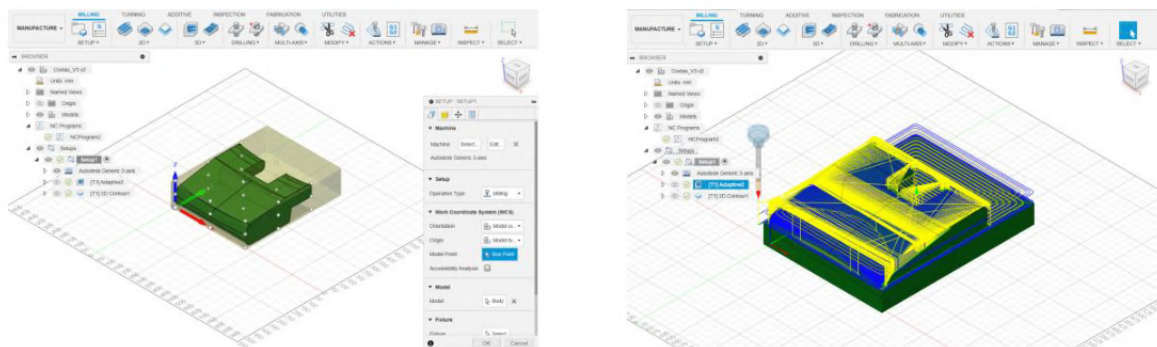


Figura C4 - Exemplo de criação do G-Code no Fusion 360 (frente do encosto). Elaboração própria (2025).

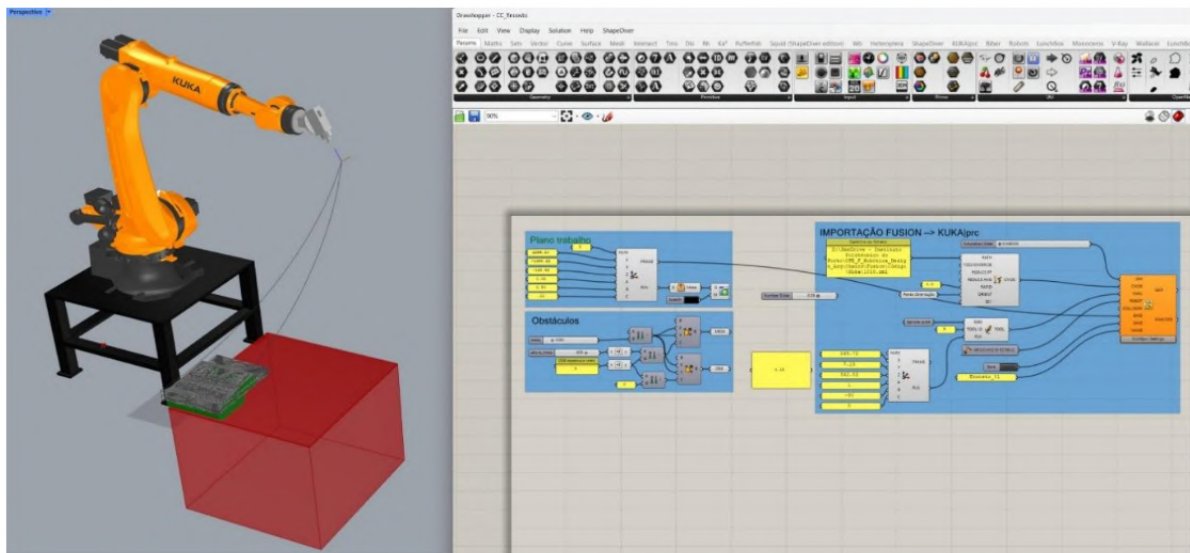


Figura C5 - Configuração do plano de trabalho, obstáculos e do Kuka|prc. Elaboração própria (2025).

C.4 Produção e montagem

A produção envolveu a fresagem CNC em ambas as faces dos blocos de cortiça, seguida de montagem manual e acabamentos.



Figura C6 - Fresagem da face superior da base. Elaboração própria (2025).



Figura C7 - Fresagem da face inferior da base. Elaboração própria (2025).



Figura C8 - Fresagem do assento. Elaboração própria (2025).



Figura C9 - Fresagem do encosto. Elaboração própria (2025).



Figura C10- Cadeira Corkuka com erros de alinhamento a corrigir manualmente. Elaboração própria (2025).

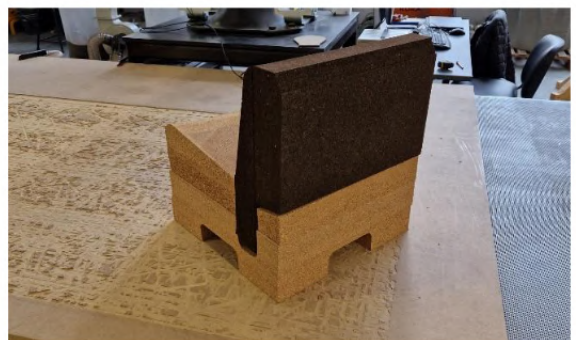


Figura C11 - Cadeira Corkuka. O acabamento manual completará os fillets que não foram possíveis de fresar. Elaboração própria (2025).

C.5 Resultados, limitações e contributos

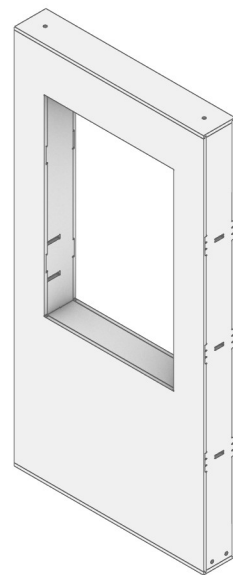
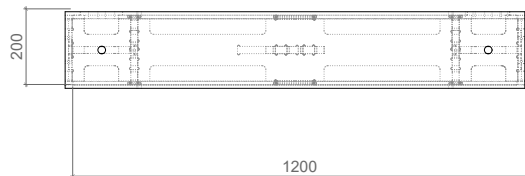
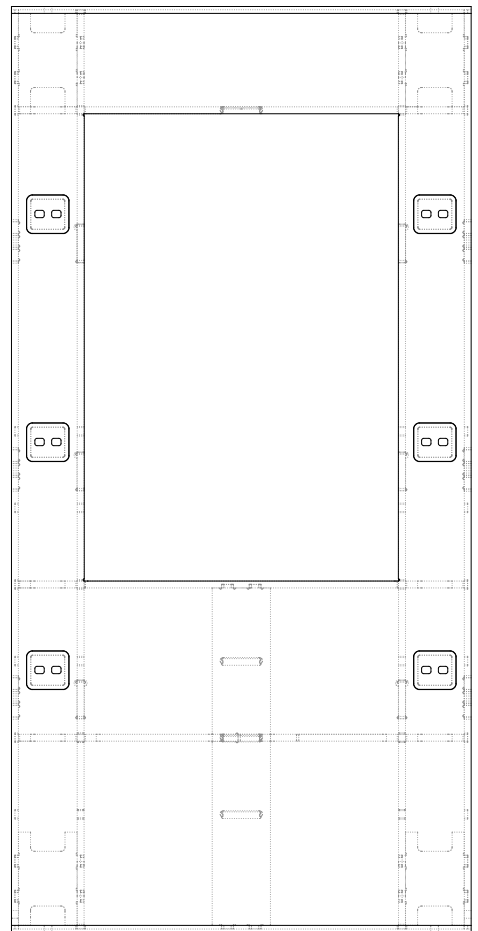
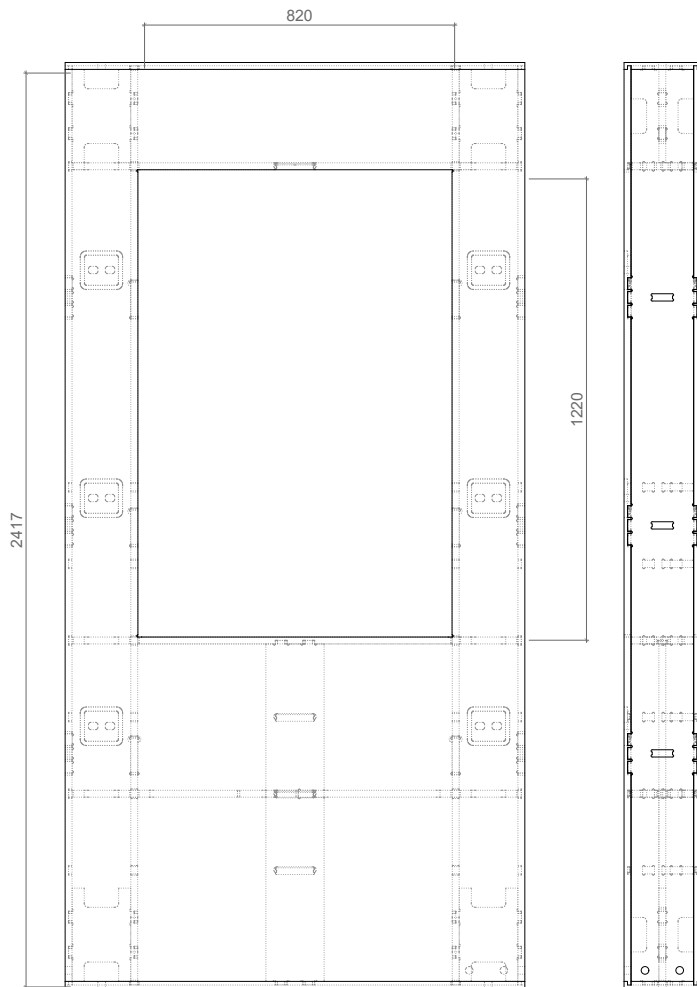
A prototipagem revelou limitações técnicas, como desalinhamentos durante a maquinação e dificuldades na fresagem de superfícies curvas. Estes problemas foram corrigidos manualmente, sobretudo em zonas de fillets que não puderam ser fresadas com precisão.

Apesar das dificuldades, o exercício permitiu:

- Validar a viabilidade da cortiça como material alternativo em fabrico digital;
- Experimentar metodologias de parametrização aplicadas ao design de mobiliário;
- Testar a desmontabilidade e a ausência de fixações metálicas ou colas;
- Aprofundar competências técnicas em modelação, nesting, programação e simulação robótica.

O projeto confirmou a possibilidade de aplicar princípios de parametrização, desmontabilidade e sustentabilidade a diferentes materiais e escalas. Funcionou assim como exploração paralela e complementar ao desenvolvimento do sistema modular em contraplacado, constituindo um ensaio prévio que consolidou as metodologias aplicadas na dissertação.

Anexo D – Desenhos técnicos do sistema construtivo



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

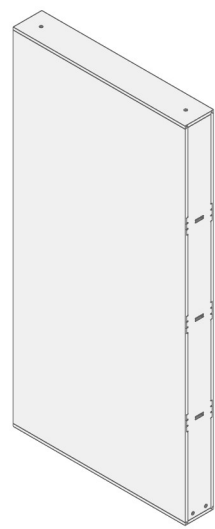
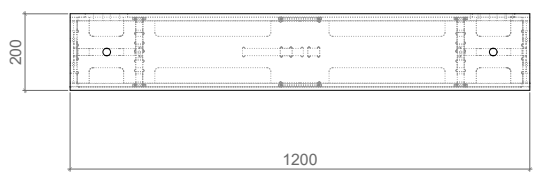
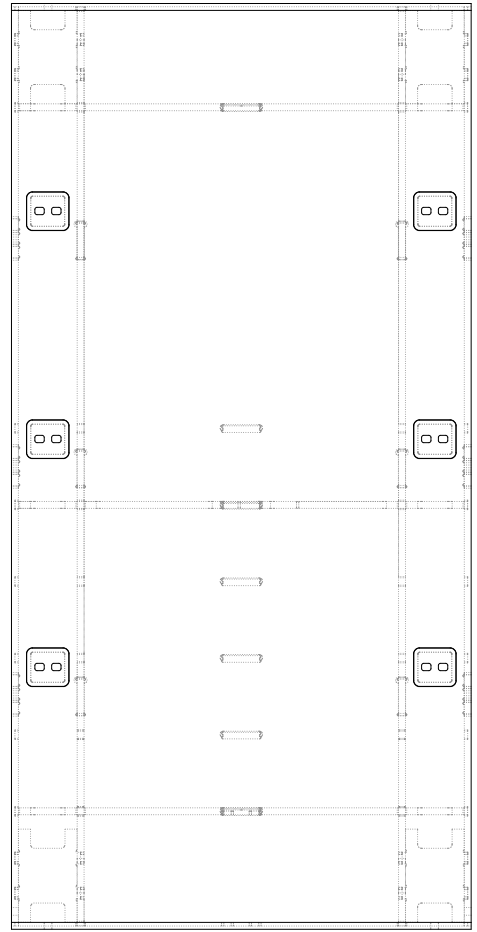
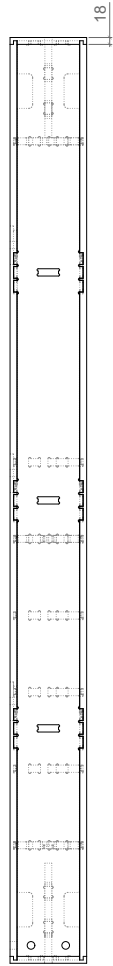
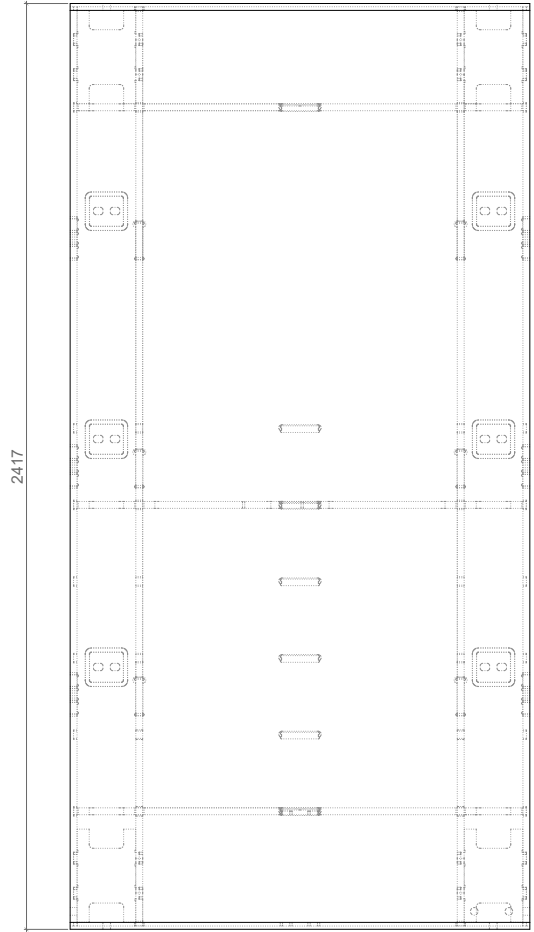
Conteúdo:
Módulo Loop: Módulo D - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.MD.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

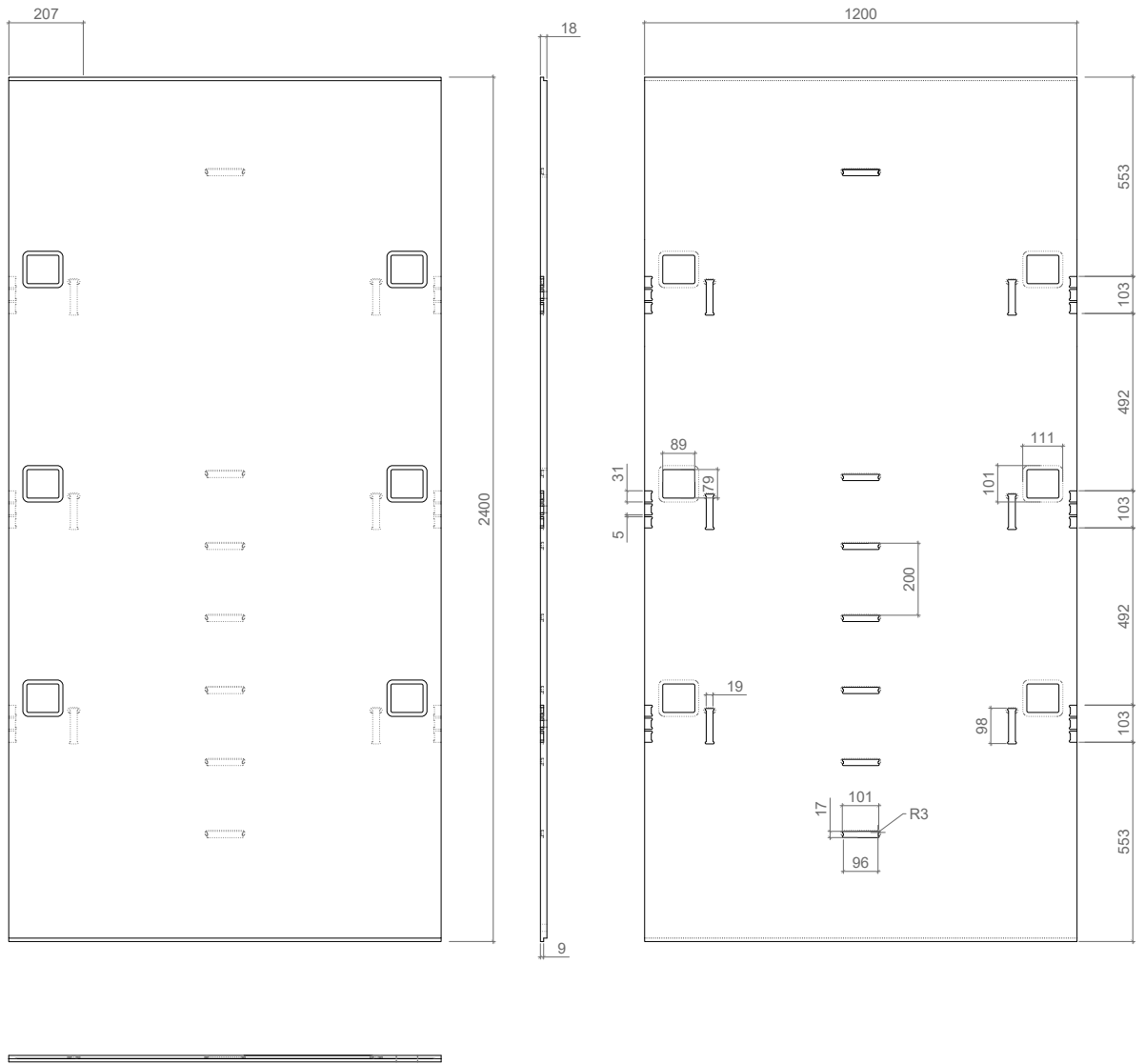
Conteúdo:
Módulo Loop: Módulo A - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.MA.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1A - Dimensões gerais

Escala:

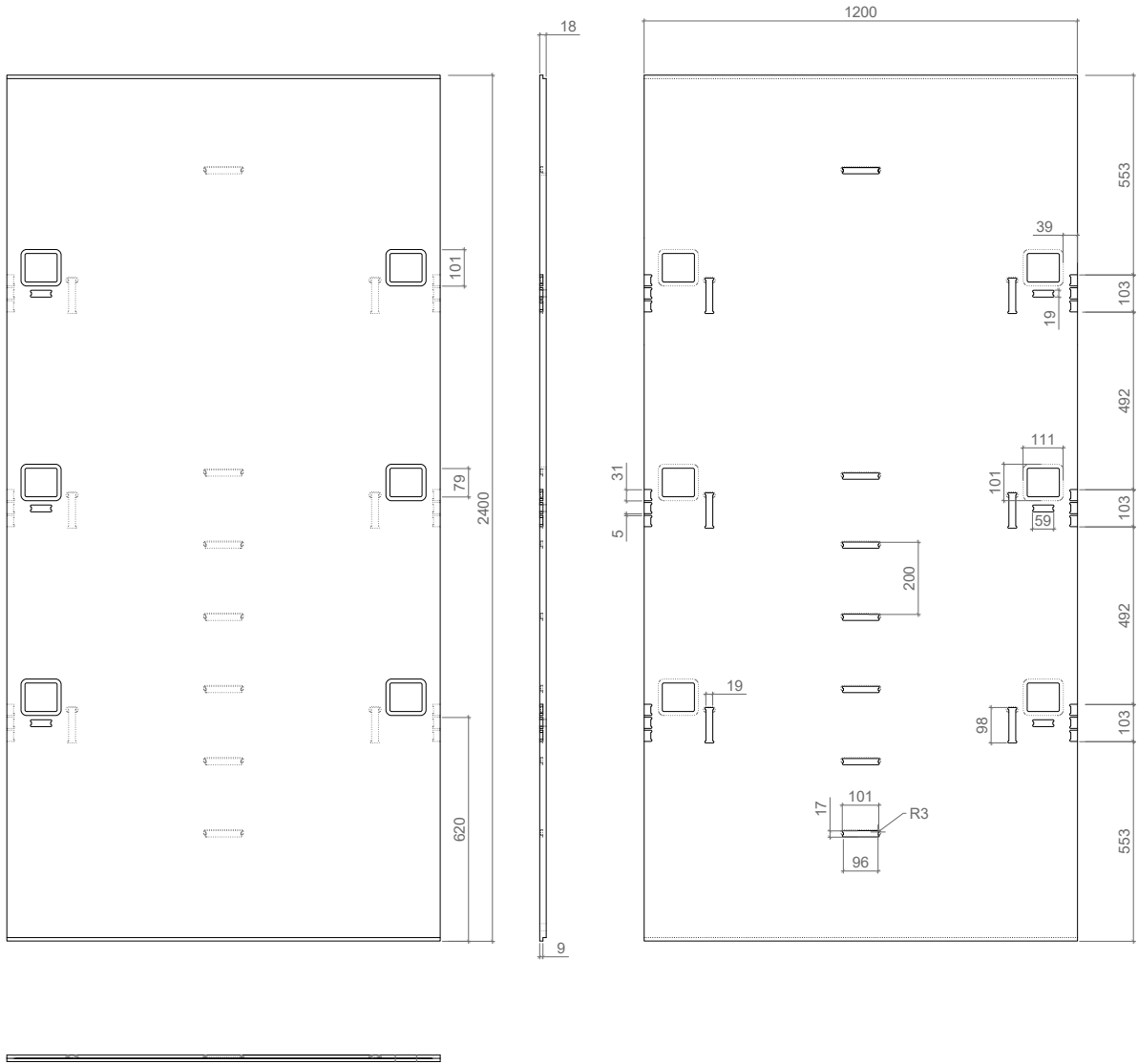
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1A.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.A Esquerda - Dimensões gerais

Escala:

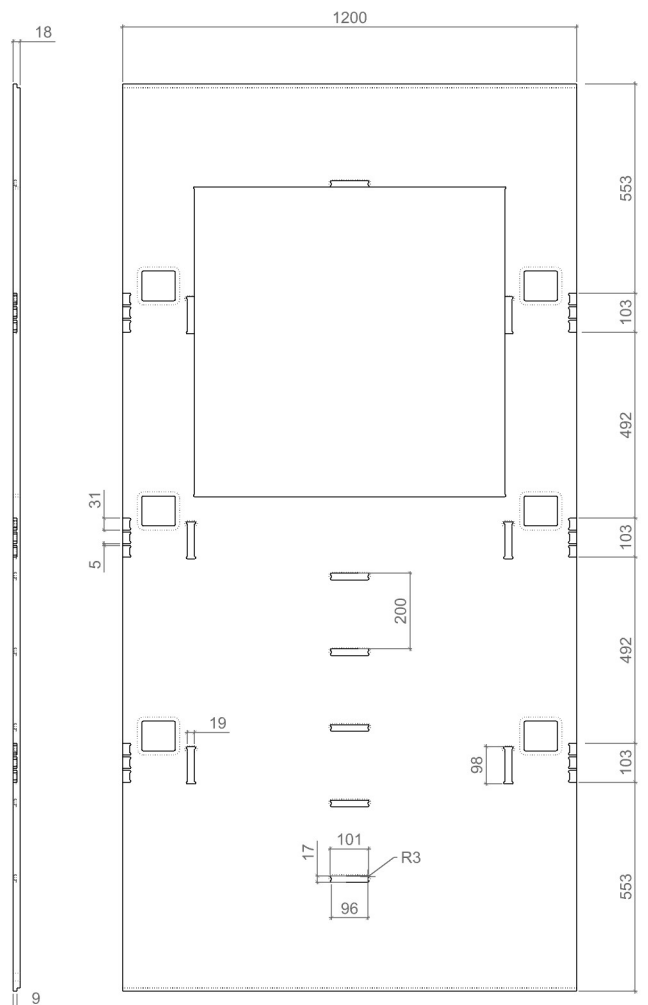
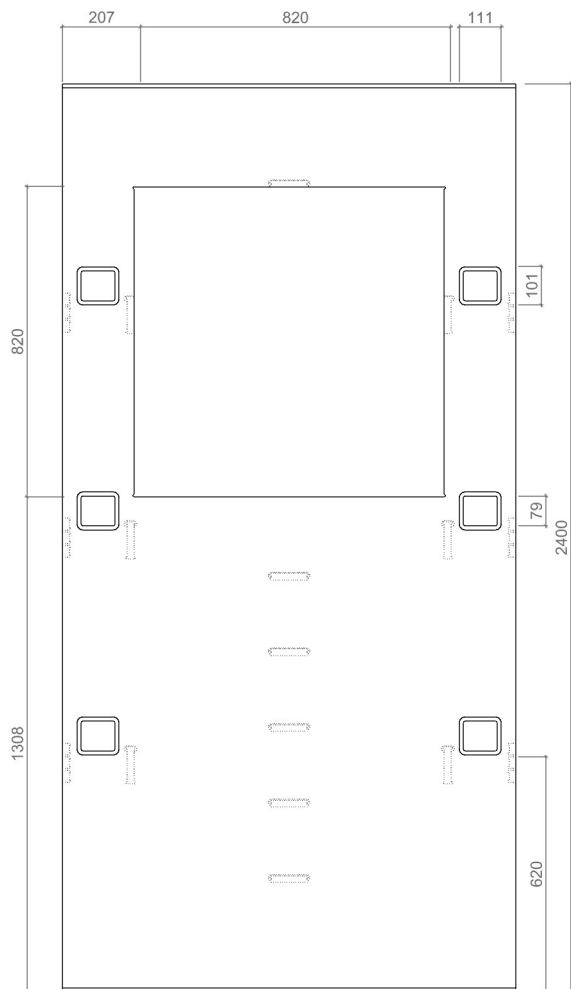
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1A.ESQ.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.B - Dimensões gerais

Escala:

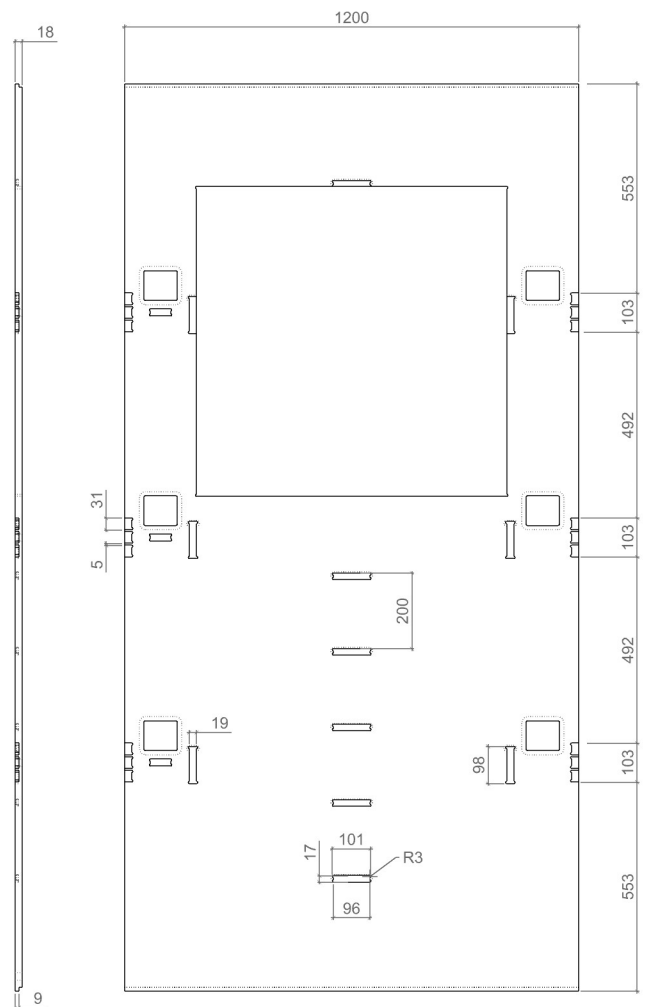
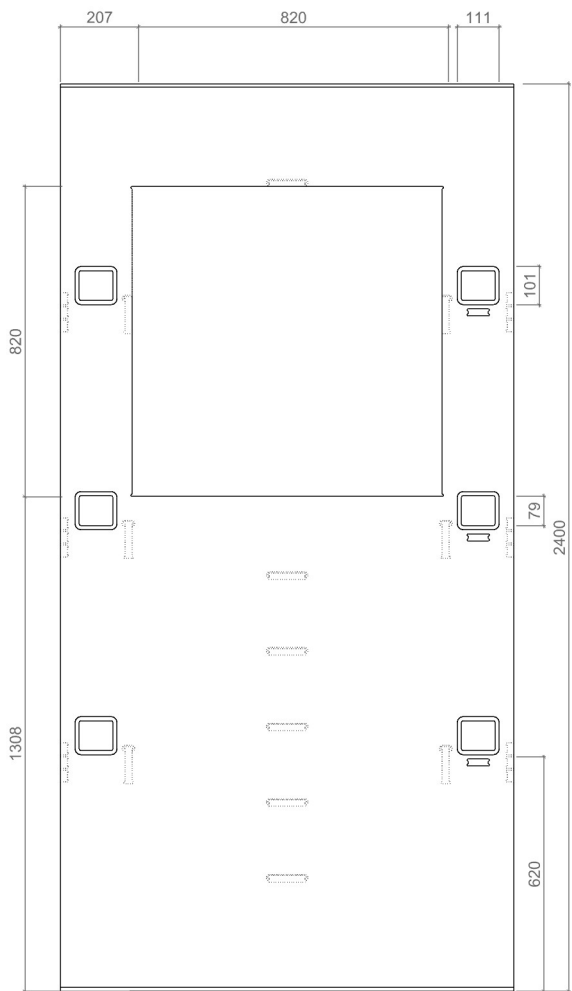
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1B.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

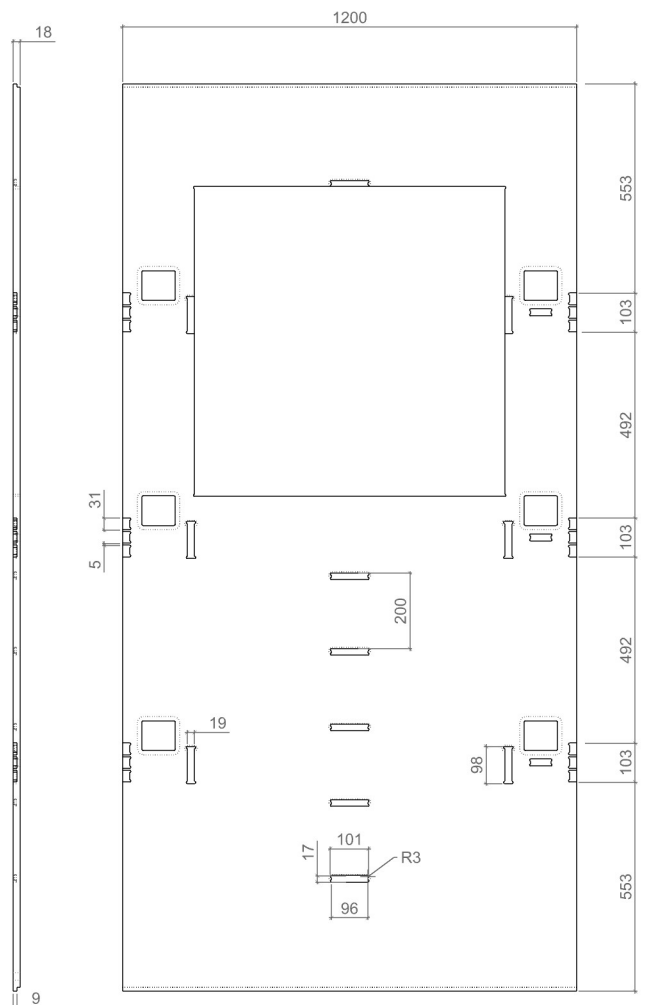
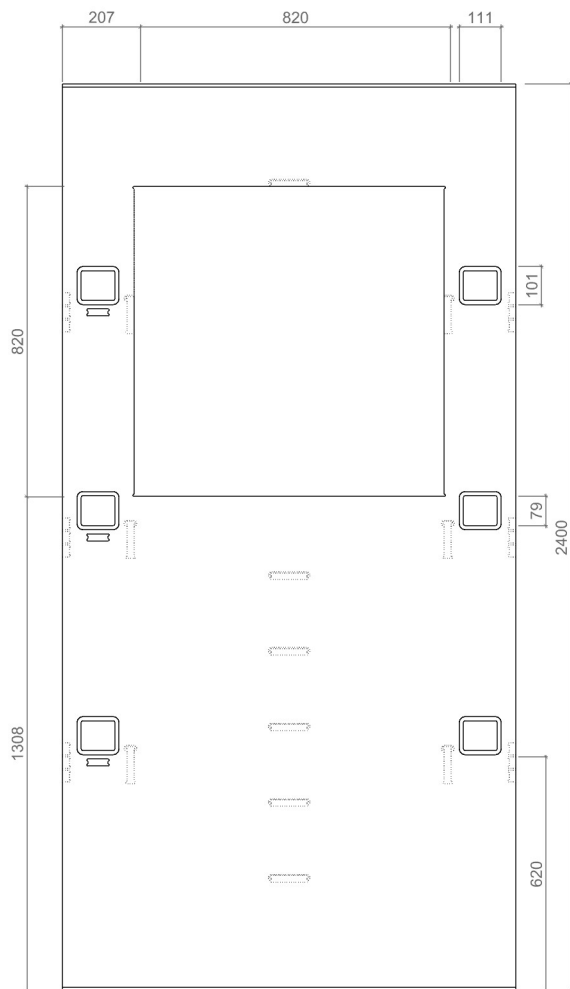
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.1.B Direita - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.1B.DIR.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

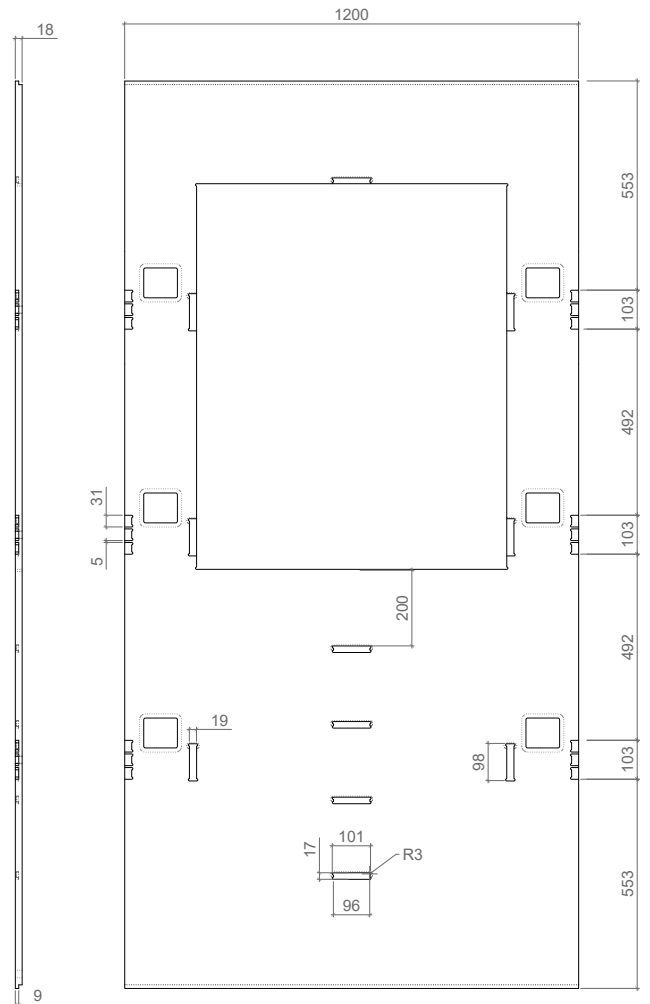
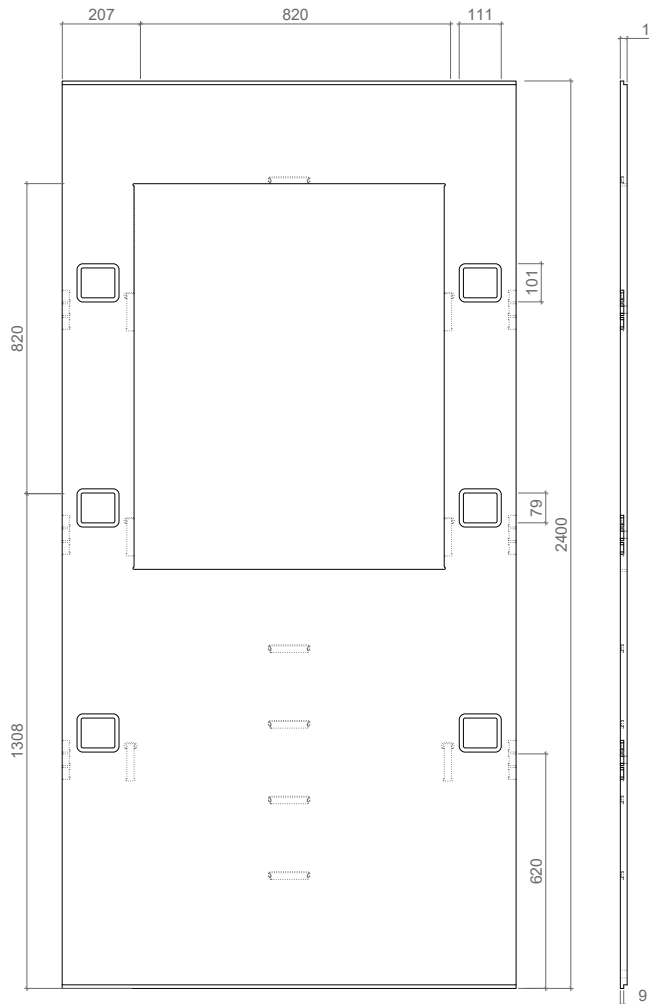
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.1.B Esquerda - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.1B.ESQ.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.C - Dimensões gerais

Escala:

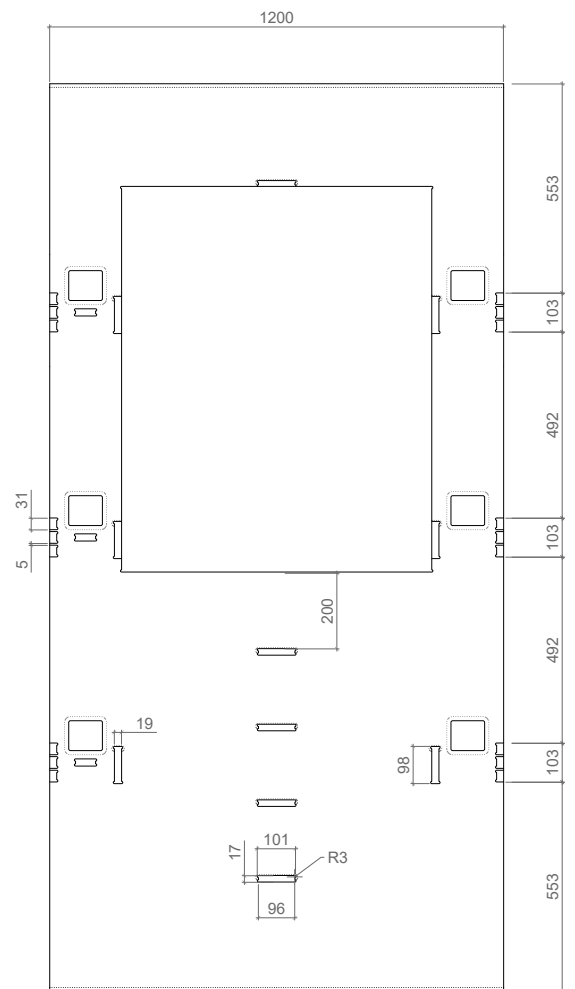
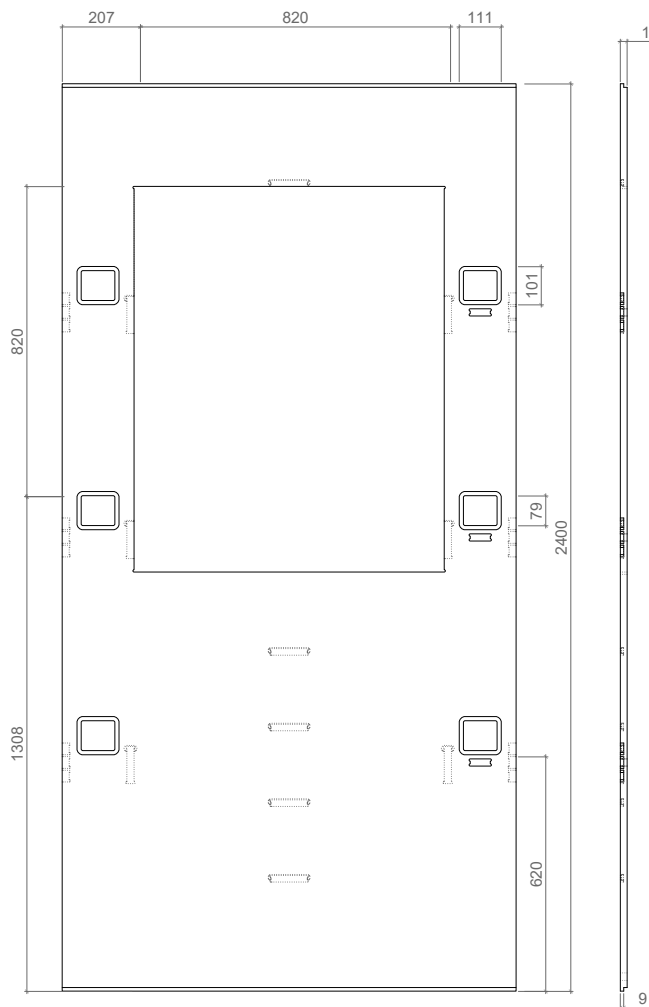
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1C.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.C Direita - Dimensões gerais

Escala:

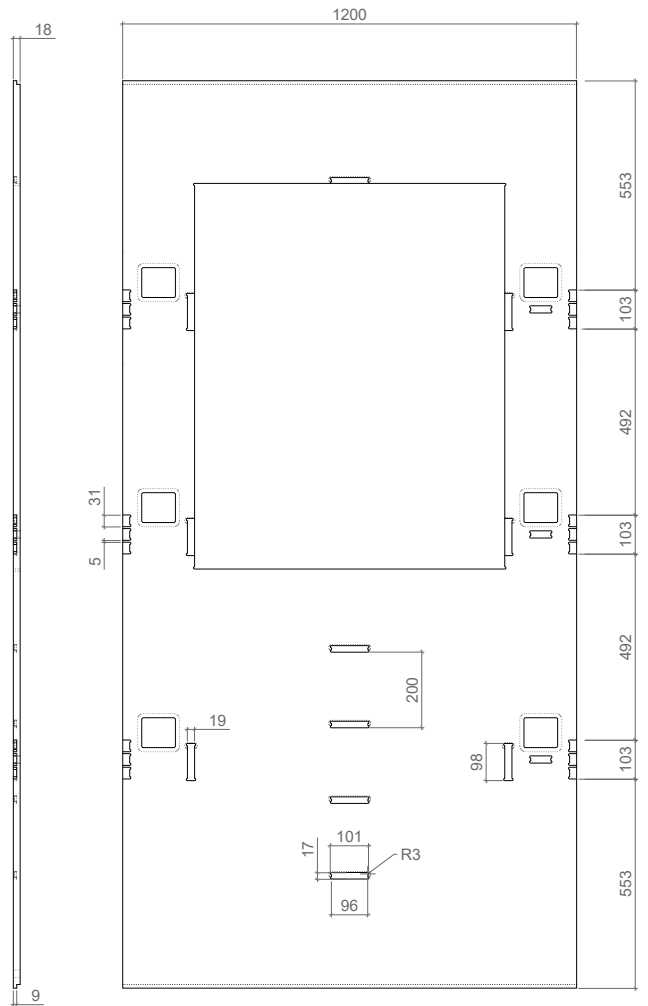
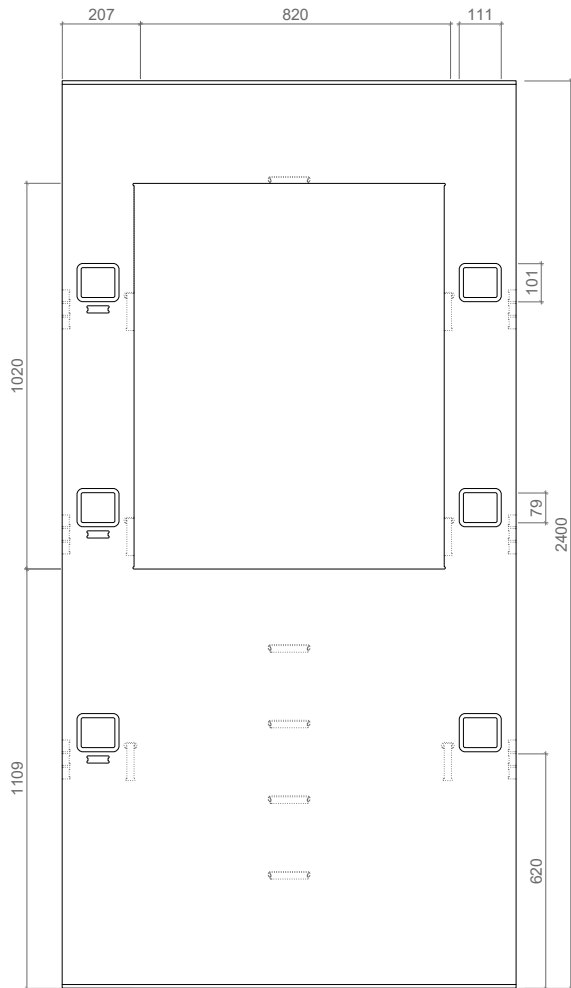
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1C.DIR.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.C Esquerda - Dimensões gerais

Escala:

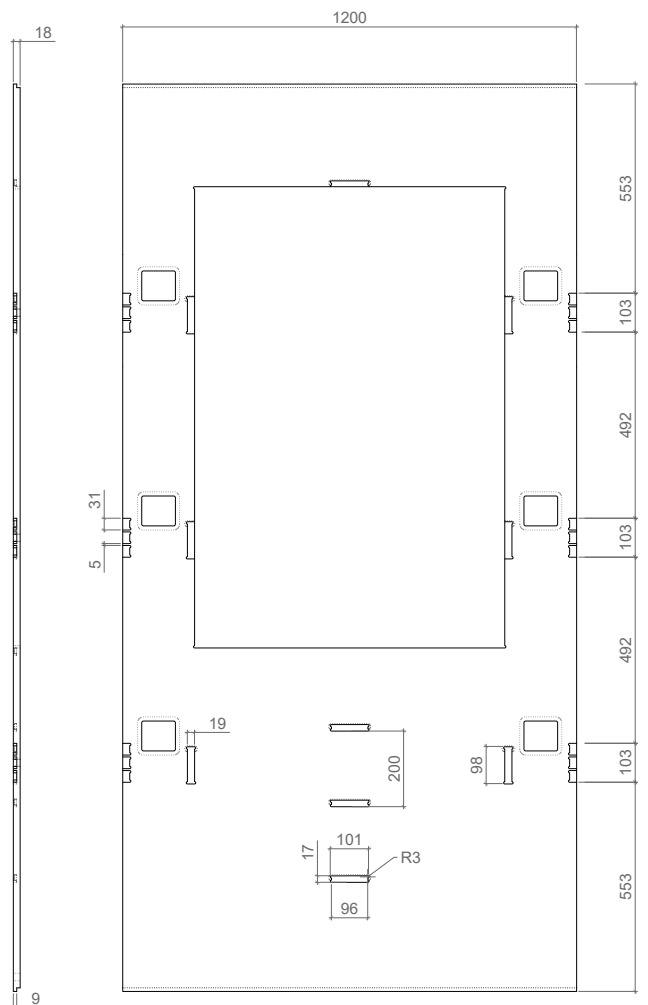
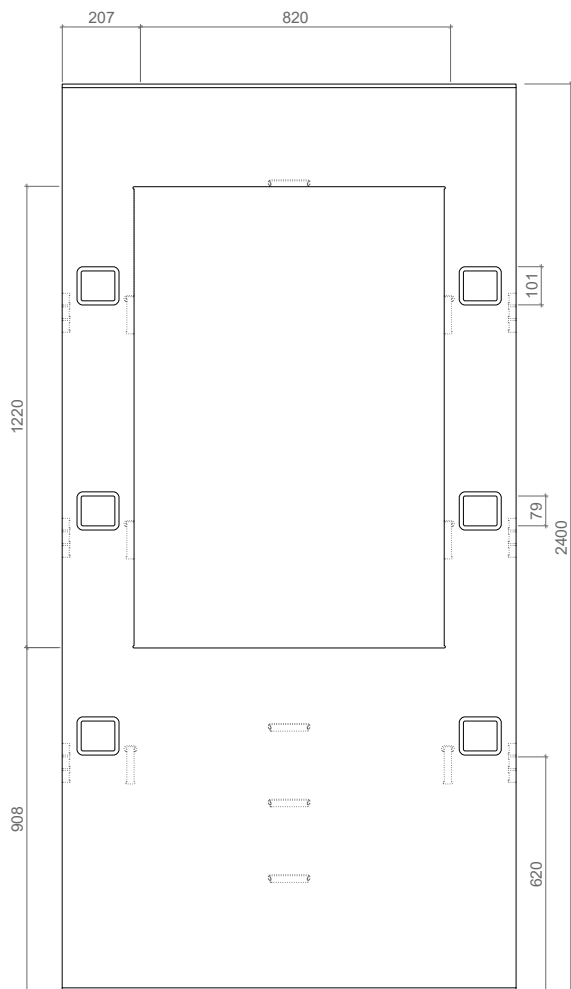
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1C.ESQ.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

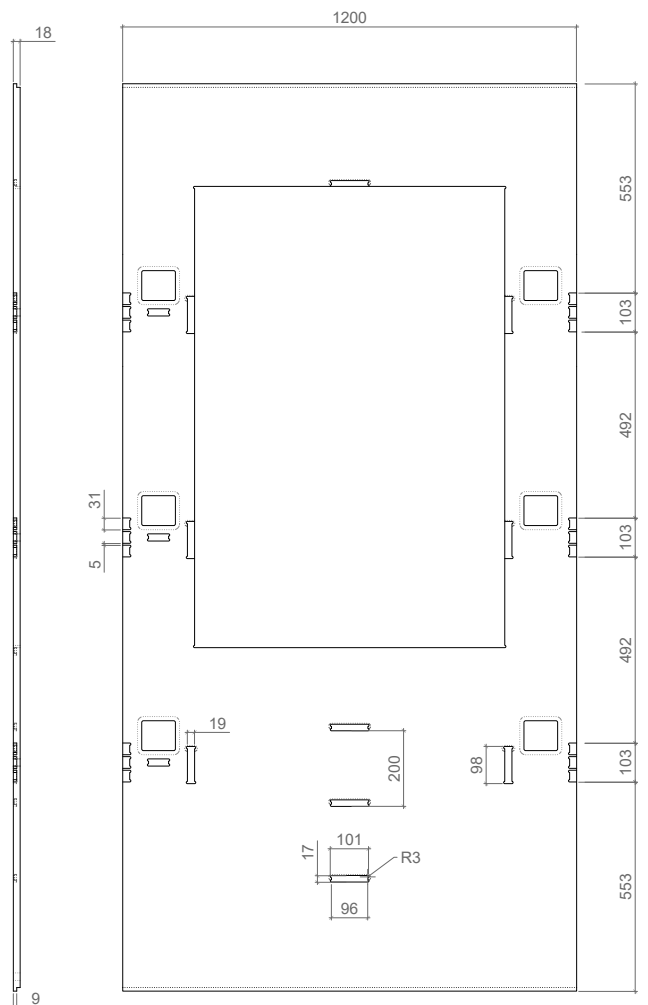
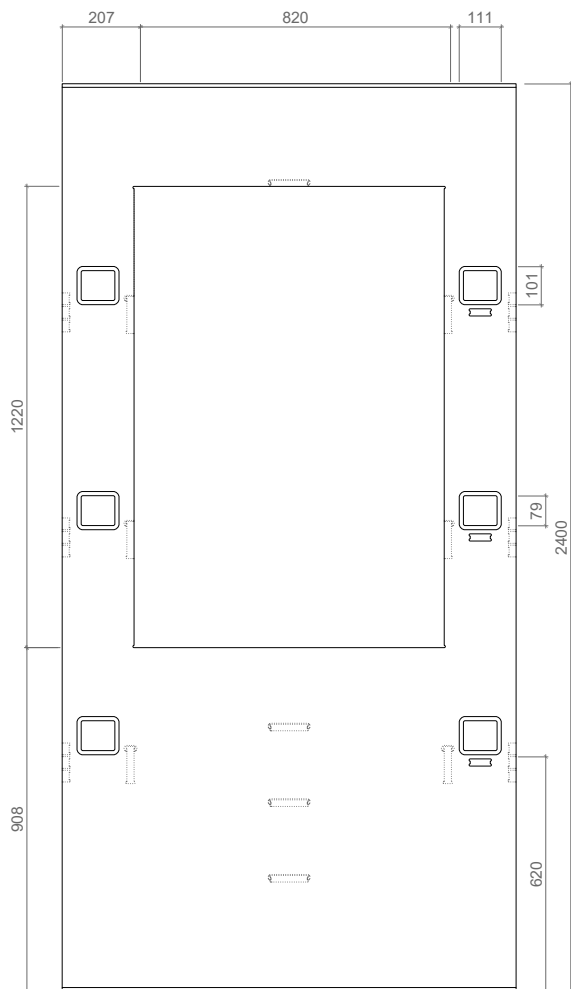
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.1.D - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.1D.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.D Direita - Dimensões gerais

Escala:

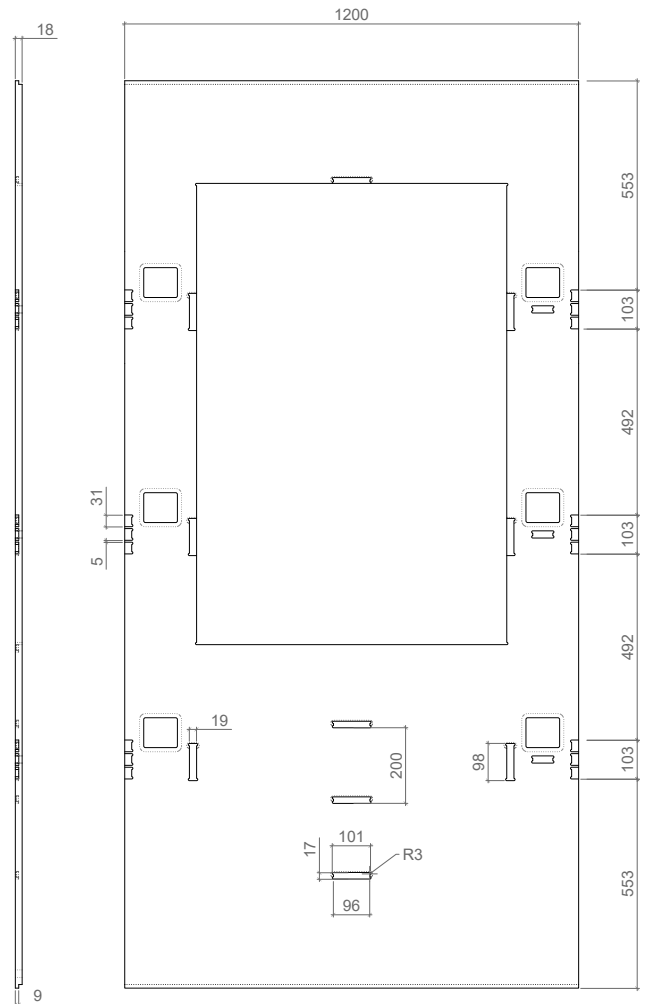
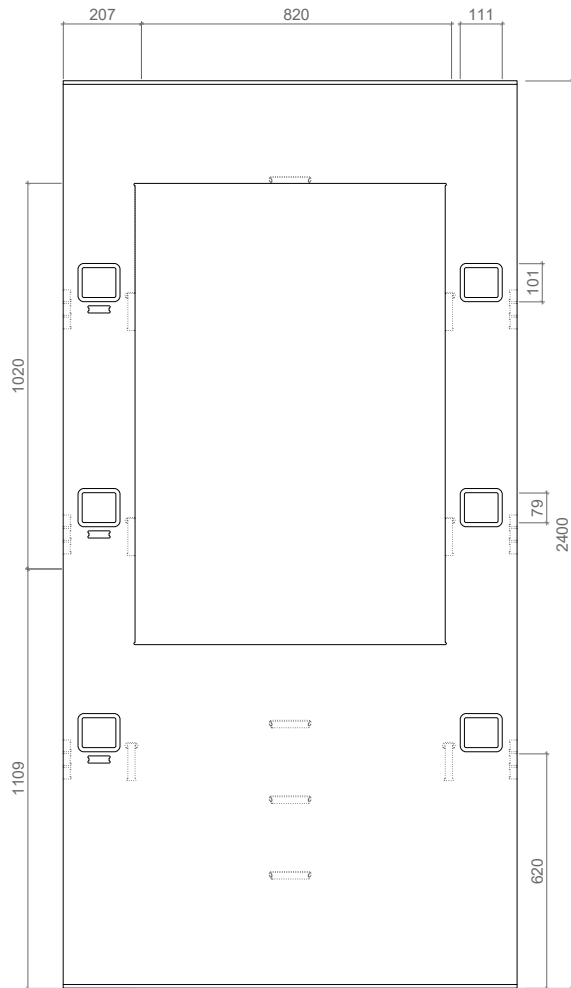
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1D.DIR.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

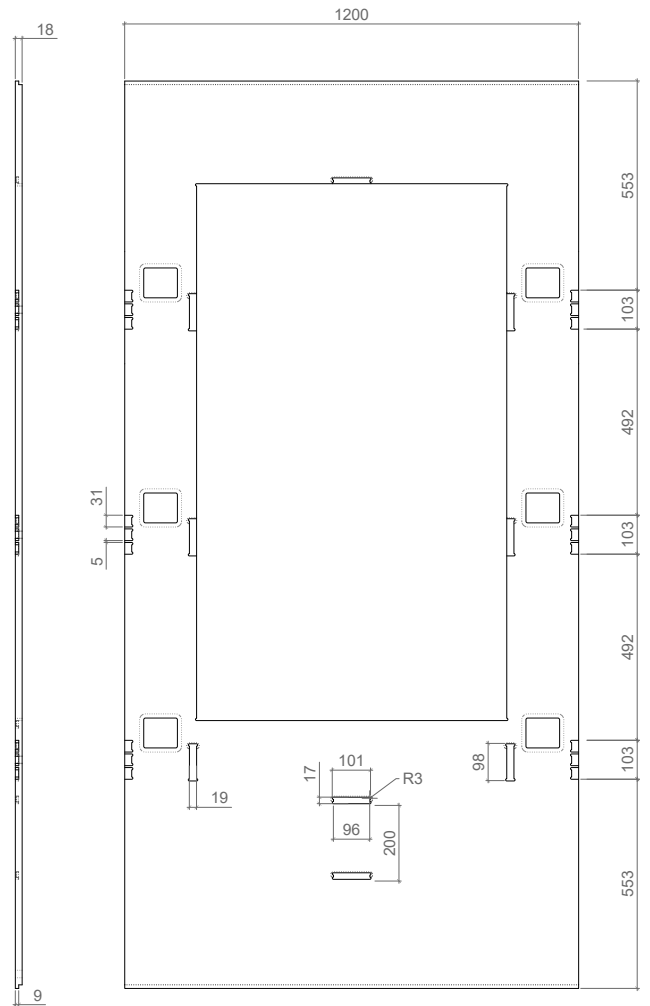
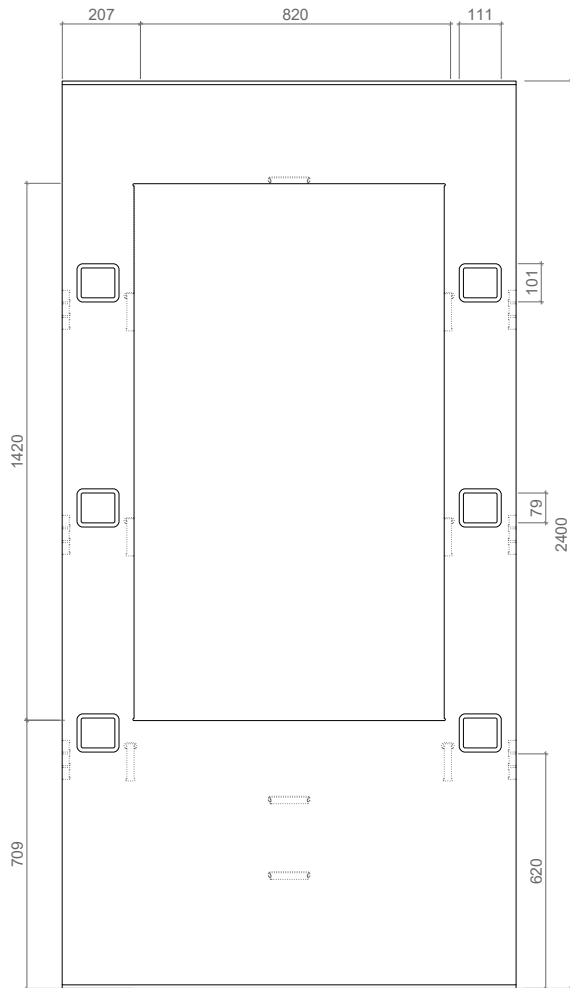
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.1.D Esquerda - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.1D.ESQ.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

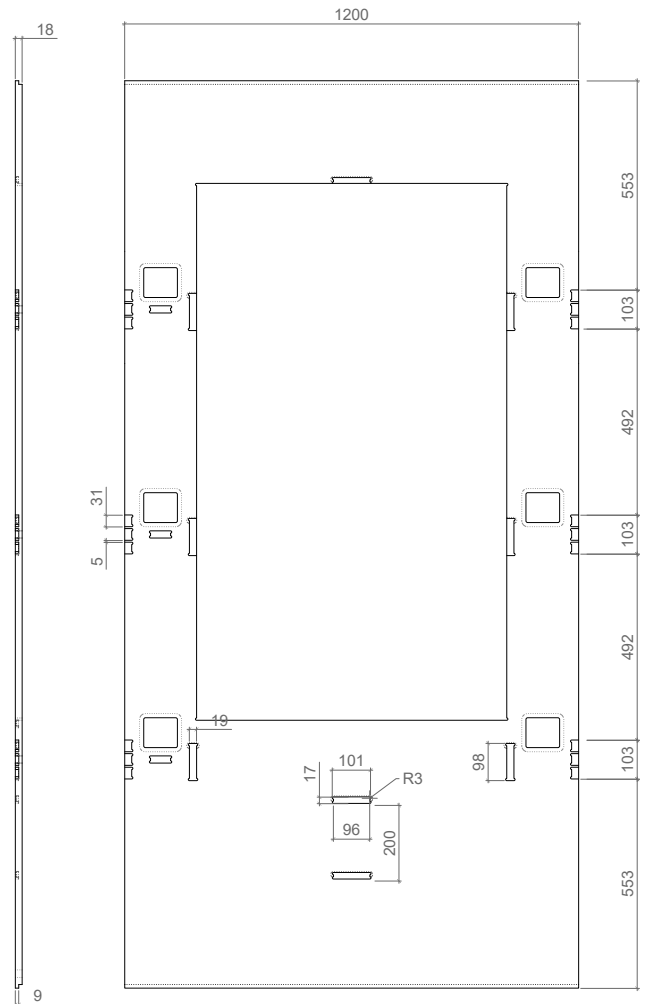
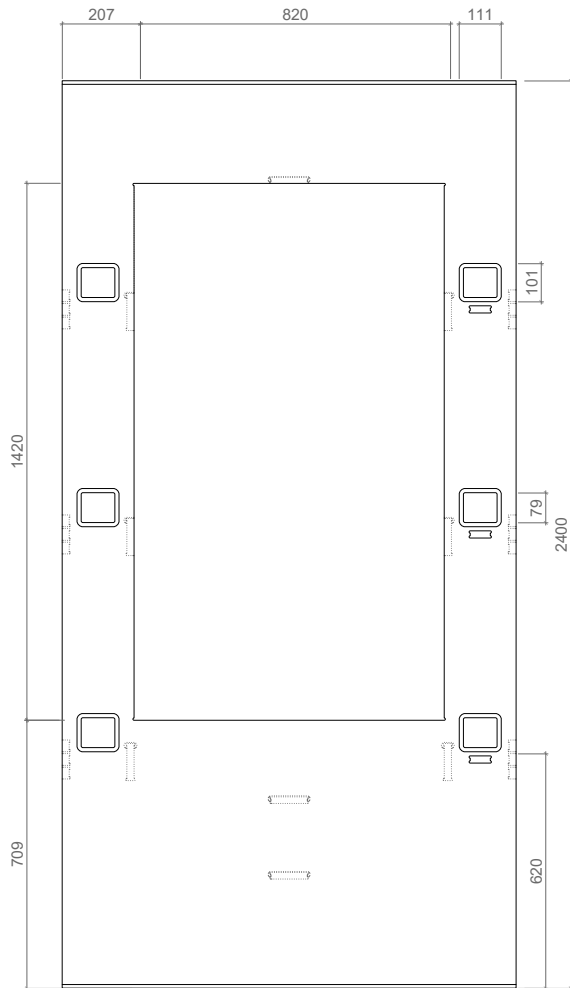
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.1 E - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.1E.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.E Direita - Dimensões gerais

Escala:

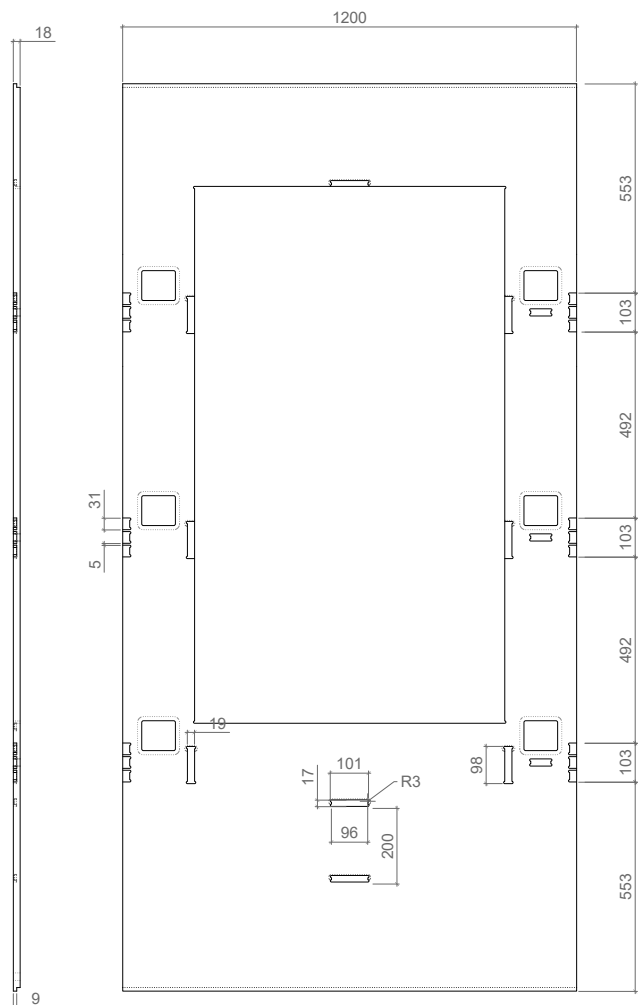
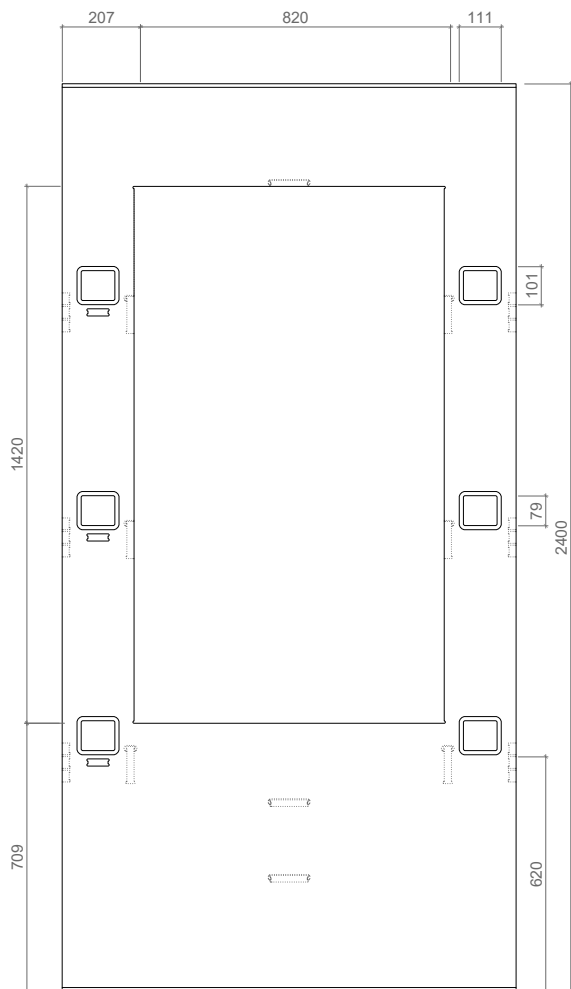
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1E.DIR.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.E Esquerda - Dimensões gerais

Escala:

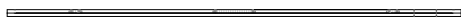
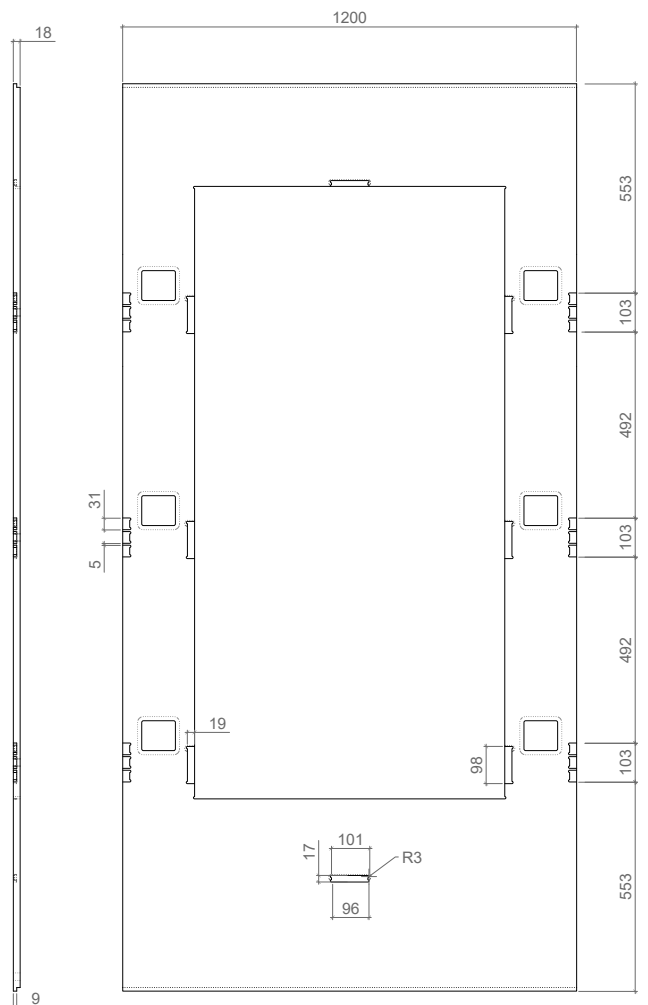
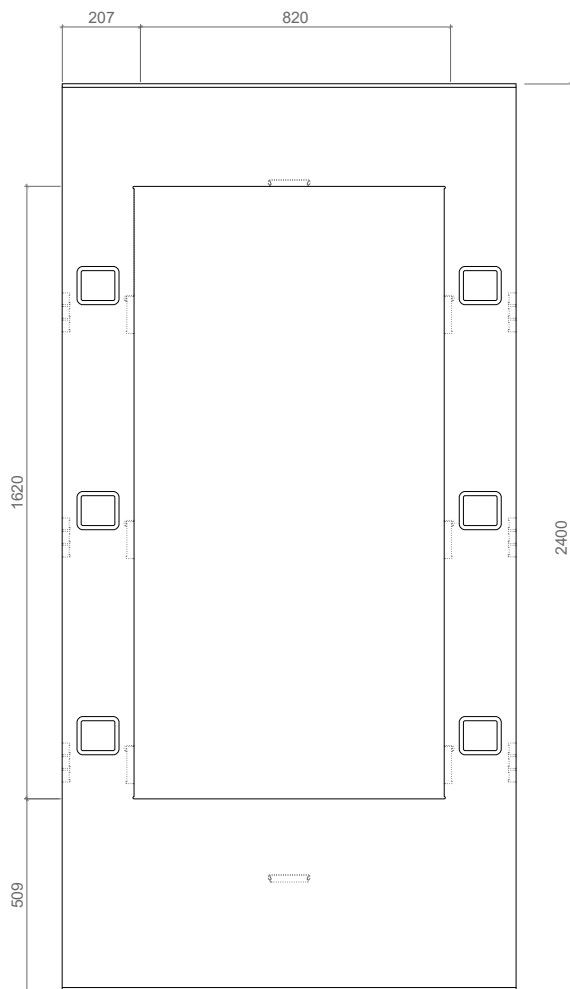
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1E.ESQ.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

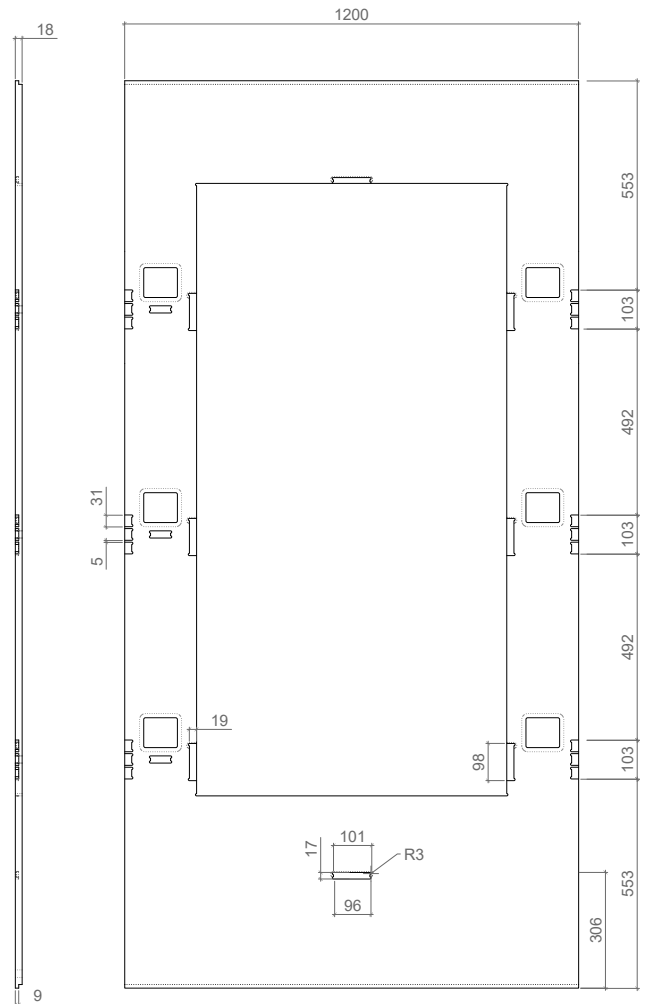
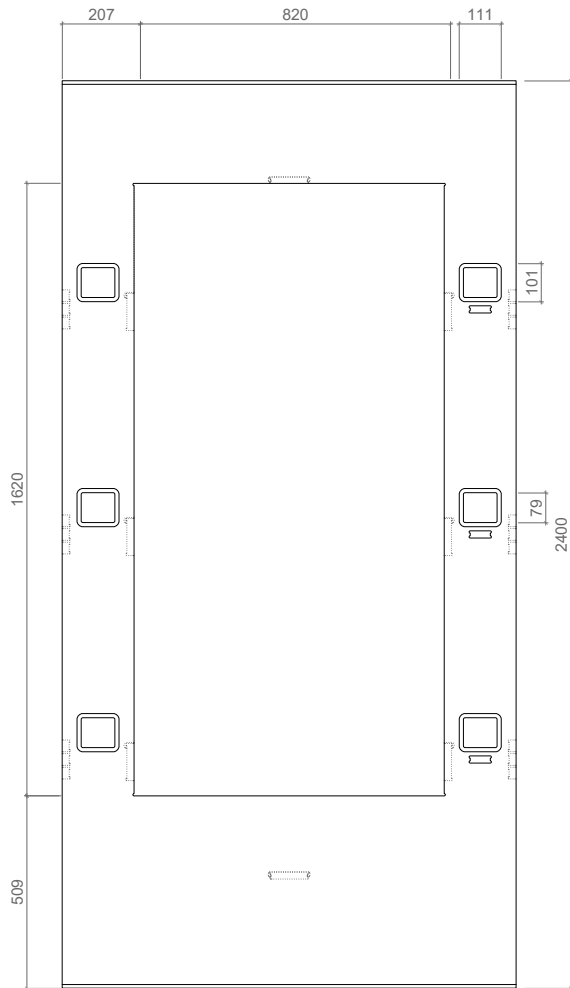
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.1.F - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.1F.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

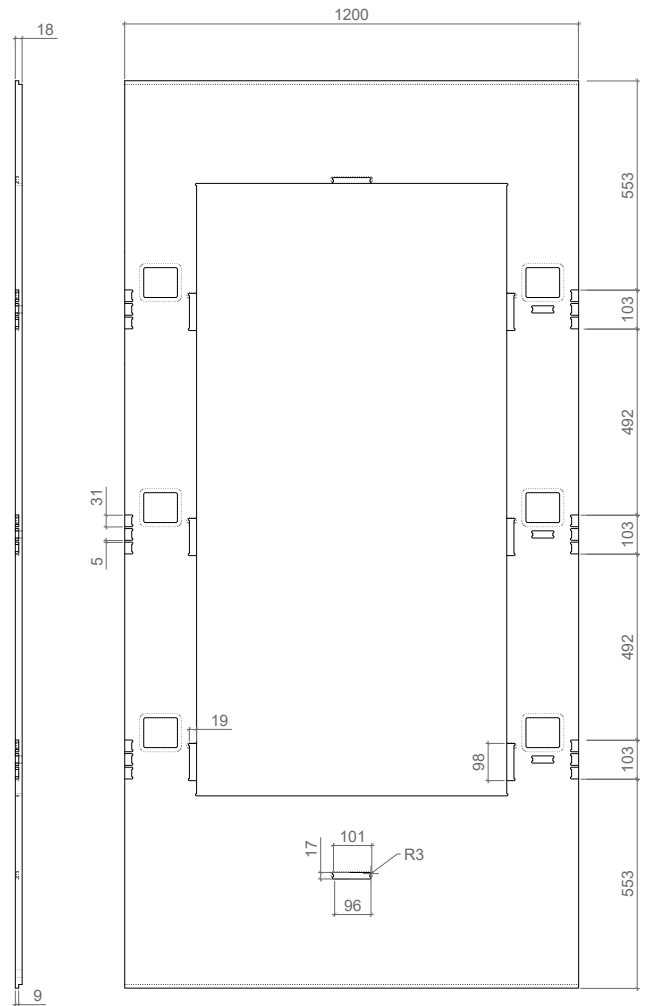
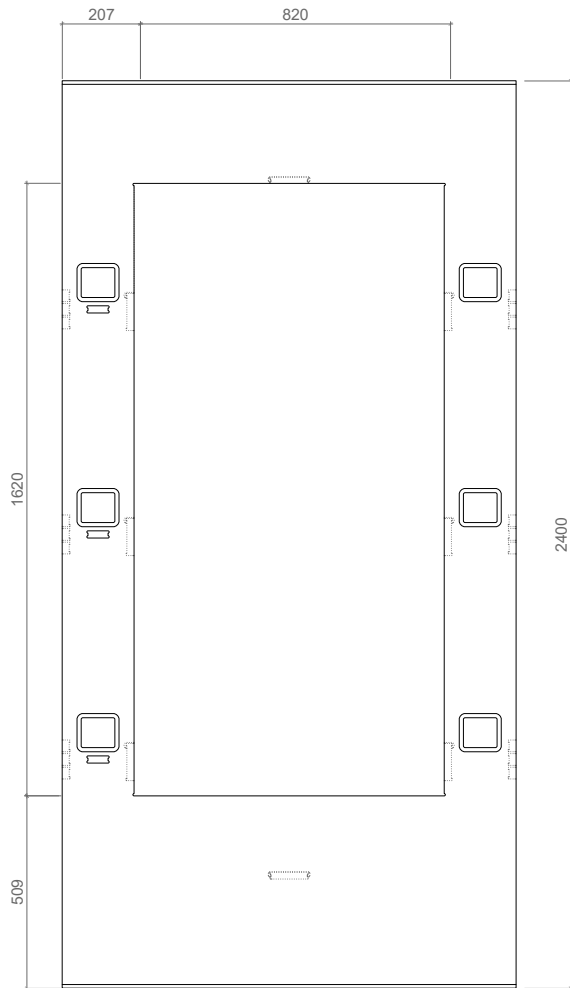
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.1.F Direita - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.1F.DIR.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

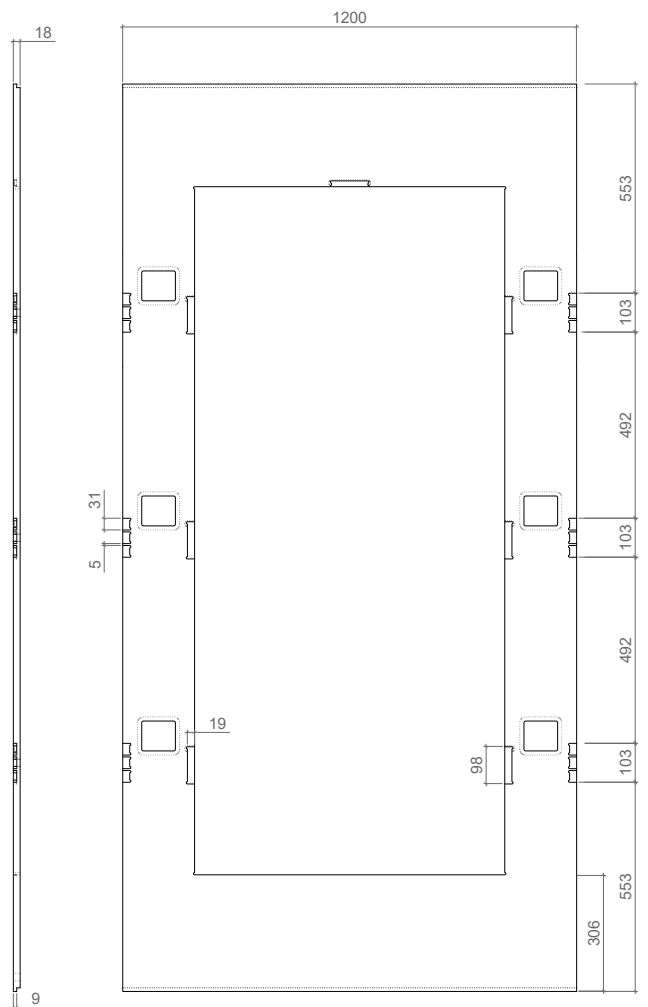
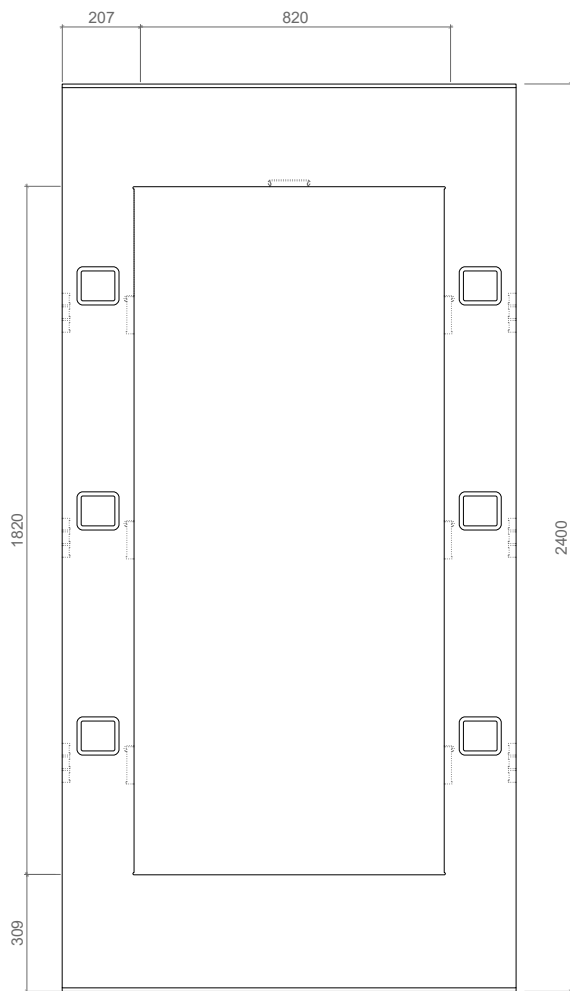
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.1.F Esquerda - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.1F.ESQ.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1 G - Dimensões gerais

Escala:

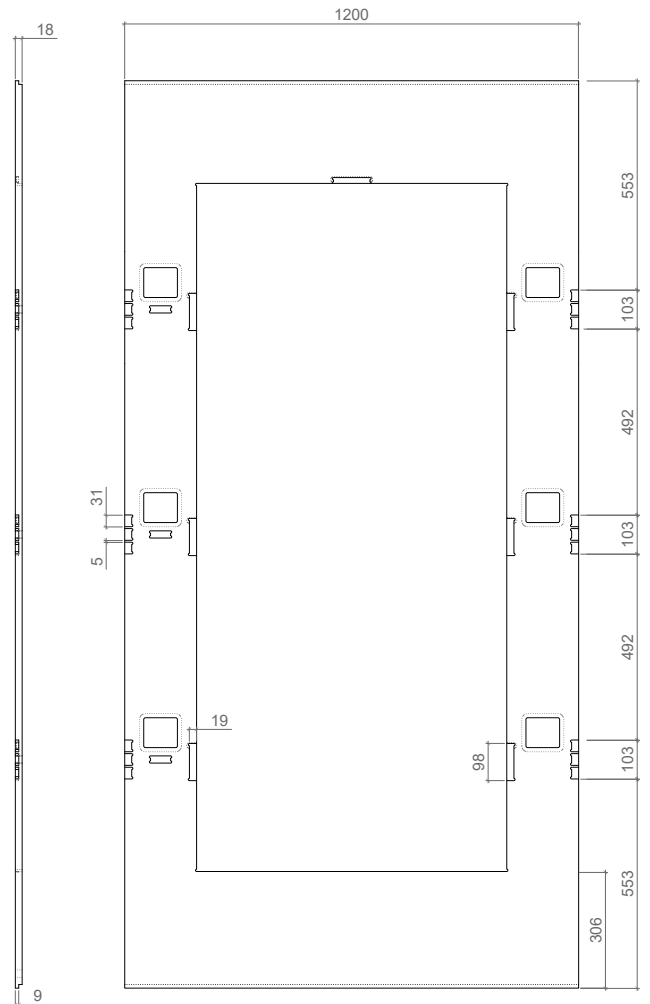
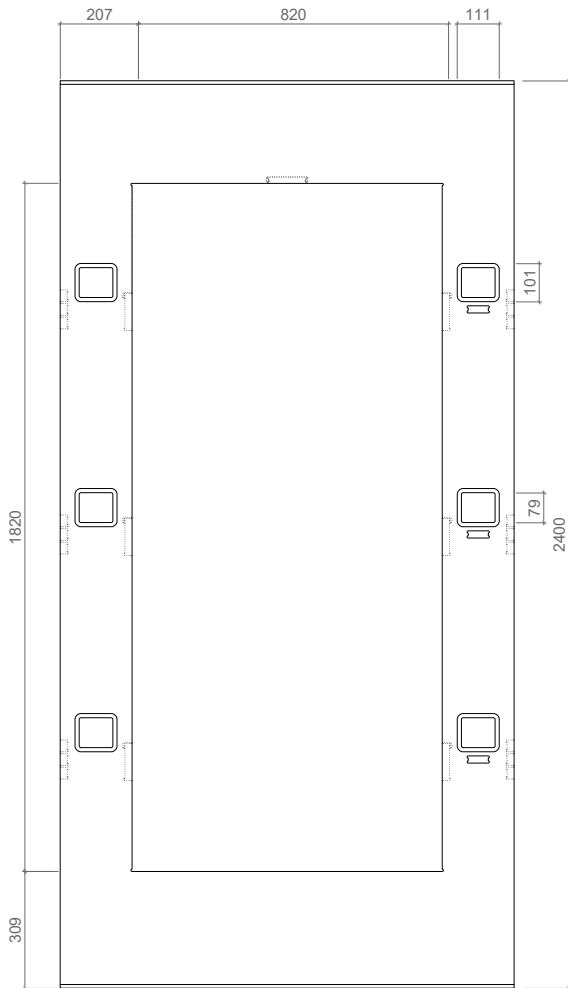
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1G.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.G Direita - Dimensões gerais

Escala:

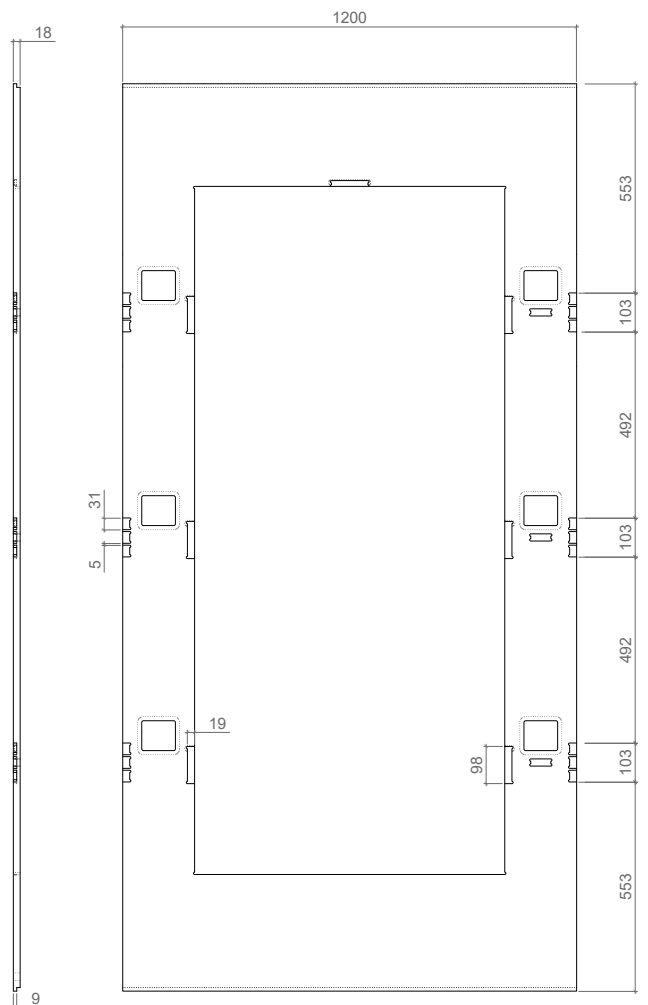
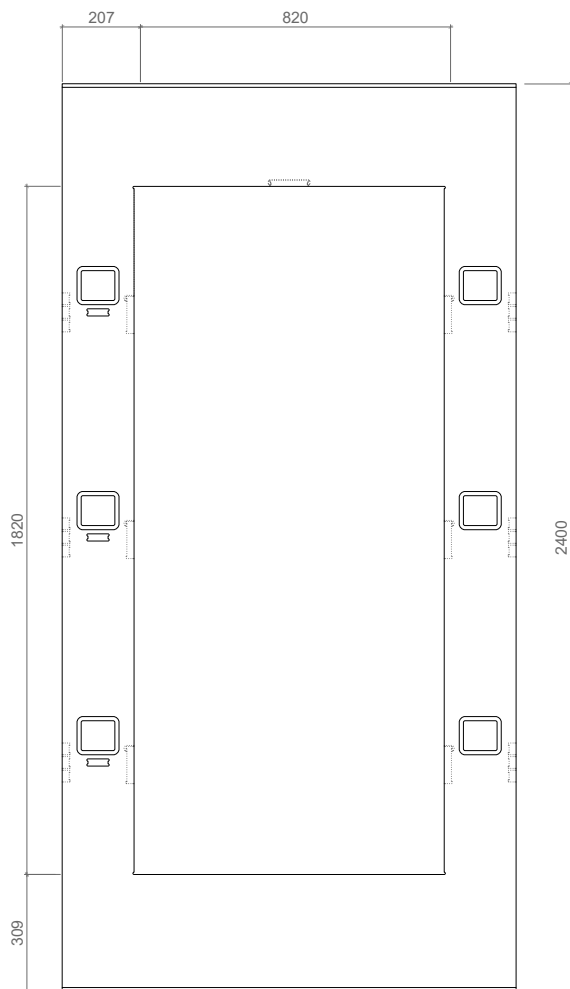
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1G.DIR.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.G Esquerda - Dimensões gerais

Escala:

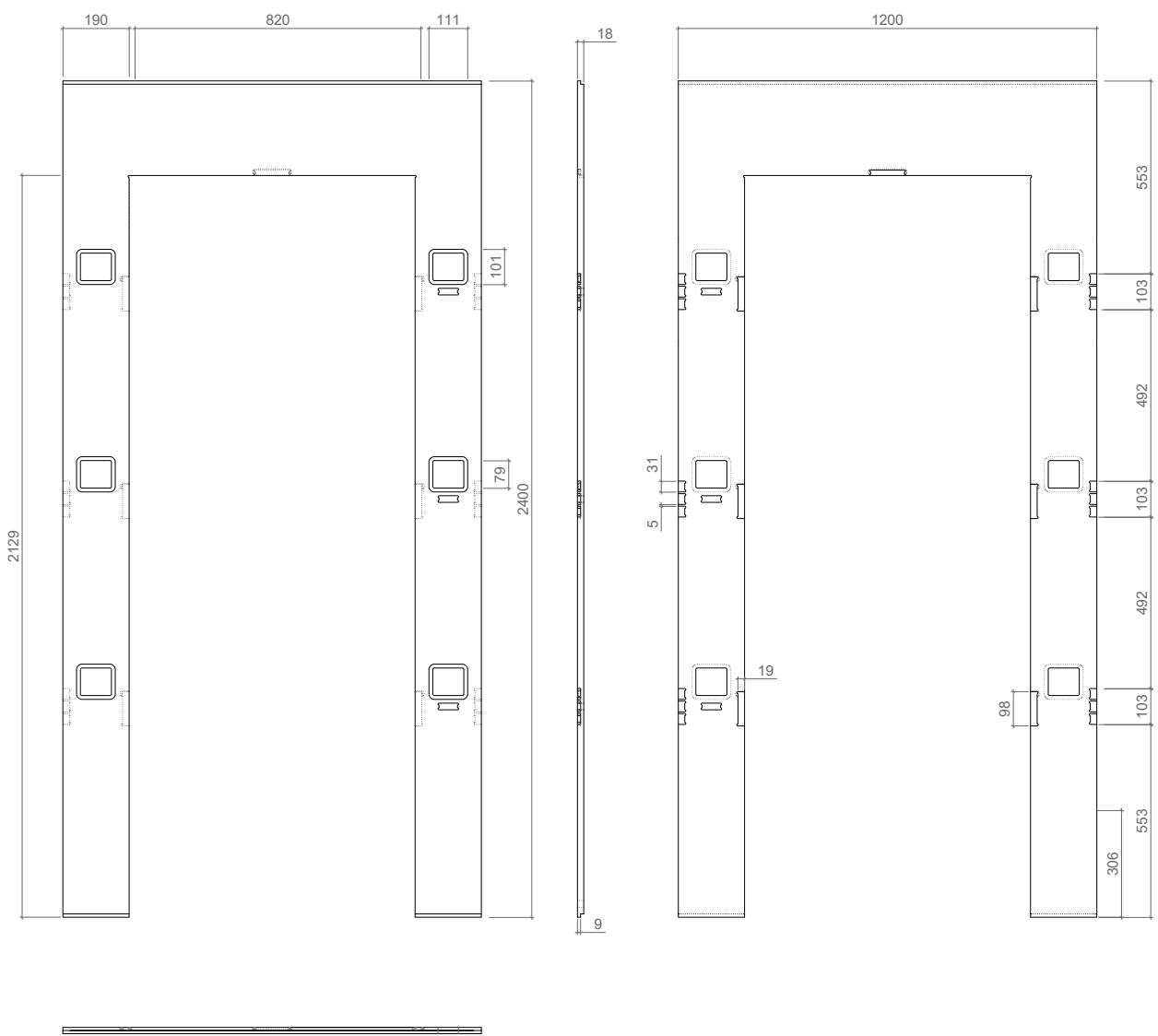
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1FG.ESQ.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.H Direita - Dimensões gerais

Escala:

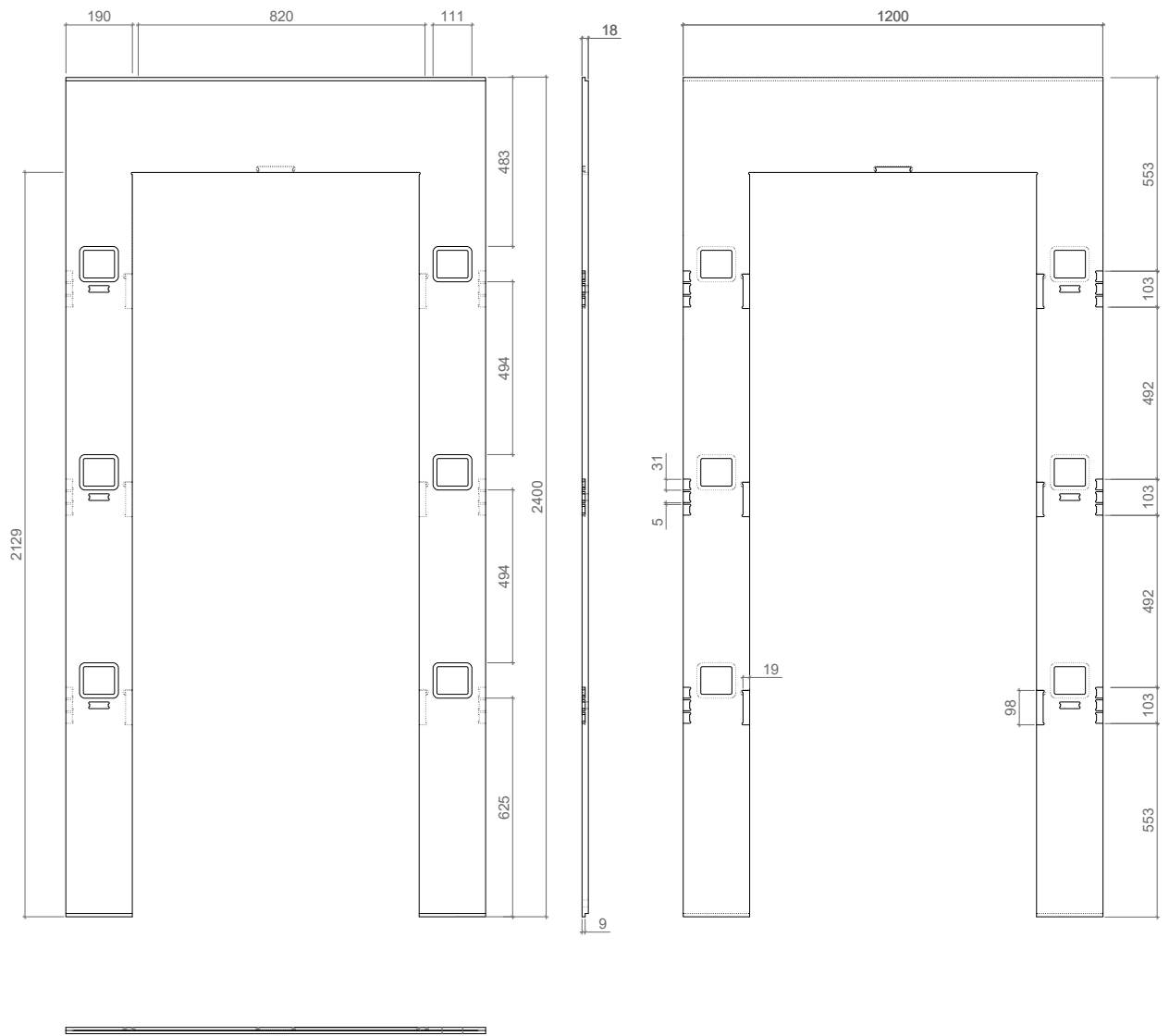
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1H.DIR.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.1.H Esquerda - Dimensões gerais

Escala:

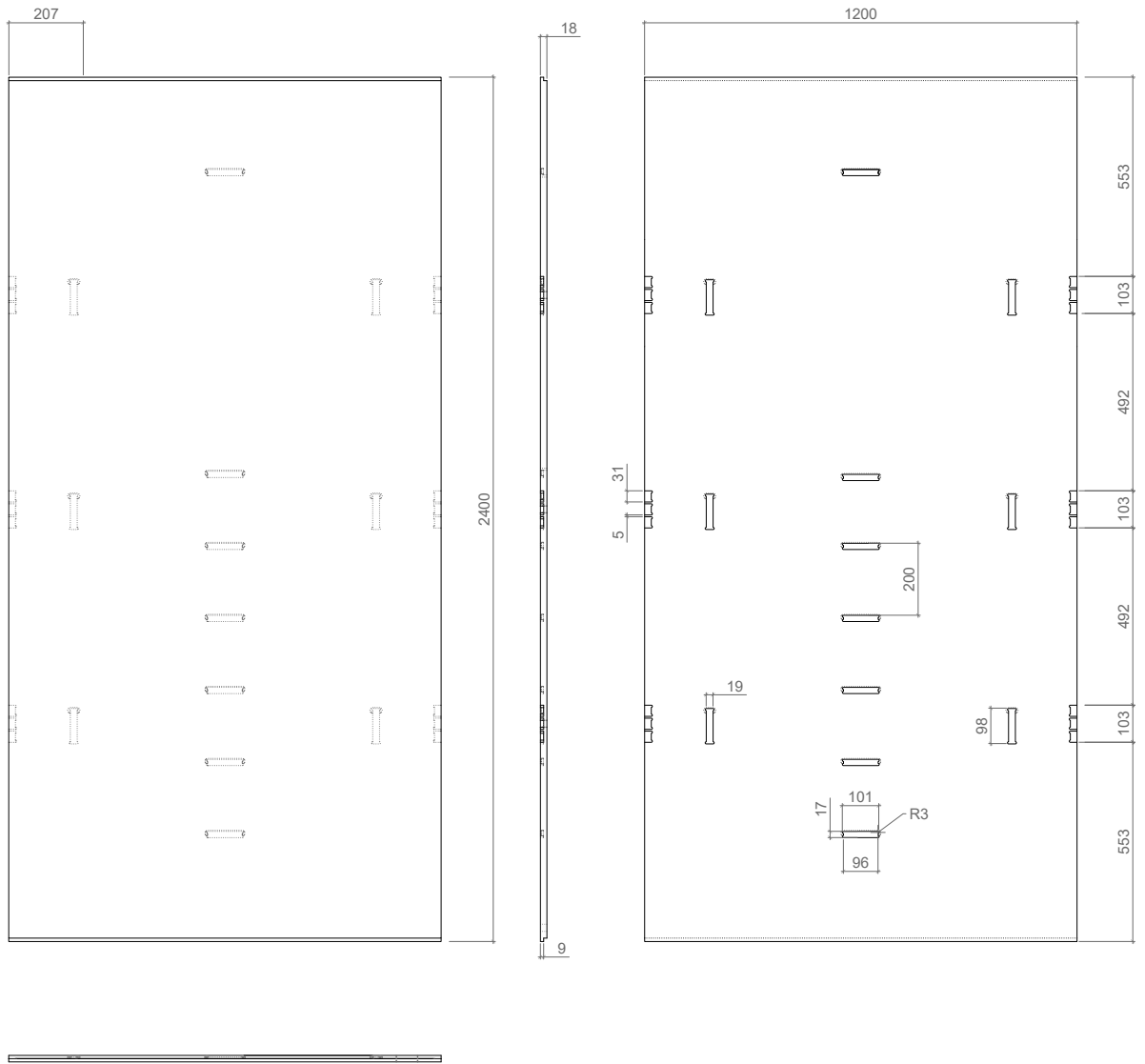
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.1H.ESQ.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.2A - Dimensões gerais

Escala:

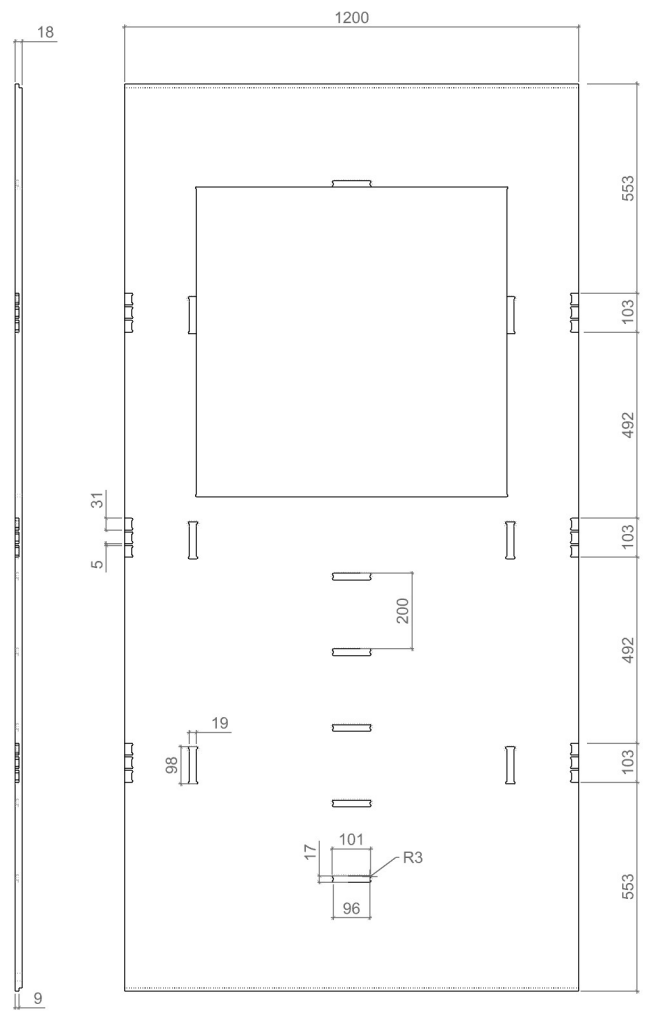
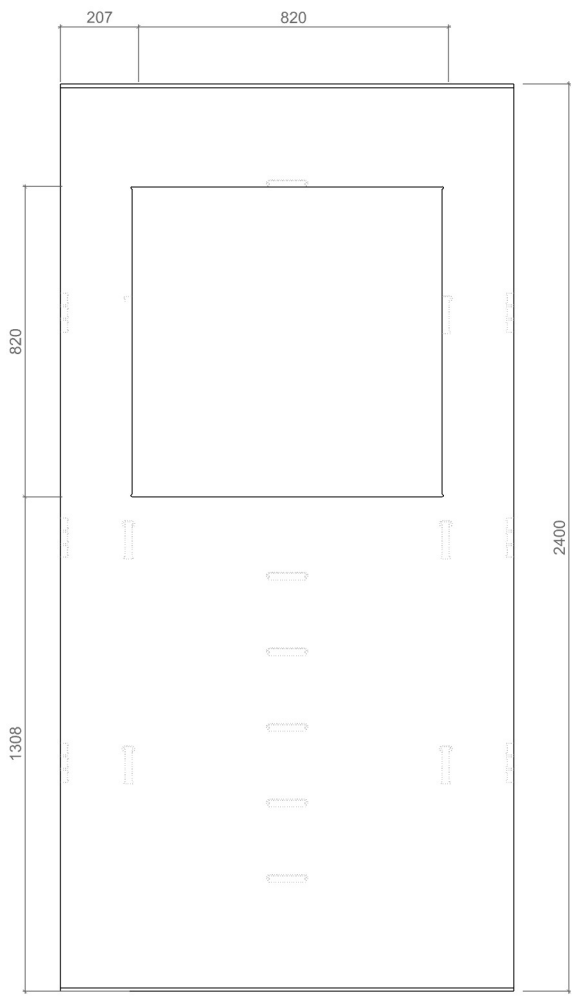
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.2A.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

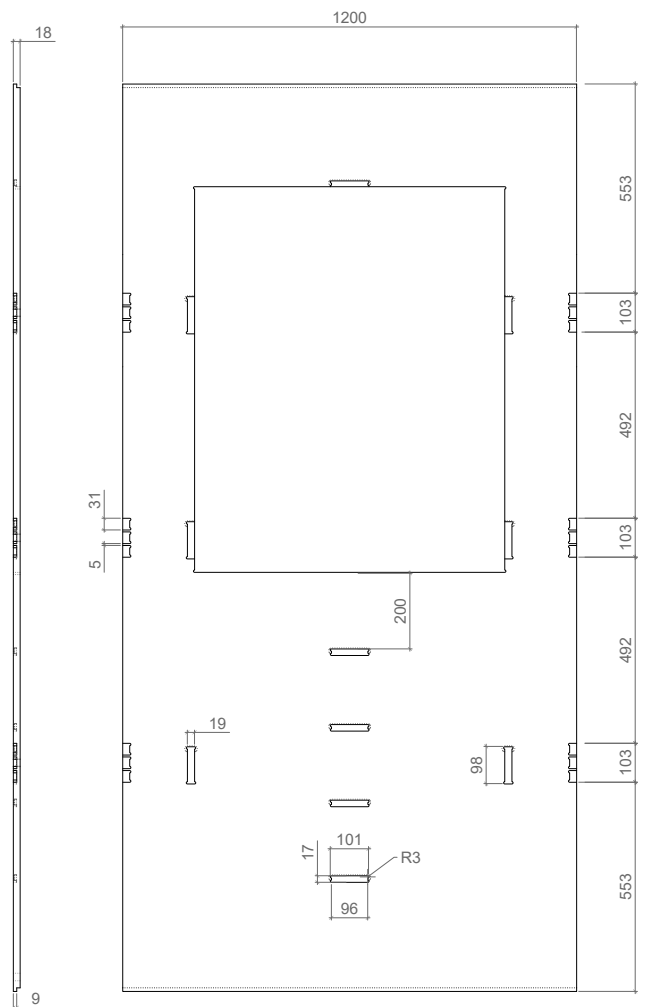
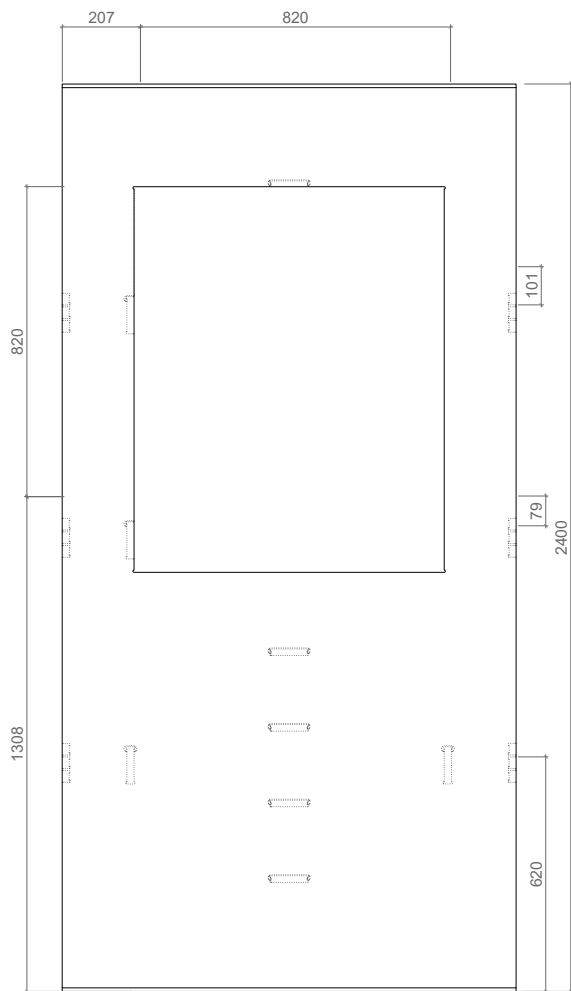
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.2.B - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.2B.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

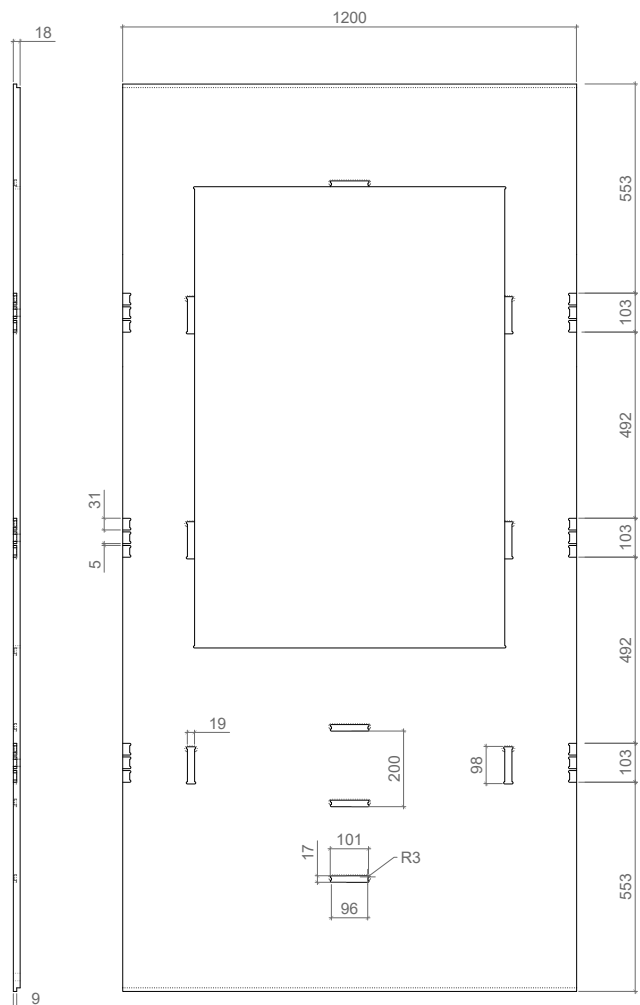
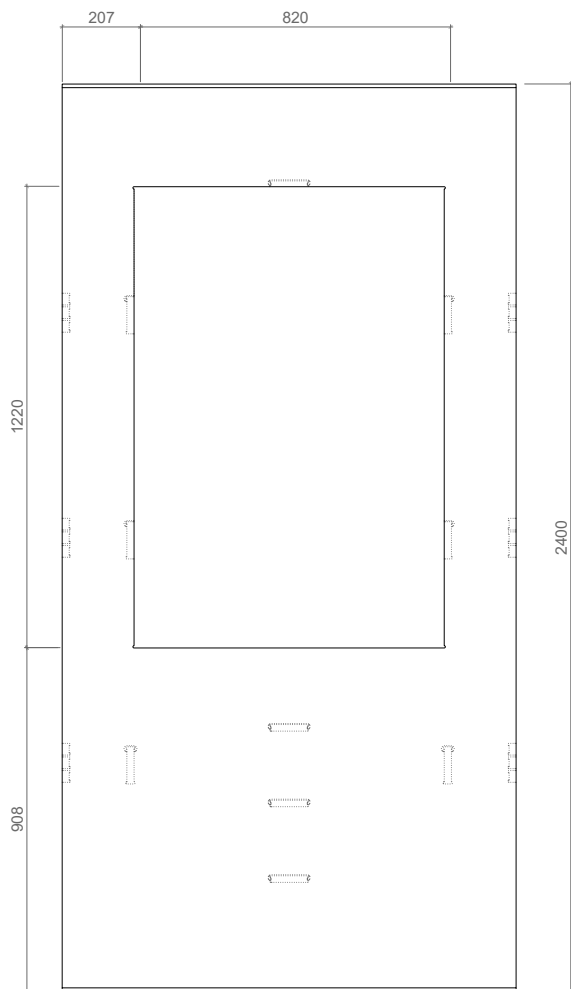
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.2.C - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.2C.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.2.D - Dimensões gerais

Escala:

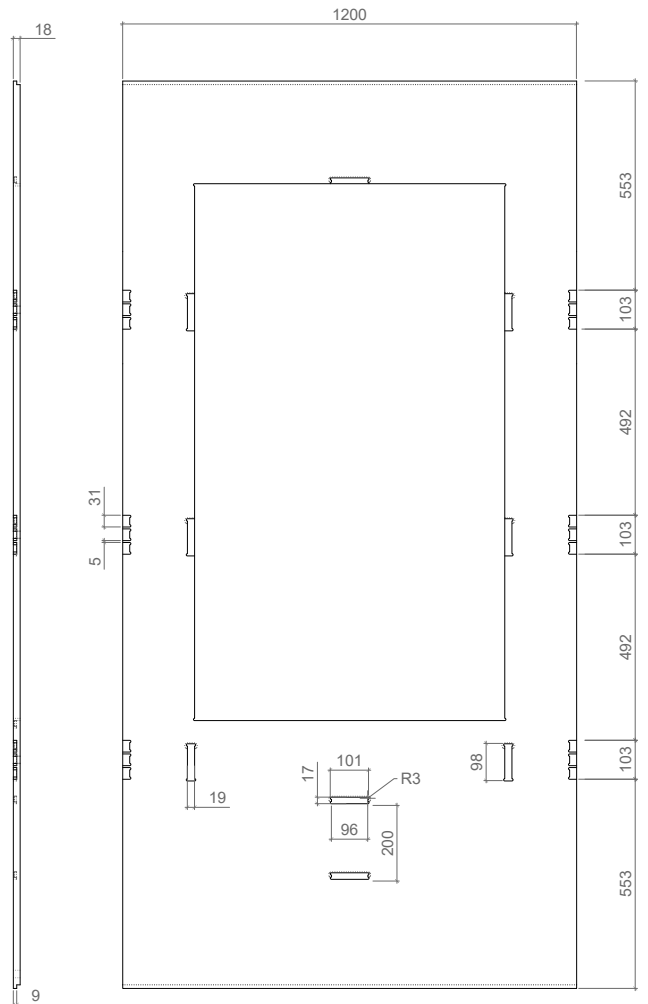
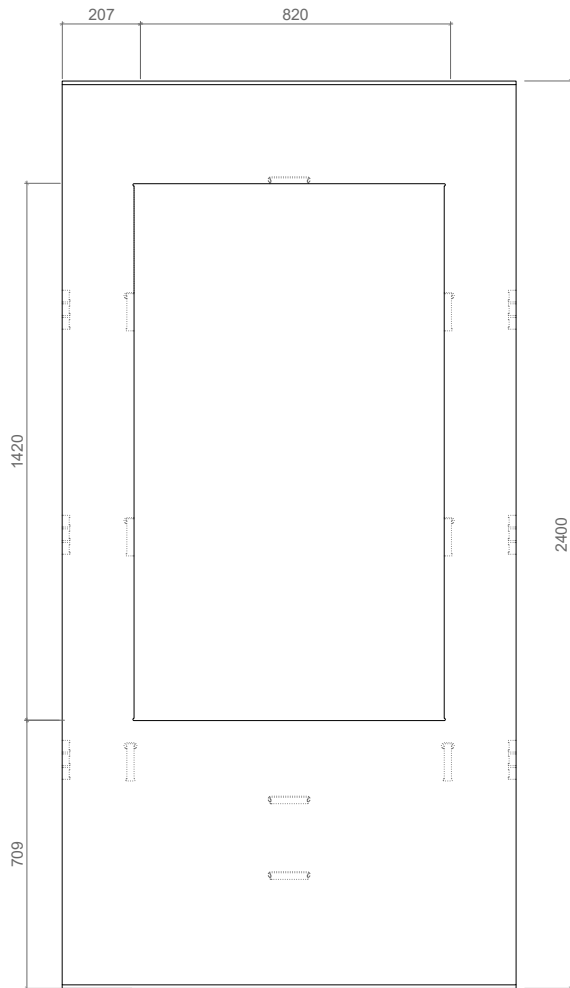
1/20

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.2D.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

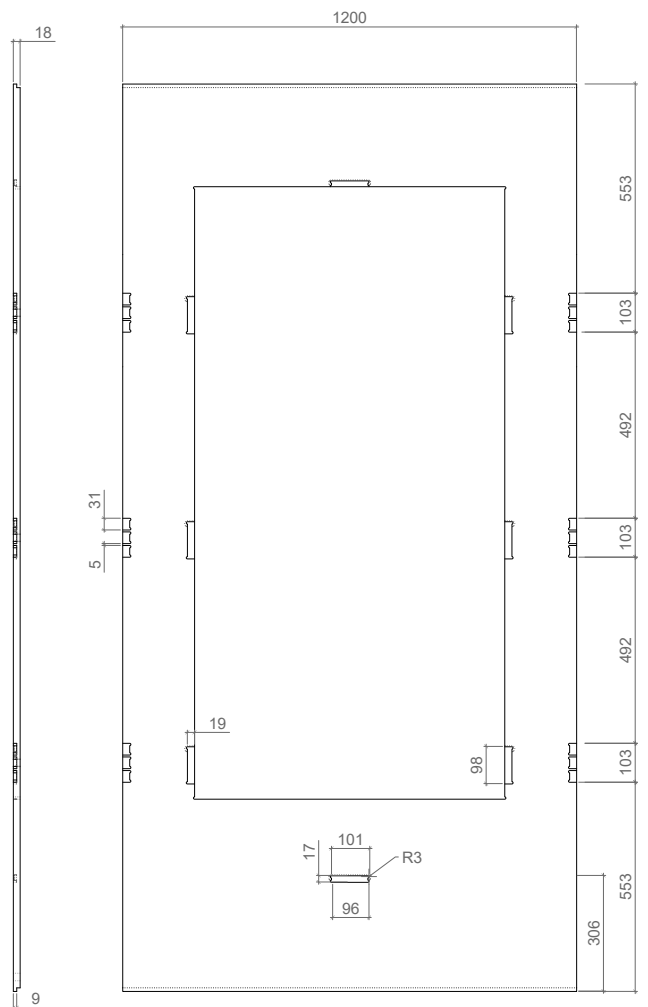
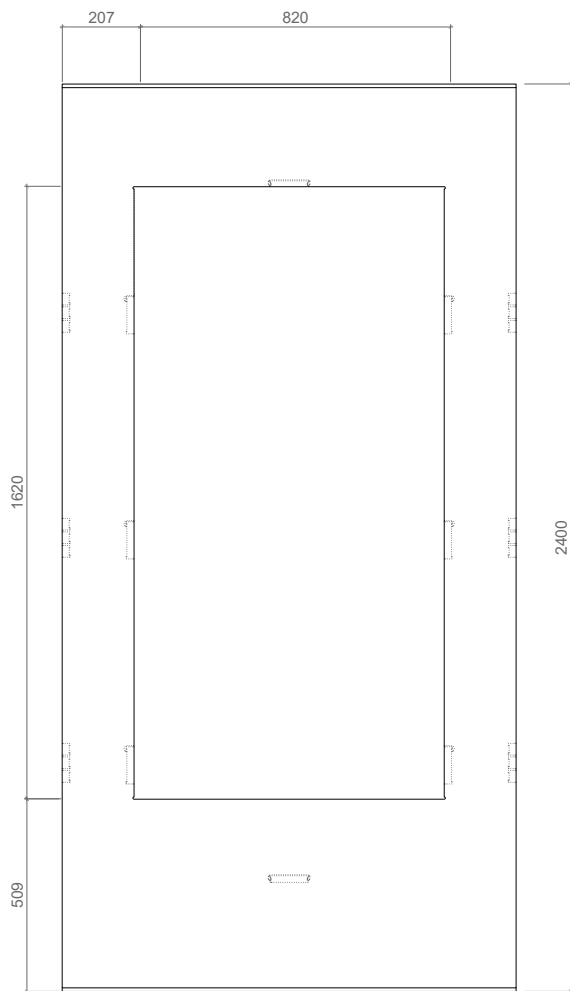
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.2 E - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.2E.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

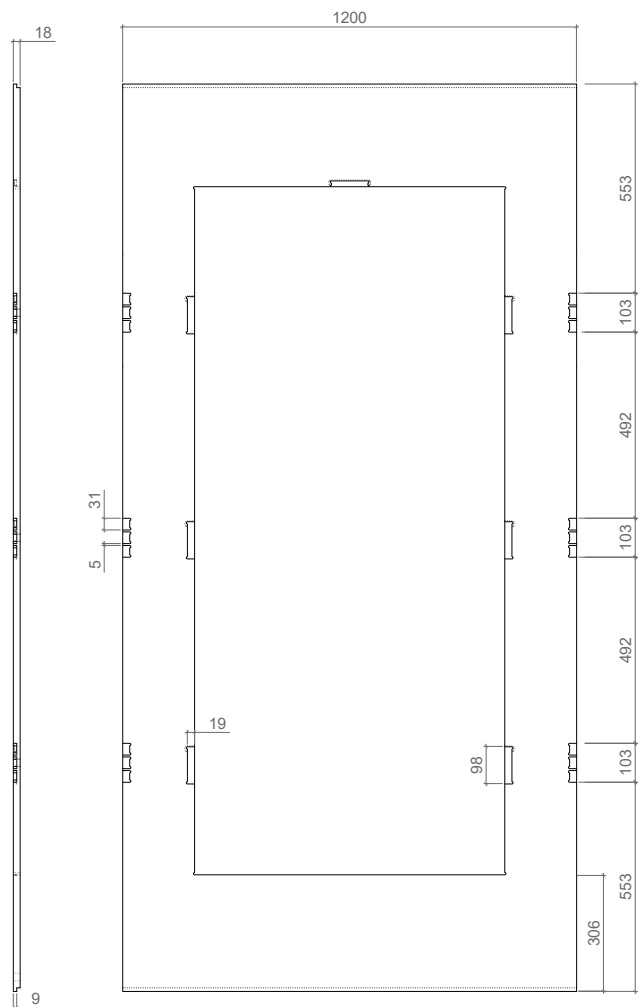
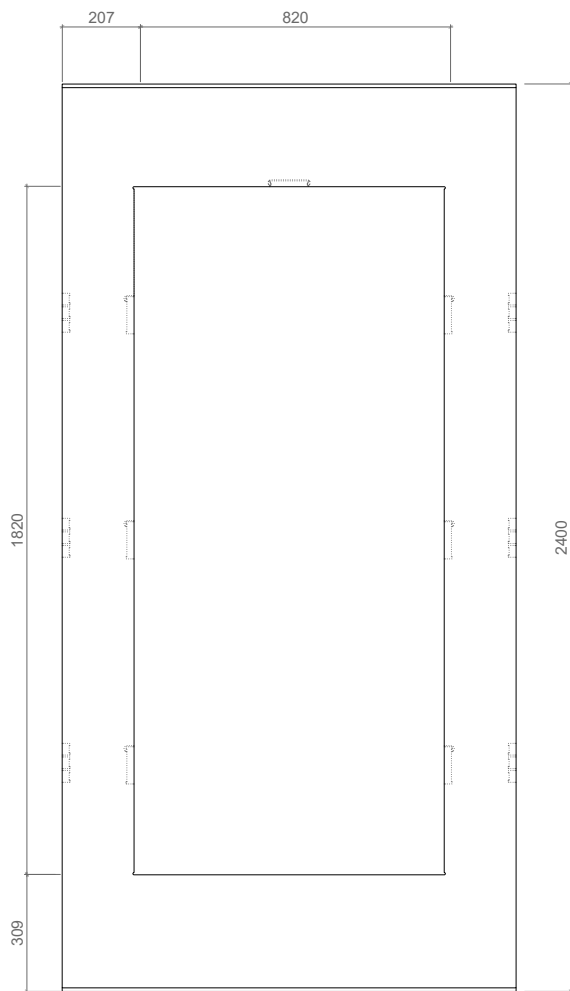
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.2 F - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.2F.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

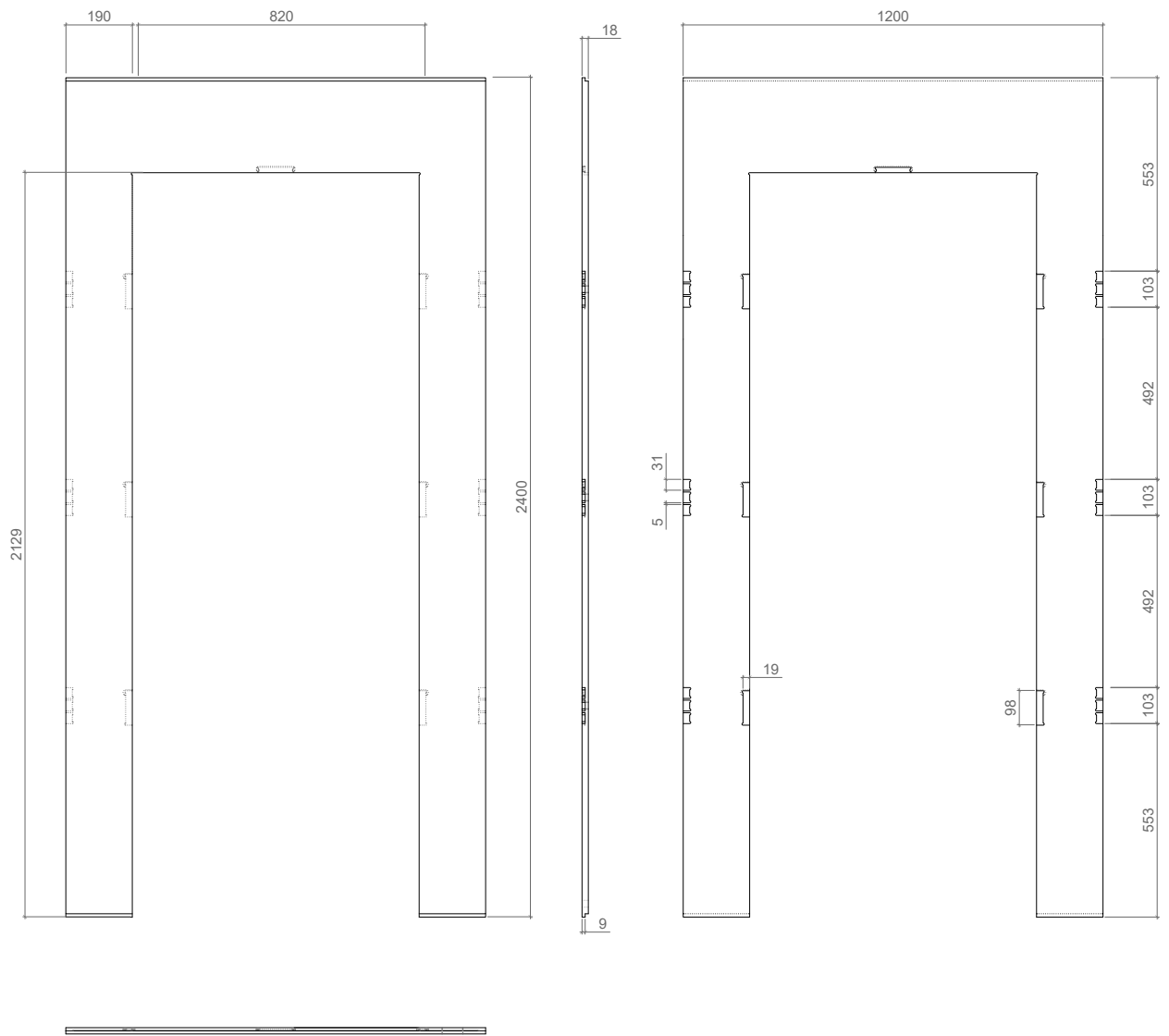
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.2 G - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.2G.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

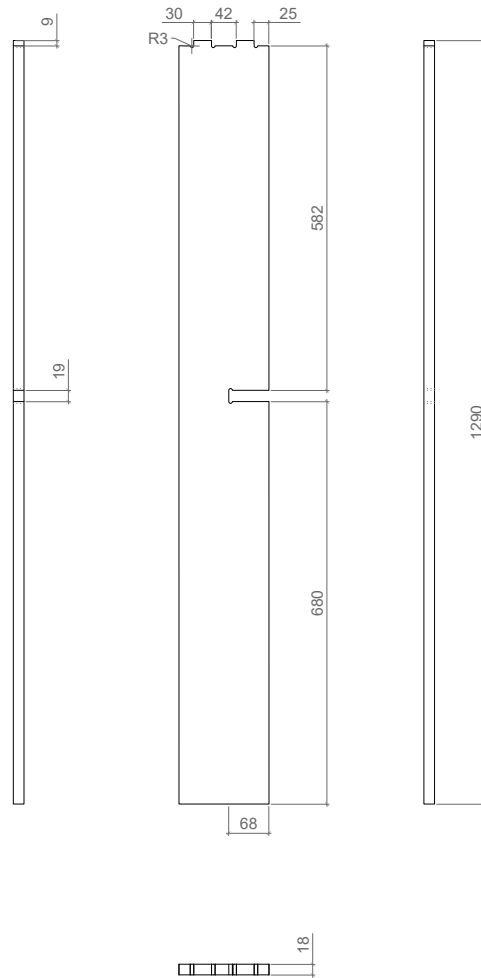
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.2 H - Dimensões gerais

Escala:
1/20

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.2H.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.3.B - Dimensões gerais

Escala:

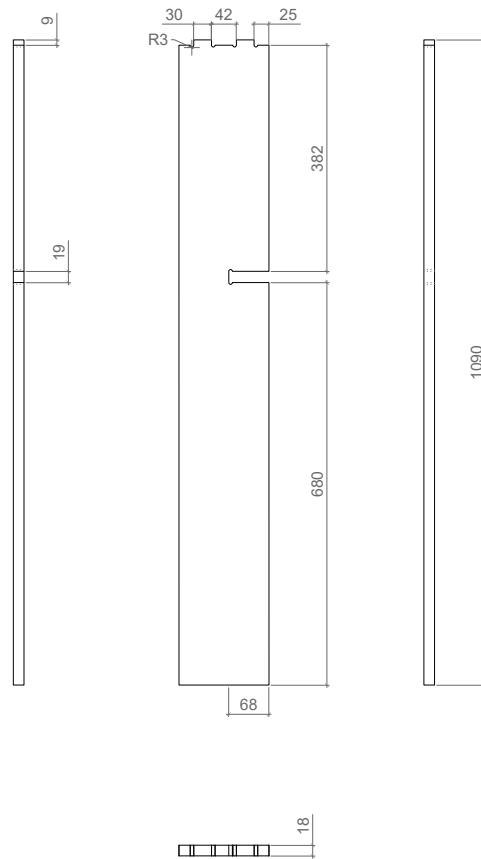
1/10

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.3B.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.3.C - Dimensões gerais

Escala:

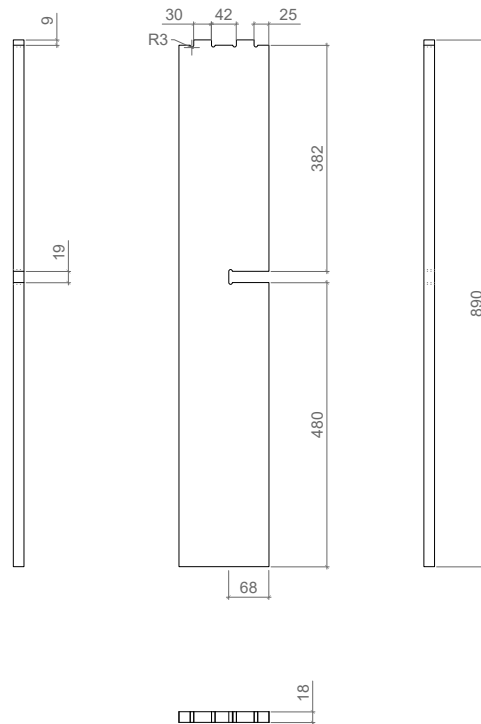
1/10

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.3C.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.3.D - Dimensões gerais

Escala:

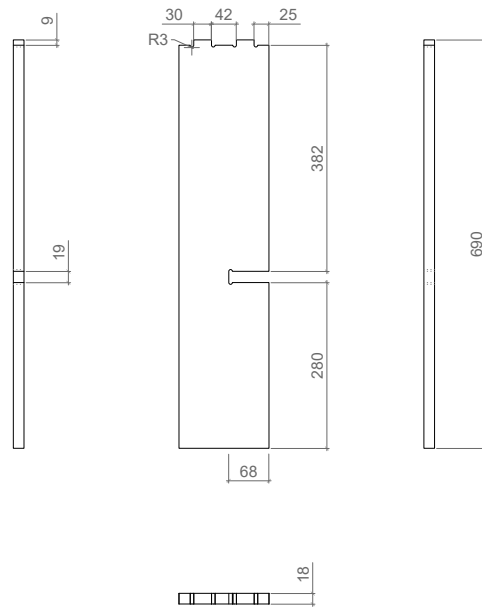
1/10

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.3D.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.3.E - Dimensões gerais

Escala:

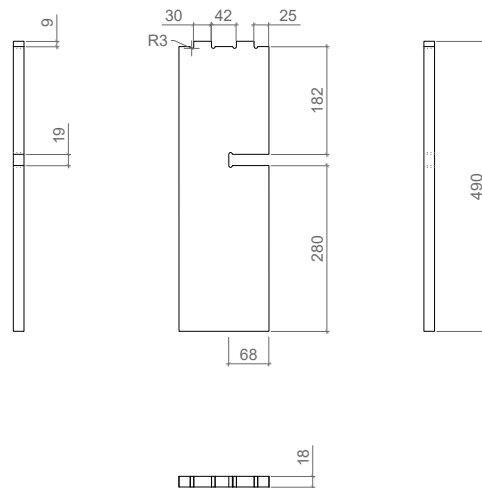
1/10

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.3E.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.3.F - Dimensões gerais

Escala:

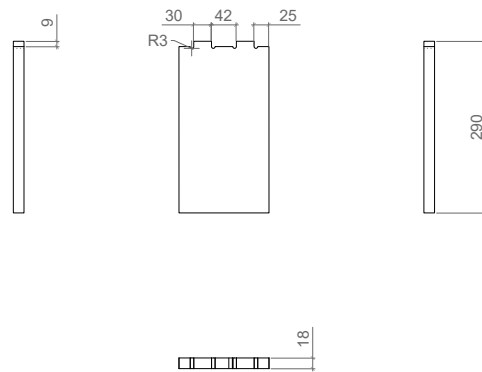
1/10

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.3F.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.3.G - Dimensões gerais

Escala:

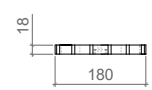
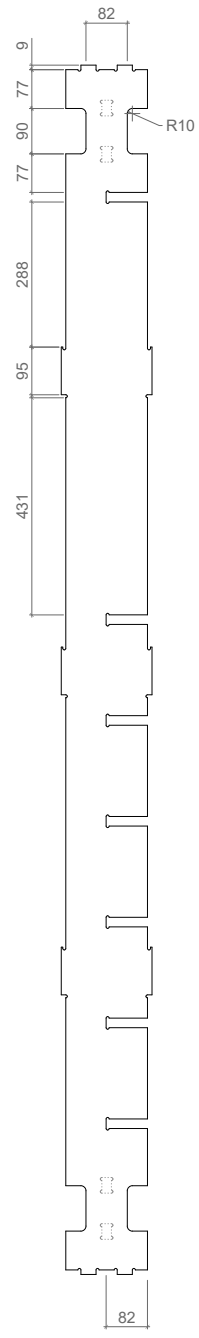
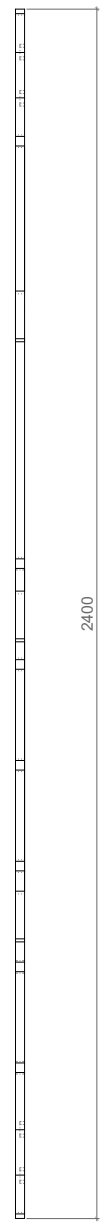
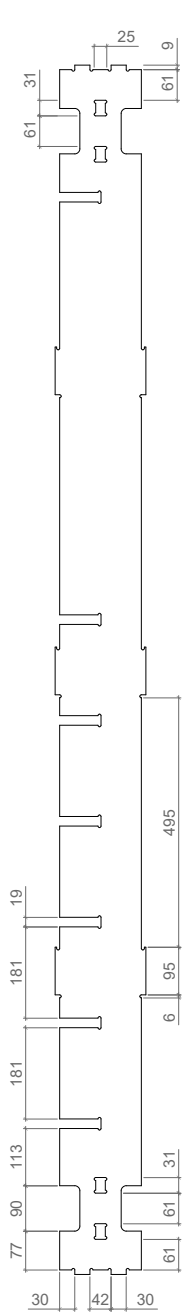
1/10

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.3G.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

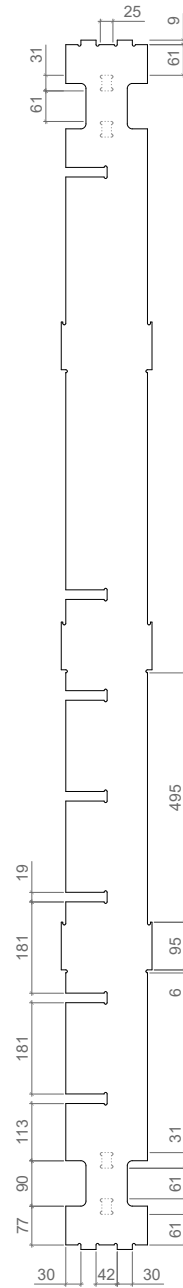
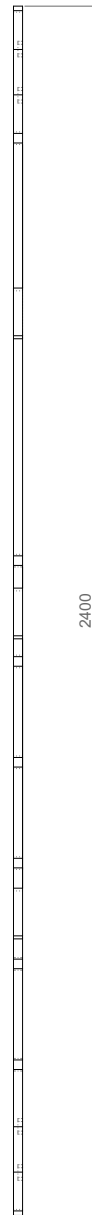
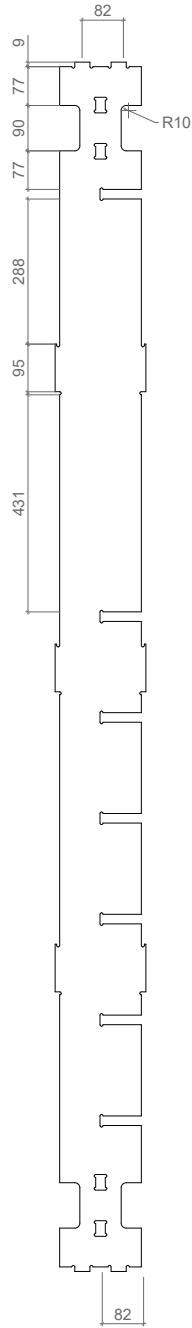
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.4 - Dimensões gerais

Escala:
1/15

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.4.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.5 - Dimensões gerais

Escala:

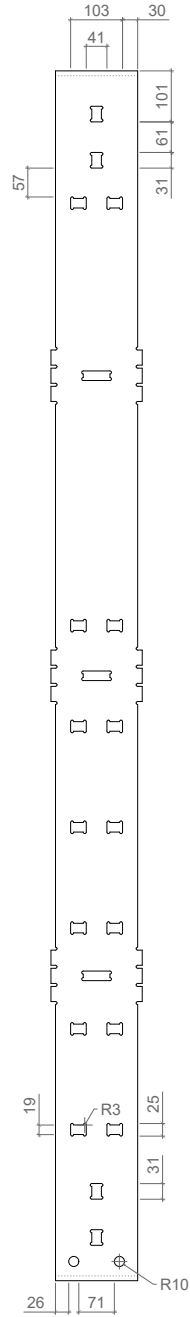
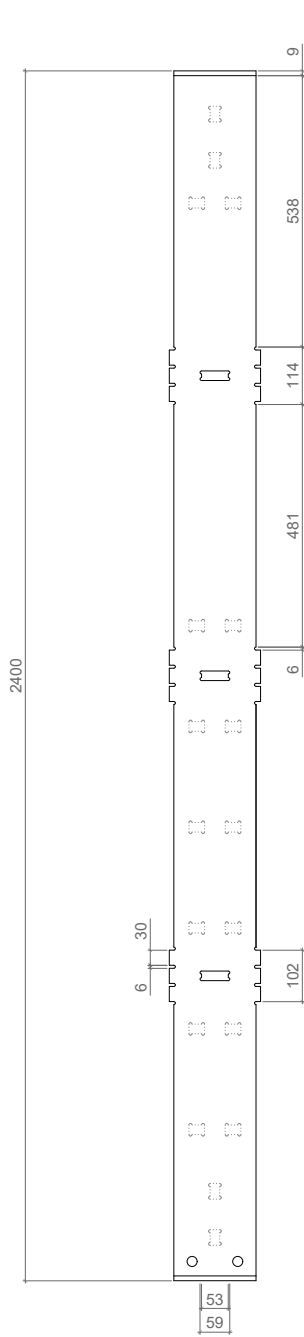
1/15

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.5.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.6 - Dimensões gerais

Escala:

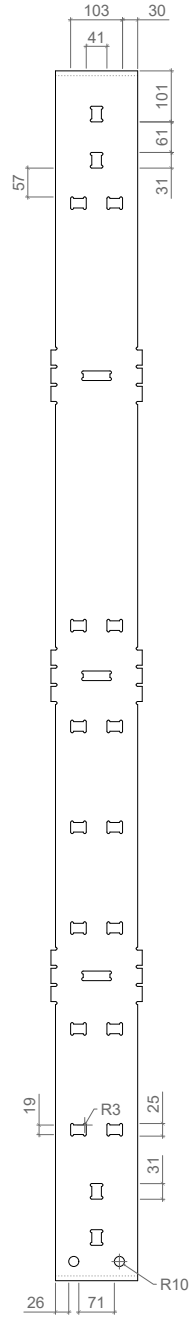
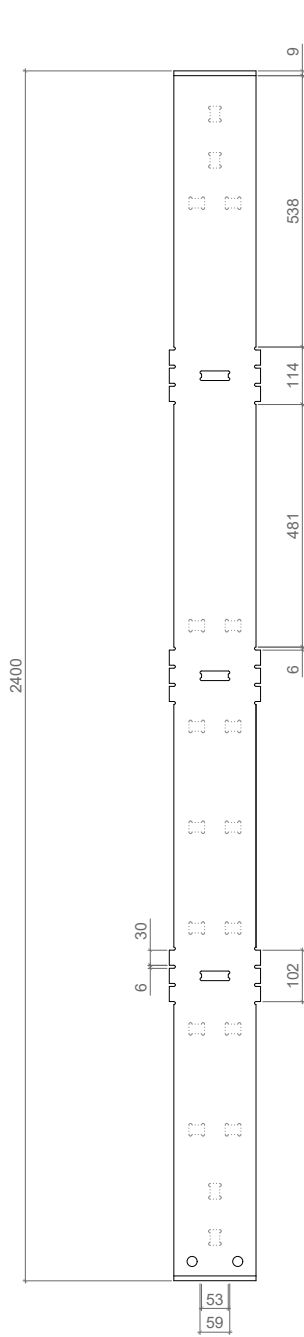
1/15

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.6.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

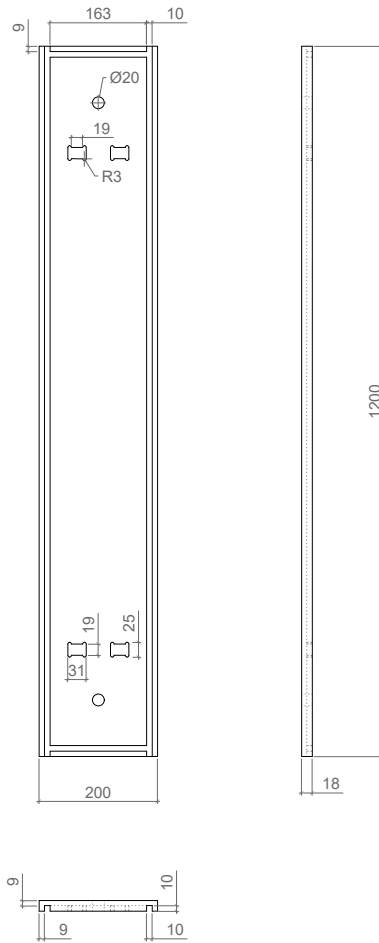
Conteúdo:
Módulo Loop: Peça P.7 - Dimensões gerais

Escala:
1/15

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.7.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

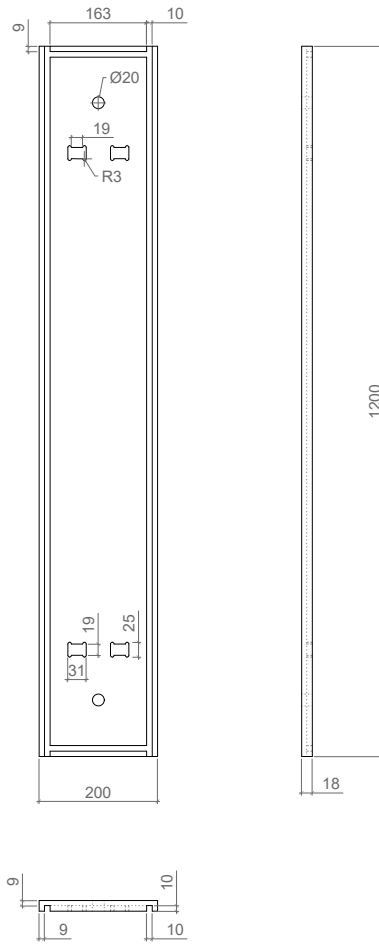
Conteúdo:
Módulo Loop: Peças P.8.- Dimensões gerais

Escala:
1/10

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.8.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

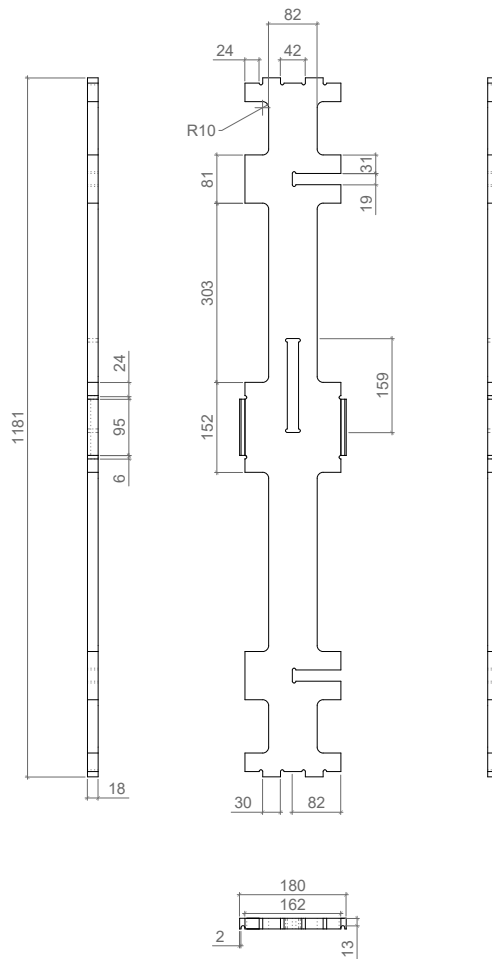
Conteúdo:
Módulo Loop: Peças P.9 - Dimensões gerais

Escala:
1/10

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.9.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.10 - Dimensões gerais

Escala:

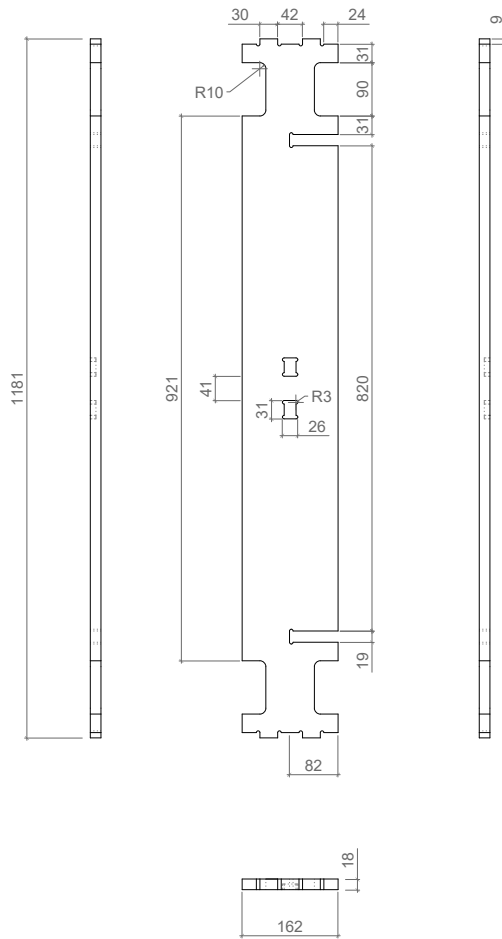
1/10

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.10.01



Autor:
Pedro Oliveira

Projeto:
Loop – Sistema de Construção Modular

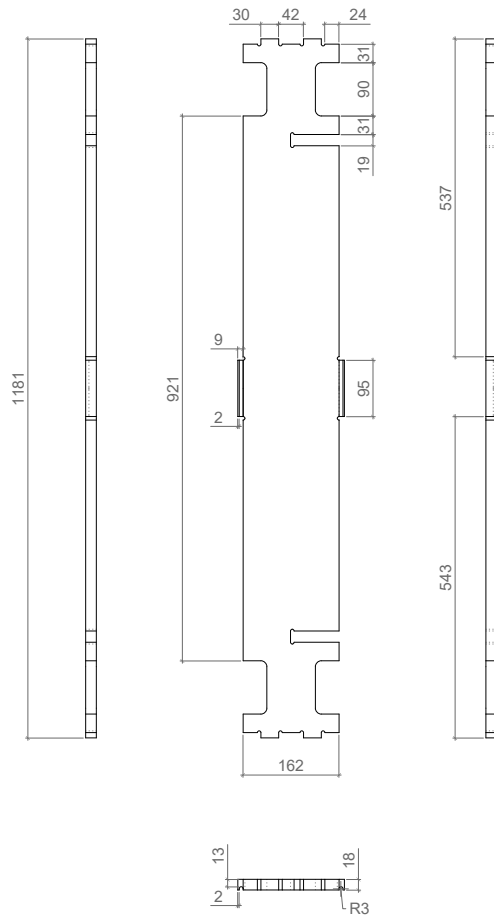
Conteúdo:
Módulo Loop: Peças P.11- Dimensões gerais

Escala:
1/10

Projeto de Mestrado

Data:
Agosto de 2025

LSCM.P.11.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peças P.12.- Dimensões gerais

Escala:

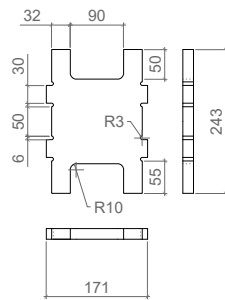
1/10

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.12.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peças P.13 - Dimensões gerais

Escala:

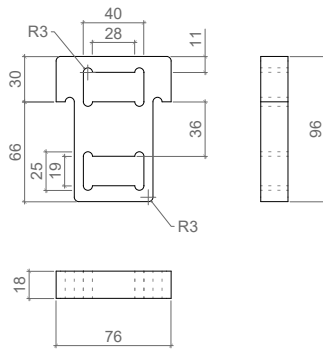
1/10

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.13.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.14 - Dimensões gerais

Escala:

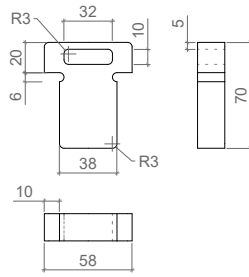
1/5

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.14.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P. 15 - Dimensões gerais

Escala:

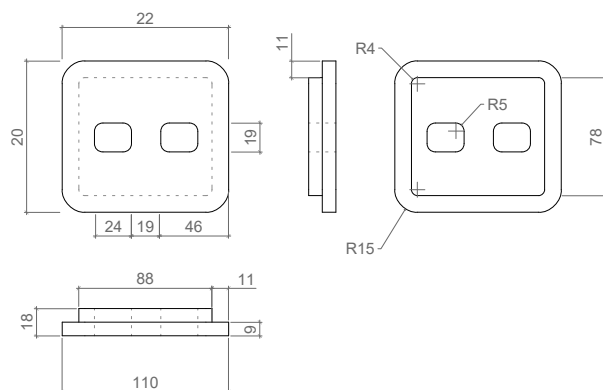
1/5

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.15.01



Autor:

Pedro Oliveira

Projeto:

Loop – Sistema de Construção Modular

Conteúdo:

Módulo Loop: Peça P.16 - Dimensões gerais

Escala:

1/5

Projeto de Mestrado

Data:

Agosto de 2025

LSCM.P.16.01