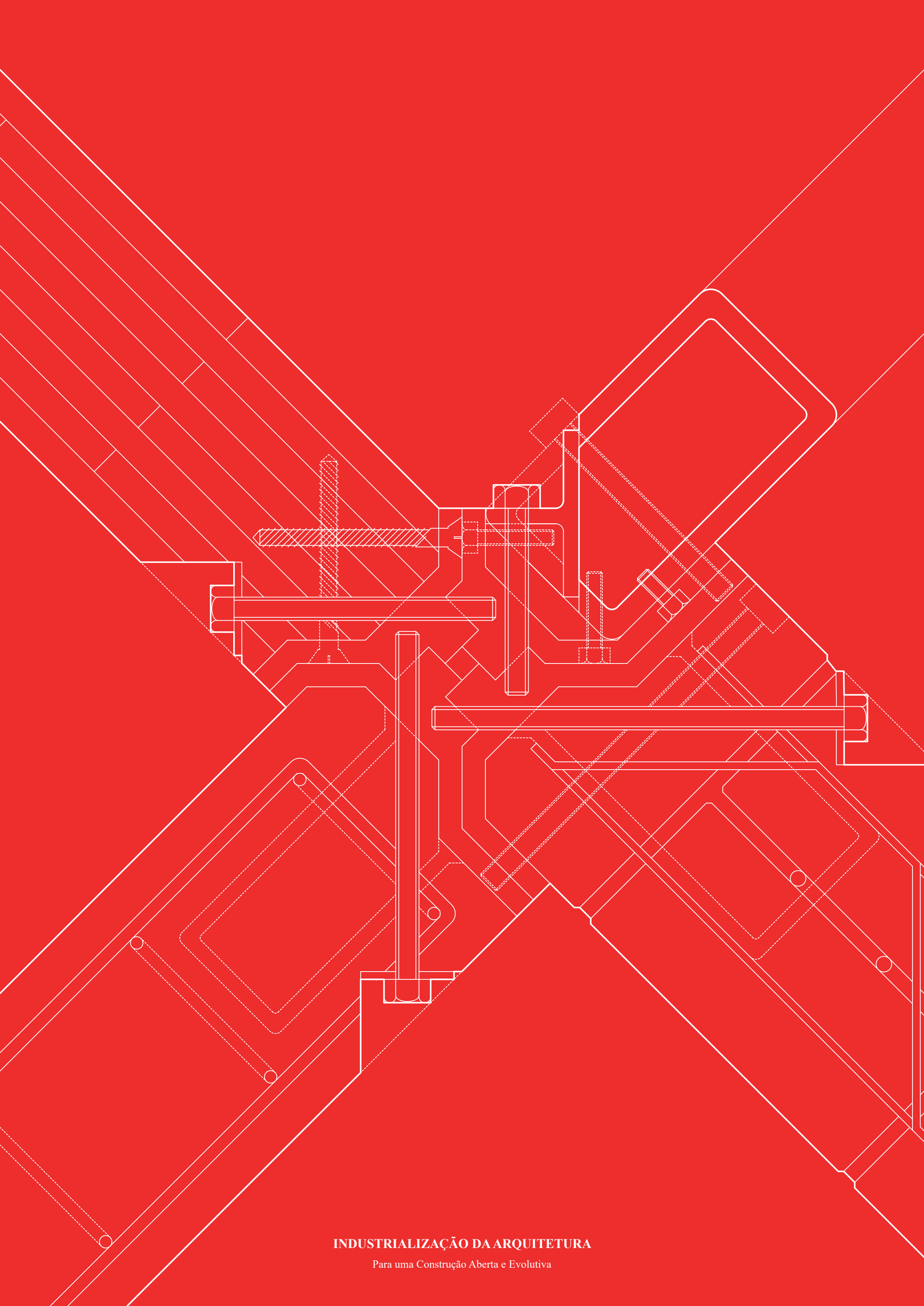




INDUSTRIALIZAÇÃO DA ARQUITETURA

Para uma Construção Aberta e Evolutiva



UNIVERSIDADE
AUTÓNOMA
DE LISBOA

Autor: Renato dos Santos Sobral

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura
Ano letivo 2024/25

Departamento de arquitetura. Mestrado em Arquitetura
Universidade Autónoma de Lisboa “Luís de Camões”

Orientação
Prof.^a Arquiteta Inês Varela Maia Lobo
Prof.^a Doutora Arquiteta Marta Sequeira Carneiro

2025
Lisboa

Resumo

Esta dissertação propõe o desenvolvimento de um novo sistema construtivo industrializado, concebido segundo os princípios da pré-fabricação e orientado para a criação de um modelo híbrido, versátil e adaptável. O sistema responde às urgências estruturais do sector da construção — ambientais, sociais e económicas — que se manifestam de forma diversa em geografias com diferentes níveis de desenvolvimento: escassez de mão de obra e ineficiência produtiva em contextos industrializados; informalidade construtiva, défices técnicos e escassez de recursos em regiões periféricas.

A proposta assenta numa solução de construção com painéis estruturais bidimensionais autoportantes, compatíveis com diferentes materiais, articulados por uma peça padronizada em alumínio, produzida através de impressão 3D. Este elemento, pensado como conector universal, permite múltiplas configurações espaciais, montagem rápida e precisa, e uma significativa redução da complexidade de obra. A possibilidade de fabricar localmente os componentes, através da exportação de ficheiros digitais, permite descentralizar a produção e adequar o sistema a contextos técnicos e logísticos distintos.

A investigação organiza-se em torno da análise crítica de cinco experiências históricas emblemáticas da industrialização da arquitetura, cada uma das quais correspondendo a um pilar conceptual do sistema proposto: a *Packaged House* de Gropius e Wachsmann, cuja solução de união universal (*wedge connector*) introduz o princípio da padronização modular; as *Maisons Démontables* de Jean Prouvé, onde a diversidade de materiais é articulada segundo critérios contextuais, técnicos e económicos; a *Dymaxion House* de Buckminster Fuller, cuja estrutura radial e núcleo técnico central exemplificam a versatilidade funcional de sistemas habitacionais adaptáveis; os hospitais da Rede Sarah, concebidos por João Filgueiras Lima (Lelé), nos quais se demonstram os benefícios operacionais de integrar produção e estaleiro através de coordenação modular e fábricas locais; e, por fim, os painéis pré-fabricados de terra compactada desenvolvidos por Martin Rauch, que utilizam materiais naturais de baixíssimo impacto ecológico.

A síntese destas cinco dimensões — padronização, diversidade matéria, versatilidade funcional, eficiência produtiva e circularidade — estrutura a concepção do sistema proposto. Este distingue-se por conjugar a racionalidade industrial com a abertura tecnológica e sensibilidade contextual, articulando flexibilidade geométrica, compatibilidade material e desmontabilidade como princípios operativos. Dois laboratórios de aplicação servem como ensaio crítico da proposta. Em Copenhaga, o sistema é testado num logradouro urbano, onde as restrições logísticas e espaciais exigem precisão no transporte e na montagem. Em Lisboa, numa zona industrial em transformação, o sistema é produzido no próprio estaleiro, articulando a construção com a requalificação produtiva local e prevendo a reconversão futura da fábrica para uso público.

A dissertação conclui com uma análise comparativa entre os casos históricos e os projetos experimentais, com base em indicadores de eficiência energética, tempo de execução, consumo de materiais e impacto ambiental. A proposta não pretende substituir a construção convencional, mas expandir o seu campo de ação através de uma arquitetura industrializada aberta, evolutiva e adequada aos desafios do século XXI.

Palavras Chave

Industrialização, Pré-fabricação, União, Sistema.

Abstract

This dissertation proposes the development of a new industrialized construction system, based on the logic of prefabrication and focused on creating a hybrid, flexible, and adaptable system. The proposal emerges as a response to the various challenges faced by the construction industry in different regions of the world, aiming to create an innovative, efficient, and sustainable solution that can be applied in diverse socioeconomic, cultural, and environmental contexts.

The system is based on the use of self-supporting two-dimensional structural panels, produced in different materials and joined by standardized 3D-printed aluminium connectors. These connectors act as universal interlocking elements, enabling the rapid assembly and disassembly of structures with high precision and requiring only a low level of specialized labor.

The dissertation begins with a critical analysis of historical industrialization initiatives in architecture, such as Gropius and Wachsmann’s Packaged House, Prouvé’s Maisons Démontables, Fuller’s Dymaxion House, Lelé’s mobile factories, and Martin Rauch’s earth panels, aiming to identify the main pillars of an effective industrial system. Five key pillars were identified: standardized connections; diversity of materials; functional flexibility; optimization of production and assembly; sustainability and openness to technological innovation.

Based on these pillars, a construction system is developed that brings together these ideals: Standardization and modularity, through repeatable elements and universal connectors that facilitate production and assembly; Material diversity and adaptability, allowing technical and environmental suitability for each location; Flexibility and functionality, ensuring compositional freedom and adaptability of spaces over time; Optimization of production and assembly, with streamlined manufacturing, fast assembly, and the potential for decentralized production through on-site 3D printing; Sustainability and circularity, with a focus on disassembly, component reuse, and the use of low environmental impact materials.

One of the main innovations of the proposed system is its versatility, allowing it to be implemented both in developed countries—where challenges include labor shortages, high construction costs, and sustainability demands—and in developing countries—where self-construction and technical limitations are prevalent. The dissertation also includes two case studies applied to two distinct urban contexts, in Copenhagen and Lisbon, demonstrating the practical effectiveness of the proposed system—its adaptability to different urban and climatic realities, and its potential to generate high-quality housing quickly, economically, and sustainably.

In conclusion, supported by graphs and concrete data comparing the case studies with the proposed system, it is shown that the advancement of digital technologies and industrial rationalization makes a new stage of industrialization in architecture possible—one that is smarter, more resilient, and more ecological. The proposed system represents a concrete attempt to transform the construction industry into a more efficient, clean, and flexible process, promoting an open, accessible, and future-ready industrialized architecture for the 21st century.

KeyWords

Industrialization, Pre-fabrication, Union, System.



Figura 2 — Gradiente cor/material.

	O Introdução A Industrialização como Resposta Linha Temporal		8
Casos de Estudo		Novo Sistema Proposto	
<i>Packaged House</i>	I Padronização das Uniões	Nó	14
<i>Maison Démontables</i>	II Diversidade Matérica	Painéis	30
<i>Dymaxion House</i>	III Versatilidade Funcional	Forma	56
Hospital Rede Sarah	IV Eficiência Produtiva	Indústria	70
<i>Ricola Herb Center</i>	V Circularidade	Durabilidade	90
	VI Aplicação do Sistema		104
	Copenhaga	Lisboa	
	VII Análise Gráficos Catálogo		170
	Índice de Imagens Referências Bibliográficas		6 176

Índice de imagens

- Figura 1 — Linha temporal. Autor: Renato Sobral.
- Figura 2 — Gradiente cor/material. Autor: Renato Sobral.
- Figura 3 — *Wedge-connector, General Panel System*. Autor: Renato Sobral.
- Figura 4 — Conector proposto. Autor: Renato Sobral.
- Figura 5 — Sistema de união, *General Panel System*. Autor: Renato Sobral.
- Figuras 6-8 — *Packaged House*. Burbank, Califórnia, Estados Unidos, 1950. Autores: Walter Gropius & Konrad Wachsmann. Créditos: Konrad-Wachsmann-Archiv. Fonte: Akademie der Künste, Berlin.
- Figuras 9-10 — *Packaged House*. Burbank, Califórnia, Estados Unidos, 1950. Autores: Walter Gropius & Konrad Wachsmann. Créditos: Busch-Reisinger Museum. Fonte: Harvard Art Museums / Busch-Reisinger Museum.
- Figura 11 — Sistema de união proposto. Autor: Renato Sobral.
- Figura 12 — Conector proposto. Autor: Renato Sobral.
- Figura 13 — Ancoragem e vedação da junta. Autor: Renato Sobral.
- Figura 14 — Posição dos conectores nas paredes. Autor: Renato Sobral.
- Figura 15 — Posição dos conectores nas lajes. Autor: Renato Sobral.
- Figura 16 — Isometria explodida do módulo base. Autor: Renato Sobral.
- Figura 17 — Junta entre paredes e laje. Autor: Renato Sobral.
- Figura 18 — Diversidade matérica, Maison Démontable. Autor: Renato Sobral.
- Figura 19 — Diversidade matérica proposta. Autor: Renato Sobral.
- Figura 20 — Sistema de painéis, Maison Démontable. Autor: Renato Sobral.
- Figuras 21-25 — *Maison Démontable* 8x8. Bezaumont, França, 1944-45. Autor: Jean Prouvé. Créditos: Fonds Jean Prouvé. Fonte: Centre Pompidou – MNAM/CCI, Bibliothèque Kandinsky, Dist. RMN-Grand Palais.
- Figuras 26-30 — *Maison Tropicque*. Niamey, Nigéria, 1949-1952. Autor: Jean Prouvé. Créditos: Eric Touchaleaume. Fonte: Arquivos Eric Touchaleaume / Galerie 54 – 2015.
- Figura 31 — Sistema de painéis proposto. Autor: Renato Sobral.
- Figura 32 — Tabela de materiais construtivos. Autor: Renato Sobral.
- Figuras 33-34 — Dimensões mínimas dos painéis estruturais por material. Autor: Renato Sobral.
- Figura 35 — Adaptação do conector a diferentes espessuras de painéis. Autor: Renato Sobral.
- Figura 36 — Adaptação da ancoragem a diferentes espessuras de painéis. Autor: Renato Sobral.
- Figura 37 — Fixação do conector a diferentes materiais. Autor: Renato Sobral.
- Figura 38 — Detalhe da união proposta. Autor: Renato Sobral.
- Figura 39 — Detalhe da união entre painéis de aço. Autor: Renato Sobral.
- Figura 40 — Detalhe da união entre painéis de CLT. Autor: Renato Sobral.
- Figura 41 — Detalhe da união entre painéis de betão-armado. Autor: Renato Sobral.
- Figura 42 — Detalhe da união entre painéis de tijolo maciço. Autor: Renato Sobral.
- Figura 43 — Tipologia da *Dymaxion House*. Autor: Renato Sobral.
- Figura 44 — Tipologia do sistema proposto. Autor: Renato Sobral.
- Figura 45 — Versatilidade funcional da *Dymaxion House*. Autor: Renato Sobral.
- Figuras 46-50 — *Dymaxion House*. Wichita, Estados Unidos, 1929-1947. Autor: Richard Buckminster Fuller. Créditos: Buckminster Fuller Institute. Fonte: Buckminster Fuller Institute.
- Figura 51 — Versatilidade funcional do sistema proposto. Autor: Renato Sobral.
- Figuras 52-53 — Catálogo da variedade formal dos painéis. Autor: Renato Sobral.
- Figura 54 — Catálogo de variedade de espaços. Autor: Renato Sobral.
- Figura 55 — Catálogo de variedade de projetos. Autor: Renato Sobral.
- Figura 56 — Fábrica CTRS. Autor: Renato Sobral.
- Figura 57 — Fábrica proposta. Autor: Renato Sobral.
- Figura 58 — Organização da fábrica CTRS. Autor: Renato Sobral.
- Figuras 59-63 — Hospital Sarah Rio. Rio de Janeiro, Brasil, 1994. Autor: João Filgueiras Lima. Créditos: Acervo pessoal de João Filgueiras Lima. Fonte: Arquivo pessoal do autor.
- Figura 64 — Organização da fábrica proposta. Autor: Renato Sobral.
- Figura 65 — Planta da fábrica proposta. Autor: Renato Sobral.
- Figura 66 — Isometria da oficina das impressoras 3D. Autor: Renato Sobral.
- Figura 67 — Isometria da oficina metalúrgica. Autor: Renato Sobral.
- Figura 68 — Isometria da oficina dos pré-moldados. Autor: Renato Sobral.
- Figura 69 — Isometria da oficina das marcenarias pesadas. Autor: Renato Sobral.
- Figura 70 — Isometria da oficina das marcenarias leves. Autor: Renato Sobral.
- Figura 71 — Padronização de componentes. Autor: Renato Sobral.
- Figura 72 — Transporte de componentes. Autor: Renato Sobral.
- Figura 73 — Método de montagem proposto. Autor: Renato Sobral.
- Figura 74 — Painel de *Rammed Earth*. Autor: Renato Sobral.
- Figura 75 — Painel reutilizável proposto. Autor: Renato Sobral.
- Figura 76 — Circularidade de *Rammed Earth*. Autor: Renato Sobral.
- Figuras 77-81 — *Ricola Herb Center*. Laufen, Suíça, 2010-2014. Autores: Herzog & de Meuron. Créditos: Markus Buhler. Fonte: Arquivo fotográfico Markus Bühler.
- Figura 82 — Circularidade do sistema proposto. Autor: Renato Sobral.
- Figura 83 — Sistema de desmontagem. Autor: Renato Sobral.
- Figura 84 — Sistema de expansão. Autor: Renato Sobral.
- Figura 85 — União a sistemas convencionais. Autor: Renato Sobral.
- Figura 86 — Detalhe da união a sistemas convencionais. Autor: Renato Sobral.
- Figura 87 — Ortofoto do projeto de Copenhaga. Autor: Renato Sobral.
- Figura 88 — Ortofoto do projeto de Lisboa. Autor: Renato Sobral.
- Figura 89 — Isometria do projeto de Copenhaga. Autor: Renato Sobral.
- Figura 90 — Ortofoto do projeto de Copenhaga. Autor: Renato Sobral.
- Figura 91 — Planta de implantação. Autor: Renato Sobral.
- Figura 92 — Estratégia de implantação do projeto. Autor: Renato Sobral.
- Figura 93 — Planta do logradouro. Autor: Renato Sobral.
- Figura 94 — Cortes transversais pelo logradouro. Autor: Renato Sobral.

Figura 95 — Corte transversal. Autor: Renato Sobral.

Figura 96 — Planta da tipologia. Autor: Renato Sobral.

Figura 97 — Isometria explodida da tipologia. Autor: Renato Sobral.

Figura 98 — Isometria da infraestrutura. Autor: Renato Sobral.

Figura 99 — Isometria do saguão e dos módulos. Autor: Renato Sobral.

Figura 100 — Módulos pré-fabricados de cozinha. Autor: Renato Sobral.

Figura 101 — Módulos pré-fabricados de casa de banho. Autor: Renato Sobral.

Figura 102 — Corte em isometria. Autor: Renato Sobral.

Figura 103 — Corte construtivo. Autor: Renato Sobral.

Figura 104 — Detalhe construtivo do embasamento. Autor: Renato Sobral.

Figuras 105-106 — Detalhe construtivo do corpo. Autor: Renato Sobral.

Figura 107 — Detalhe construtivo da cobertura. Autor: Renato Sobral.

Figura 108 — Isometria explodida da habitação. Autor: Renato Sobral.

Figura 109 — Isometria da habitação. Autor: Renato Sobral.

Figuras 110-111 — Catálogo de peças usadas. Autor: Renato Sobral.

Figura 112 — Isometria do projeto de Lisboa. Autor: Renato Sobral.

Figura 113 — Ortofoto de Lisboa. Autor: Renato Sobral.

Figura 114 — Planta de implantação. Autor: Renato Sobral.

Figura 115 — Estratégia de implantação do projeto. Autor: Renato Sobral.

Figura 116 — Planta da zona industrial. Autor: Renato Sobral.

Figura 117 — Planta da zona habitacional. Autor: Renato Sobral.

Figura 118 — Cortes transversais do quarteirão. Autor: Renato Sobral.

Figura 119 — Corte transversal. Autor: Renato Sobral.

Figura 120 — Planta das tipologias. Autor: Renato Sobral.

Figura 121 — Isometria explodida das tipologias. Autor: Renato Sobral.

Figura 122 — Isometria da infraestrutura. Autor: Renato Sobral.

Figura 123 — Isometria do saguão e dos módulos. Autor: Renato Sobral.

Figura 124 — Módulos pré-fabricados de cozinha. Autor: Renato Sobral.

Figura 125 — Módulos pré-fabricados de casa de banho. Autor: Renato Sobral.

Figura 126 — Corte em isometria. Autor: Renato Sobral.

Figura 127 — Corte construtivo. Autor: Renato Sobral.

Figura 128 — Detalhe construtivo do embasamento. Autor: Renato Sobral.

Figuras 129-130 — Detalhe construtivo do corpo. Autor: Renato Sobral.

Figura 131 — Detalhe construtivo da cobertura. Autor: Renato Sobral.

Figura 132 — Isometria explodida da habitação. Autor: Renato Sobral.

Figura 133 — Isometria da habitação. Autor: Renato Sobral.

Figuras 134-135 — Catálogo de peças usadas. Autor: Renato Sobral.

Figura 136 — Gráfico síntese. Autor: Renato Sobral.

0

0

0

0

INTRODUÇÃO

Introdução

A presente dissertação propõe-se a desenvolver um sistema construtivo industrializado capaz de responder, de forma eficaz e contextualizada, às urgências contemporâneas do setor da construção — de natureza ambiental, social e económica. Trata-se de um sistema híbrido, constituído por painéis estruturais bidimensionais de montagem simplificada, cuja lógica estrutural visa não apenas a eficiência produtiva, mas também a adaptabilidade a distintos contextos geográficos, climáticos e socioeconómicos.

As dificuldades que afetam o sector variam consoante o grau de desenvolvimento das regiões analisada. Nos países mais desenvolvidos, a construção atravessa uma crise estrutural, marcada pela escassez de mão de obra qualificada, pela degradação das condições laborais, pelo aumento dos custos de produção e por uma resposta claramente insuficiente à crise habitacional. A estes fatores somam-se os impactos ambientais associados a práticas construtivas intensivas e pouco eficientes. Já nos países em desenvolvimento, os desafios são de outra natureza, embora igualmente estruturais: infraestruturas básicas precárias ou inexistentes, predominância da construção informal, carência de profissionais qualificados, escassez de recursos financeiros e materiais, ausência de regulamentação técnica eficaz e um défice habitacional generalizado. Em ambos os casos, a industrialização do sector da construção emerge como uma alternativa promissora à obsolescência do modelo tradicional, permitindo a transição de uma lógica fragmentada para uma abordagem integrada e previsível, inspirada nos paradigmas da indústria transformadora.

Esta transição tem raízes profundas. A Revolução Industrial dos séculos XVIII e XIX representou uma transformação paradigmática na sociedade moderna, promovendo a substituição do trabalho artesanal pela produção mecanizada em massa. Inicialmente impulsionado pelos setores têxtil e metalúrgico, este modelo produtivo transbordou progressivamente para outros domínios, incluindo a arquitetura. A industrialização trouxe consigo não apenas novas tecnologias e materiais, mas também novas formas de pensar e construir, transformando radicalmente os processos construtivos e a relação entre projetista, material e edifício.

Foi neste contexto que Joseph Paxton concebeu o *Crystal Palace*, em 1851 — uma das primeiras obras a incorporar princípios industriais na arquitetura. Montado em apenas 17 semanas com componentes pré-fabricados em ferro e vidro, o edifício destacava-se não apenas pela sua escala e transparência, mas também pela inovação técnica, nomeadamente o uso sistemático de parafusos e porcas padronizadas. Este gesto pioneiro antecipava já a lógica dos sistemas modulares que viriam a marcar o século XX.

Mais tarde, perante a urgência de soluções habitacionais acessíveis, arquitetos como Frank Lloyd Wright exploraram o potencial da industrialização na construção residencial. As casas usonianas, concebidas durante a Grande Depressão, incorporavam sistemas modulares, materiais locais e componentes normalizados, aproximando o ato de construir de um processo industrial. Wright introduziu uma racionalidade construtiva que permitia reduzir custos sem abdicar de uma arquitetura de qualidade, demonstrando que a standardização e a repetição podiam coexistir com a singularidade do projeto arquitetónico.

Ao longo do século XX, multiplicaram-se outras experiências que procuraram industrializar a arquitetura — com maior ou menor êxito. No entanto, apesar do seu valor experimental e conceptual, muitos destes sistemas revelaram limitações em termos de rigidez formal, dependência de materiais únicos, baixa adaptabilidade, complexidade logística ou escassa replicabilidade em contextos distintos. Foi a partir destes antecedentes que se consolidou o entendimento de que a industrialização, para ser eficaz, precisa de combinar inovação tecnológica com flexibilidade operativa.

Hoje, a industrialização da construção evolui de forma desigual à escala global, condicionada por fatores estruturais, económicos e tecnológicos. Nos contextos mais avançados, já se verifica a integração de processos como a pré-fabricação, automação, impressão 3D e construção modular, o que se traduz num aumento de produtividade, na redução de custos e na implementação de práticas construtivas mais sustentáveis. Em contrapartida, nos contextos menos desenvolvidos, persistem os métodos tradicionais, fortemente dependentes de mão de obra intensiva e de equipamentos rudimentares. Nestas regiões, a autoconstrução continua a ser a principal forma de edificação, sobretudo em zonas urbanas informais, onde a ausência de regulamentação agrava os problemas de segurança, salubridade e durabilidade das construções.

Ao aplicar princípios industriais à construção, é possível deslocar grande parte do processo para ambientes controlados, como fábricas ou oficinas, onde os componentes são produzidos com maior precisão e eficiência. Posteriormente, estes elementos são transportados e montados no local com prazos reduzidos, menor desperdício e elevado controlo de qualidade. Esta mudança de paradigma — da obra como local de produção para a obra como local de montagem — constitui uma das mais significativas transformações na história recente da construção.

Paradoxalmente, apesar de ser um dos motores da economia global, representando cerca de 13% do Produto Interno Bruto global e empregando mais de 7% da força de trabalho mundial¹, o sector da construção é um dos que apresenta menores níveis de produtividade. Permanece profundamente dependente de mão de obra intensiva, sujeita a condições de trabalho inseguras, marcadas frequentemente pela informalidade e por baixos índices de qualificação técnica.

Do ponto de vista ambiental, os impactos do sector da construção são avassaladores. A edificação e a operação dos edifícios consomem cerca de 37% da energia global² e são responsáveis por 42% das emissões de gases com efeito de estufa. Só a produção de cimento — material fundamental na composição do betão — é responsável por 11% das emissões globais de CO₂.³ A construção civil consome ainda aproximadamente metade dos recursos naturais extraídos do planeta e gera enormes quantidades de resíduos sólidos, grande parte dos quais não é convenientemente reaproveitada.

1 RYFAN – «Construction Conundrum». [Em linha]. [S.l.]: Ryfan, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ryfan.ca/company/construction-conundrum?.com>. [Consultado em: 12 jun. 2025].

2 GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – 2022 *Global Status Report for Buildings and Construction*. [Em linha]. [S.l.]: Global ABC, UNEP, 2022. Disponível em: https://globalabc.org/sites/default/files/2022-11/FULL%20REPORT_2022%20Buildings-GSR_1.pdf. [Consultado em: 12 jun. 2025].

3 ARCHITECTURE 2030 – «Why The Built Environment». [Em linha]. [S.l.]: Architecture 2030, 2023. Disponível em: <https://www.architecture2030.org/why-the-built-environment/>. [Consul-

4 ZHOU, Fang [et al.] – «Analyze Differences in Carbon Emissions from Traditional and Prefabricated Buildings Combining the Life Cycle». *Buildings* [Em linha], vol. 13, n.º 4 (2023), artigo 874. ISSN 2075-5309.

5 MODULAR BUILDING INSTITUTE – «How Modular Construction Leads to Zero-Waste and Eco-Efficiency». [Em linha]. [S.l.]: *Modular Building Institute*, 26 dez. 2023. Disponível em: <https://www.modular.org/2023/12/26/how-modular-construction-leads-to-zero-waste-and-eco-efficiency/>. [Consultado em: 12 jun. 2025].

Neste cenário, a industrialização da construção apresenta-se não apenas como uma solução necessária, mas como uma estratégia decisiva. Permite melhorar o controlo de qualidade, otimizar o uso de recursos, reduzir o desperdício e promover melhores condições laborais. Alguns estudos indicam que edifícios pré-fabricados podem emitir até 40% menos CO₂ por metro quadrado construído⁴ e gerar até 90% menos resíduos, quando comparados com a construção convencional.⁵ Para além disso, sistemas construtivos industrializados permitem ainda uma maior previsibilidade orçamental e temporal, ao mesmo tempo que aumentam a segurança no estaleiro, ao reduzirem a exposição dos trabalhadores aos riscos inerentes à construção tradicional.

Com base nestes pressupostos, esta dissertação propõe o desenvolvimento de um sistema construtivo híbrido de painéis estruturais, que procura aliar a racionalidade produtiva da indústria com a flexibilidade necessária para dar resposta a diferentes contextos. Trata-se de um sistema composto por painéis bidimensionais, ligados entre si por uma única peça padronizada em alumínio, produzida por impressão 3D. Esta peça, desenhada para permitir um encaixe preciso, dispensa ferramentas especializadas no local, simplificando o processo de montagem e diminuindo substancialmente a margem de erro humano. A sua produção pode ser descentralizada — isto é, realizada nas imediações da obra — bastando, para tal, o envio do ficheiro digital para uma impressora 3D local. Esta estratégia viabiliza a exportação da tecnologia sem a necessidade de transportar fisicamente grandes volumes.

A opção por elementos bidimensionais, em detrimento de módulos tridimensionais, constitui uma decisão estratégica. Os painéis planos não só facilitam a adaptação ao terreno e ao programa, como também maximizam a eficiência logística, reduzindo o número de transportes e, consequentemente, as emissões de carbono associadas. Estima-se, por exemplo, que um camião possa transportar várias vezes mais componentes bidimensionais do que módulos volumétricos. Já os espaços de maior complexidade técnica — como cozinhas e instalações sanitárias — são resolvidos através de módulos técnicos independentes, pré-fabricados e facilmente integráveis no conjunto.

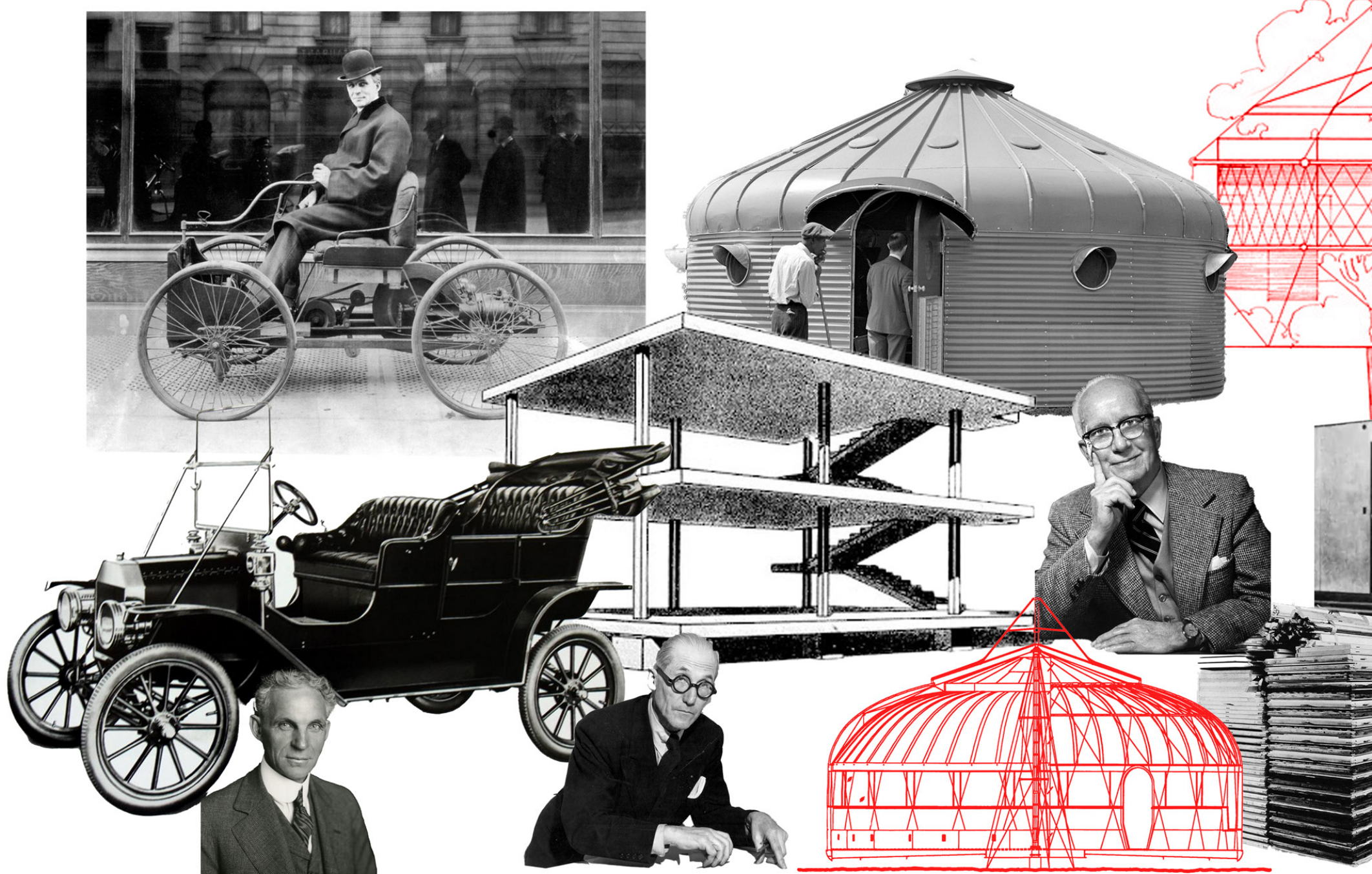
A versatilidade do sistema é uma premissa central. A compatibilidade com diferentes materiais — adaptáveis a climas tropicais, temperados ou áridos — e a possibilidade de operar com distintos graus de industrialização tornam-no apto para ser implementado tanto em áreas urbanas densamente construídas como em zonas de emergência ou reconstrução.

Esta investigação inscreve-se num campo já densamente explorado por propostas históricas pioneiras. Projetos como o *Crystal Palace* de Joseph Paxton, a *Packaged House* de Gropius e Wachsmann, as *Maisons Démontables* e Jean Prouvé, a *Dymaxion House* de Buckminster Fuller, os hospitais da Rede Sarah de João Filgueiras Lima (Lelé) e os painéis de terra compactada de Martin Rauch representam diferentes tentativas de industrializar a arquitetura, cada uma com o seu grau de inovação técnica e ambição sistémica. Contudo, apesar do seu valor experimental e conceptual, estes modelos revelaram limitações específicas: rigidez formal, dependência de materiais únicos, baixa adaptabilidade, complexidade logística ou fraca replicabilidade em contextos diversos.

É nesse sentido que esta dissertação propõe um avanço sobre o estado da arte, através de um sistema construtivo que responde de forma mais abrangente aos desafios técnicos, logísticos, ambientais e sociais da construção contemporânea. Este contributo concretiza-se na concepção de um conector universal impresso em 3D que permite múltiplas configurações formais com um número reduzido de peças; na integração de diversidade material com base nas propriedades físico-químicas, térmicas e ambientais de cada solução; na descentralização da produção tecnológica, viabilizando a aplicação do sistema em territórios com capacidades produtivas reduzidas; na incorporação de princípios de desmontabilidade, circularidade e reutilização, numa lógica de construção sustentável e evolutiva; e na demonstração da aplicabilidade do sistema em dois contextos projetuais concretos de escalas e localizações distintas, como Copenhaga e Lisboa.

6 RIZZOTTI, Philippe (org.) – *L’empreinte d’un habitat: construire léger et décarboné = Housing footprint: light and low-carbon construction*. 1.^a ed. Paris: Éditions du Pavillon de l’Arsenal, jan. 2022. ISBN 978-2-35487-065-2.

A dissertação estrutura-se em três grandes secções. A primeira desenvolve os cinco pilares conceptuais da industrialização arquitetónica: padronização das uniões, diversidade matérica, eficiência produtiva, versatilidade funcional e circularidade. Cada pilar é problematizado com base em casos de estudo históricos paradigmáticos, cuja análise crítica sustenta o desenho do novo sistema. A segunda parte apresenta o sistema desenvolvido e aplica-o a dois cenários projetuais distintos: uma intervenção de pequena escala na cidade de Copenhaga e outra de maior escala em Lisboa, ambas focadas na habitação coletiva. Por fim, a terceira parte, baseia-se no livro *L’empreinte d’un habitat : Construire léger et décarboné* ⁶ para realizar uma análise comparativa entre os casos de estudo e os projetos propostos, com base em indicadores quantitativos como dimensões, massa, distribuição de material, pegada de carbono, complexidade e assemblagem, permitindo avaliar o desempenho e o potencial de melhoria do sistema concebido.



1910

Henry Ford desenvolveu a linha de montagem como uma solução bem-sucedida para produzir um grande volume de veículos a um baixo custo unitário.

1920

Le Corbusier defendeu a visão utópica da casa como uma máquina de habitar, tendo como ponto central o conceito da Casa Dom-ino.

1930

Richard Buckminster Fuller tinha como objetivo facilitar a montagem rápida. Fuller idealizou que uma equipe de três pessoas poderia montar a Dymaxion House em menos de 24 horas.

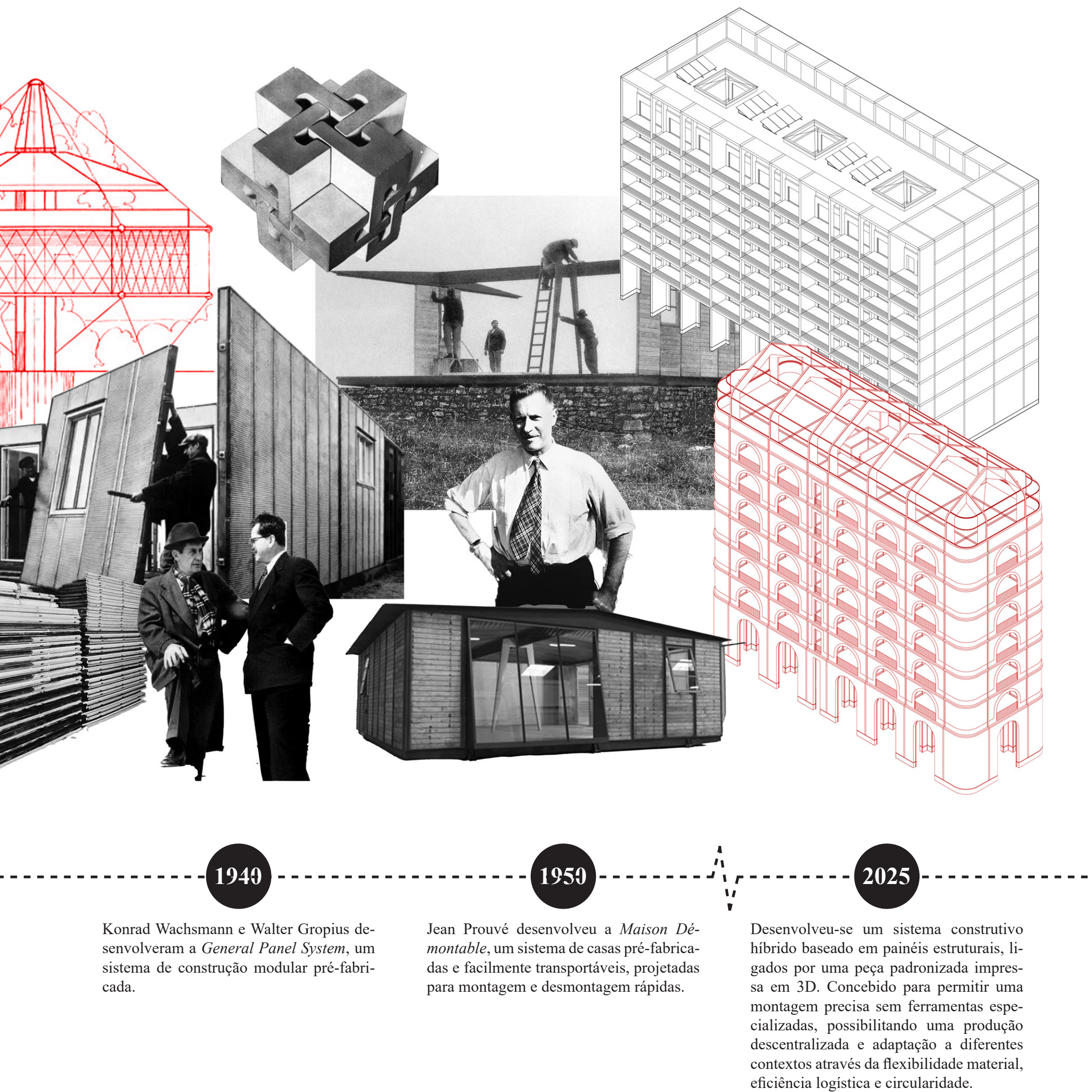
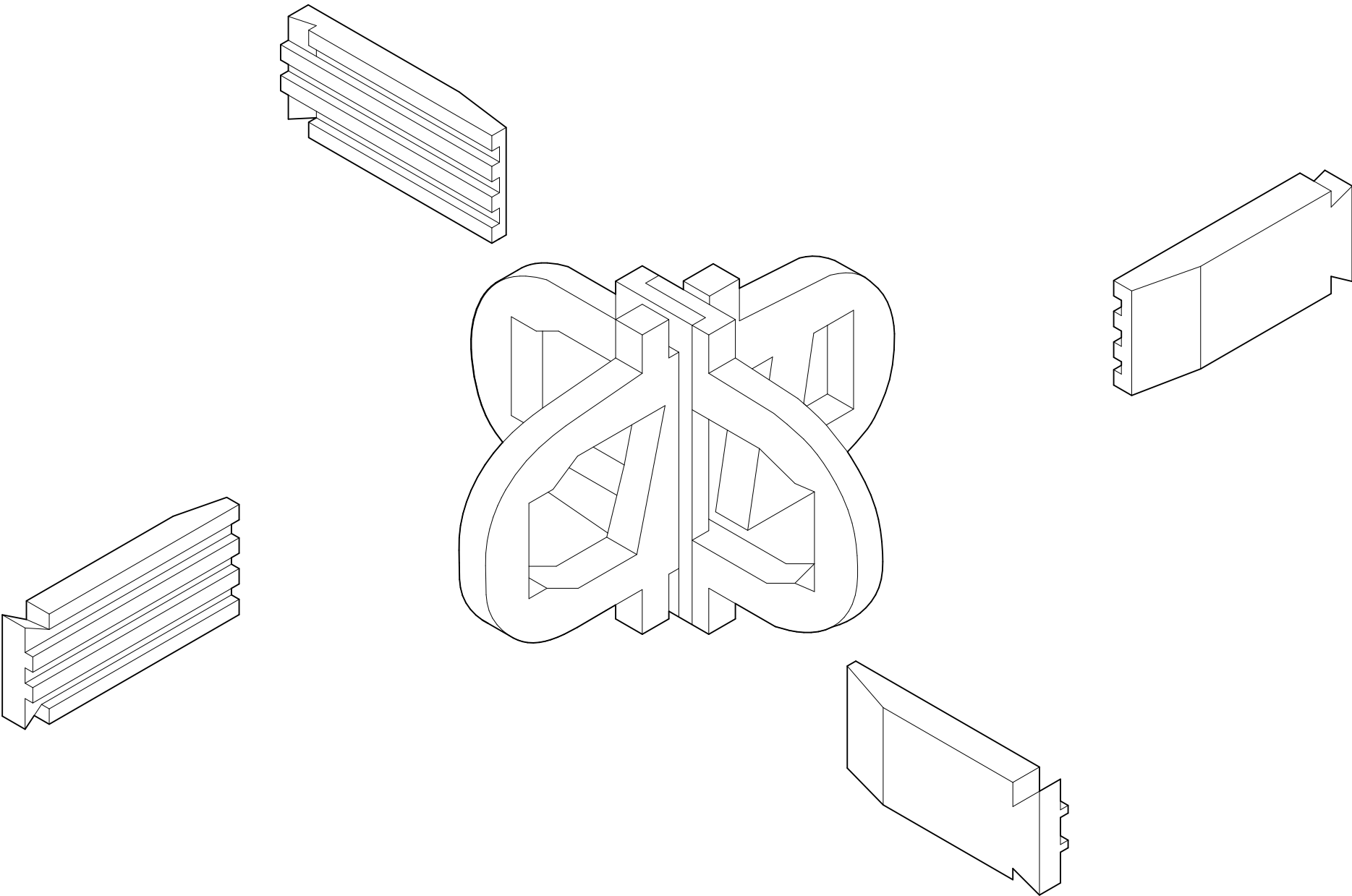


Figura 1 — Linha temporal.

I

PADRONIZAÇÃO DAS UNIÕES

Wedge-connector



Conector proposto

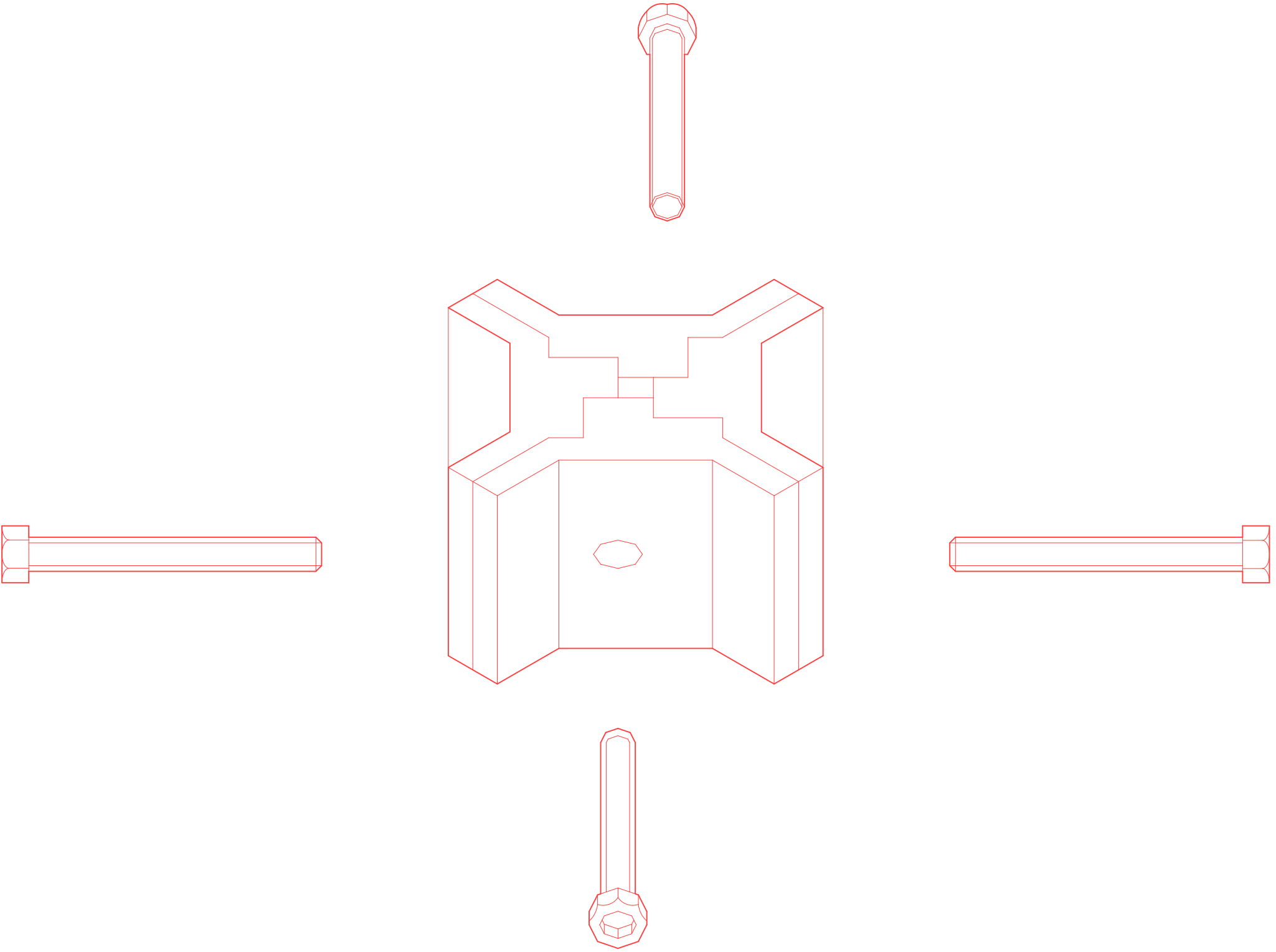


Figura 4 — Conector proposto. (1:2)

Packaged House

A criação de sistemas construtivos verdadeiramente industrializados exige a superação do desafio de conceber elementos de união padronizados que possibilitem a montagem de componentes normalizados em múltiplas configurações. Estes elementos representam a essência da industrialização — repetibilidade, racionalização e precisão tornam-se essenciais. Ao reduzir o número de intervenções no local, aceleram-se os prazos construtivos e minimizam-se os erros humanos. No entanto, é imprescindível que essa padronização não limite a liberdade compositiva.

A experiência do *General Panel System*, idealizado por Walter Gropius e Konrad Wachsmann em 1941, evidencia essa tensão. No centro da proposta encontrava-se o *wedge connector*, um conector metálico em cunha que permitia unir painéis padronizados de 1,22 x 2,44 m tanto na horizontal como na vertical. Funcionando através de peças metálicas que eram introduzidas em encaixes pré-moldados nas extremidades dos painéis, travando-os uns nos outros sem necessidade de outros elementos de fixação. Essa solução técnica eliminava estruturas auxiliares: os próprios painéis atuavam como estrutura resistente, interligando-se através de um conector universal.

A *General Panel Corporation* converteu uma antiga fábrica de aviões numa linha automatizada de produção de casas pré-fabricadas, com o objectivo de responder à necessidade habitacional do pós-guerra nos EUA. O sistema prometia reduzir — e de facto reduziu — em mais de 50% o tempo e os custos de construção. Ainda assim, a limitada variedade formal, as restrições tecnológicas da época (como a produção em massa ainda incipiente de alumínio em aço leve), a resistência da indústria convencional e as barreiras logísticas impediram a adopção generalizada: apenas algumas dezenas de unidades foram produzidas antes do encerramento da empresa. Este sistema demonstra a importância crítica da padronização.

Sistema de união do *General Panel System*

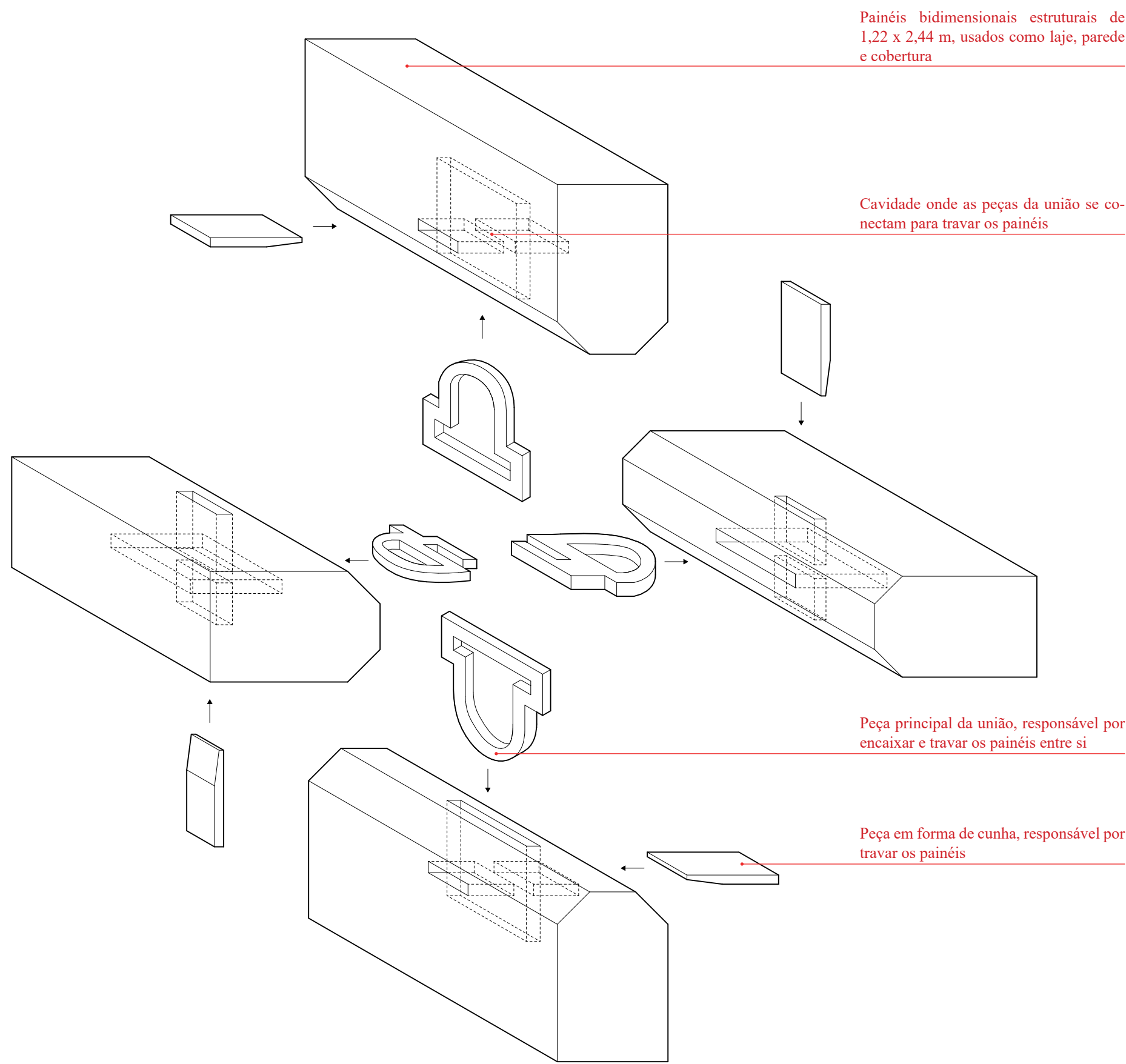


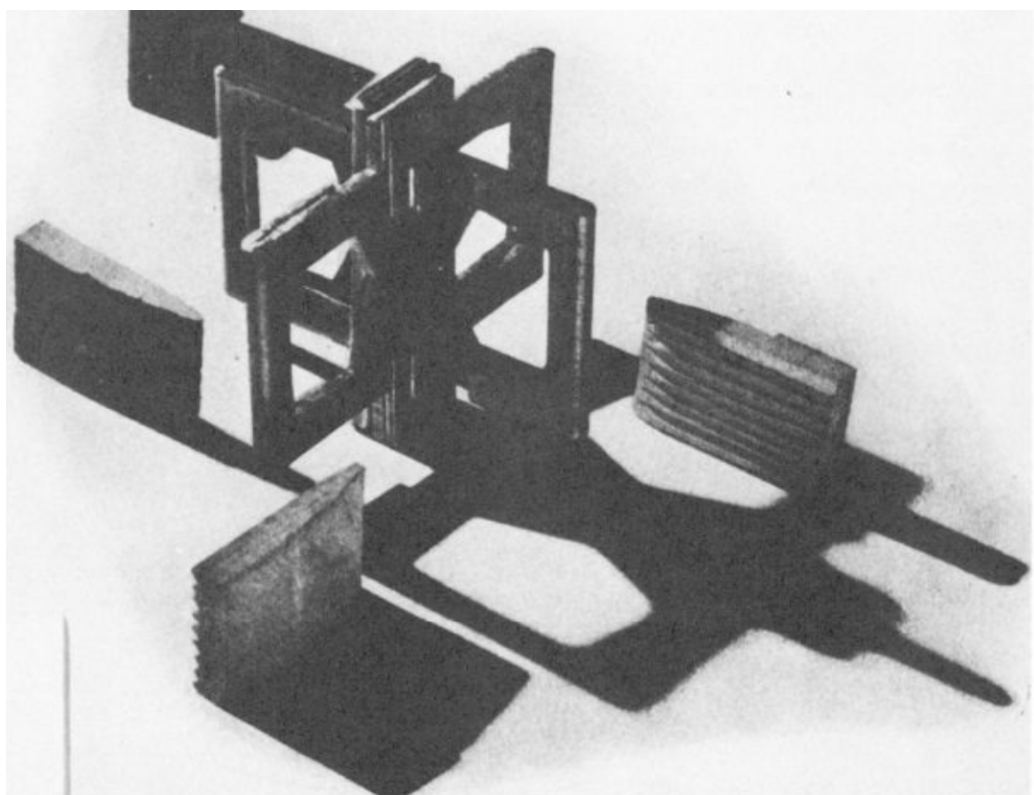
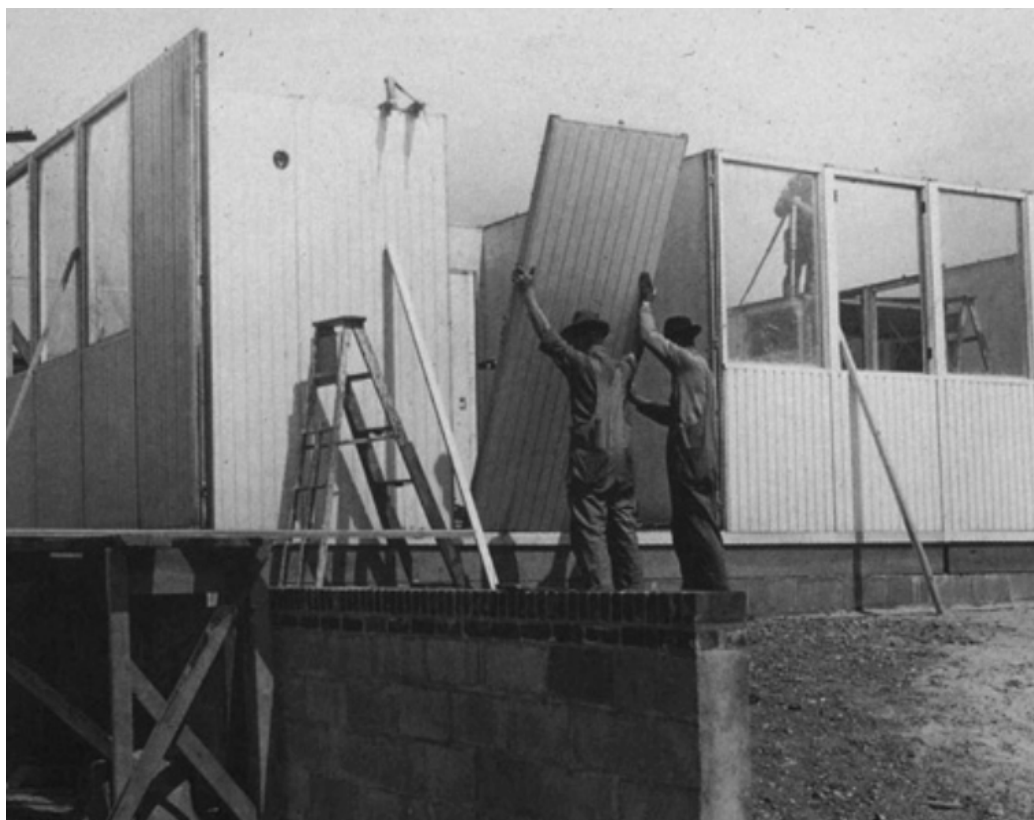
Figura 5 — Sistema de união, *General Panel System*. (1:5)



PACKAGED HOUSE
1942 - 1952

Autor	Walter Gropius & Konrad Wachsmann
Construtora	<i>General Panel Corporation</i>
Programa	Habitação Individual
Sistema	<i>General Panel System</i>

Área	65 m ²
Custo de Obra	6 358\$ (1947)
Tempo de Montagem	9 h
Numero de Exemplares	150 - 200



Figuras 6 - 10 — *Packaged House*. Burbank, Califórnia, Estados Unidos, 1950.

União Proposta

Inspirado no *Wedge Connector*, o sistema aqui proposto adota um conector metálico, em alumínio, fabricado através de impressão 3D. Esta abordagem viabiliza geometrias complexas e precisas sem aumento de custo, reduzindo o desperdício de matéria-prima, além de permitir ajustes e alterações na peça sem necessidade de produzir novos moldes. O conector mantém um encaixe-base em forma de dente, que permite o encaixe uniforme entre os conectores em 3 direções, facilitando a logística de montagem dos painéis.

Estes conectores são fixados nos entalhes das extremidades dos painéis (a quantidade depende da necessidade estrutural), conectando até quatro painéis com a mesma união. O encaixe inicial alinha os painéis, que depois são aparafusados diagonalmente através dos painéis, garantindo a rigidez estrutural com rapidez, simplicidade e precisão, mesmo por mão de obra com baixo nível de especialização (a quantidade de parafusos depende da necessidade estrutural). Nos vãos entre as juntas dos painéis, que são criados pela espessura do conector, são vedados através de uma argamassa leve que permite o isolamento entre os ambientes. Esta solução permite unir toda a malha estrutural do sistema sempre com a mesma lógica de união entre painéis, garantindo a sua padronização.

Sistema de união proposto

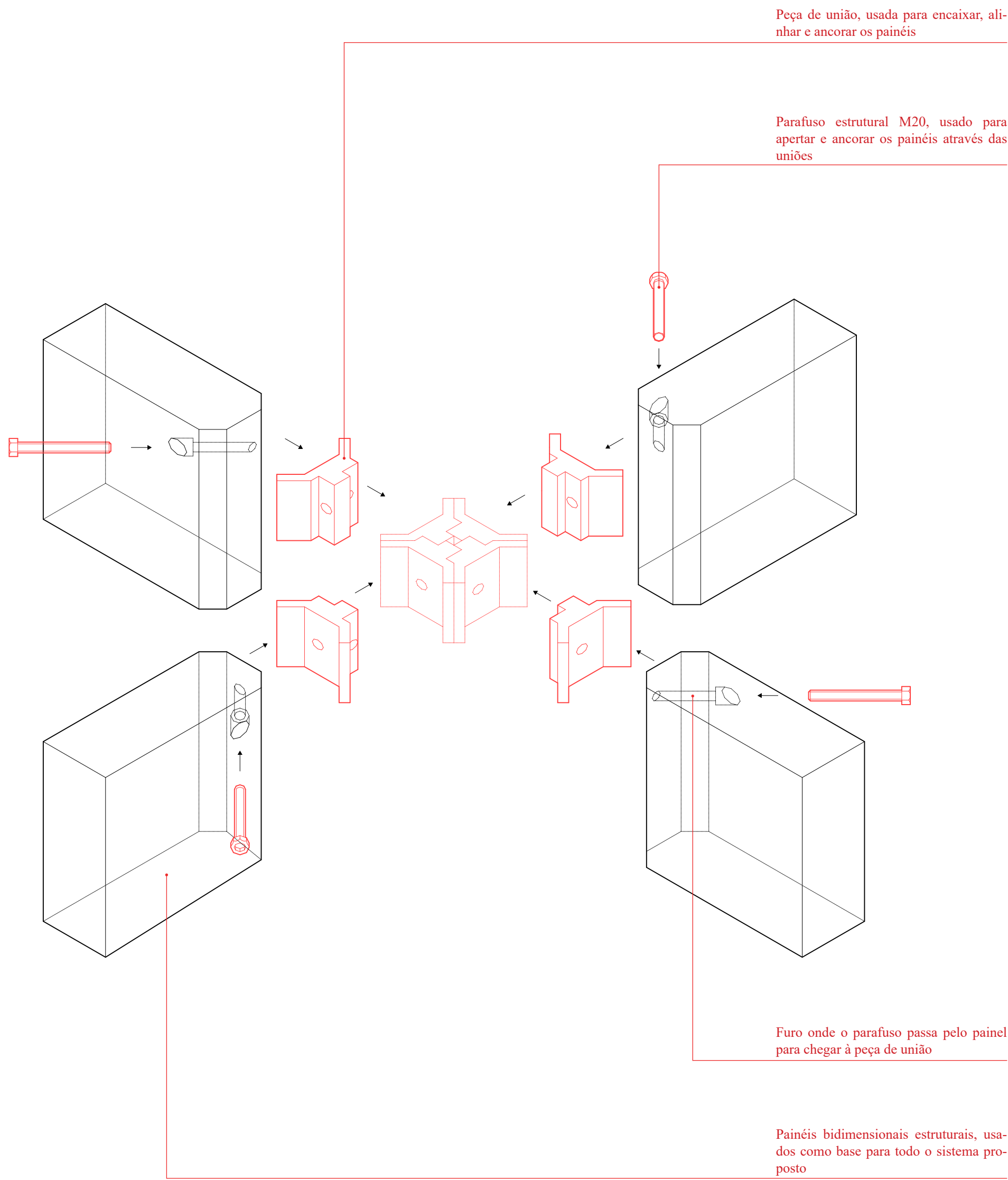


Figura 11 — Sistema de união proposto. (1:7)

Conector proposto

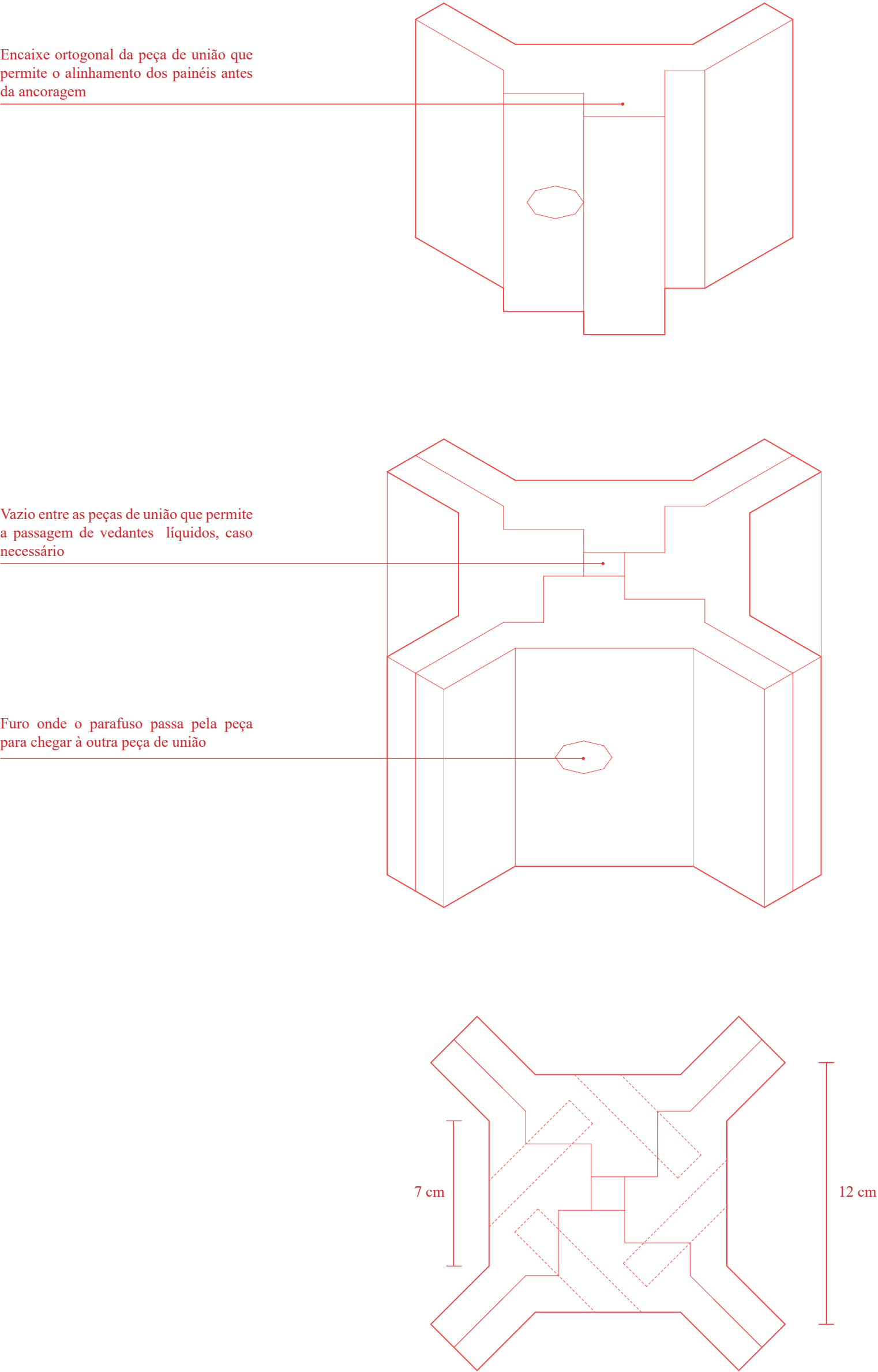
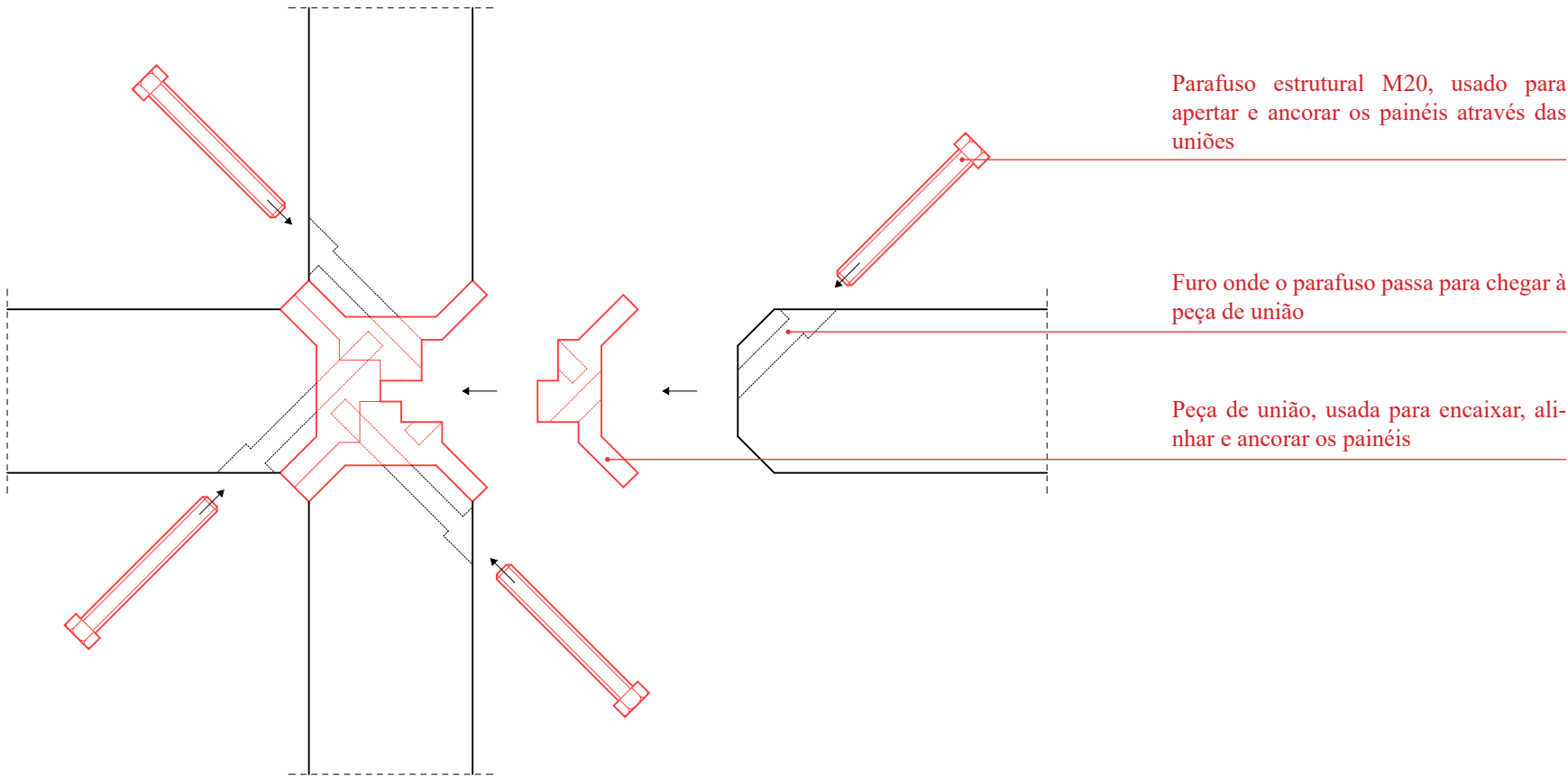
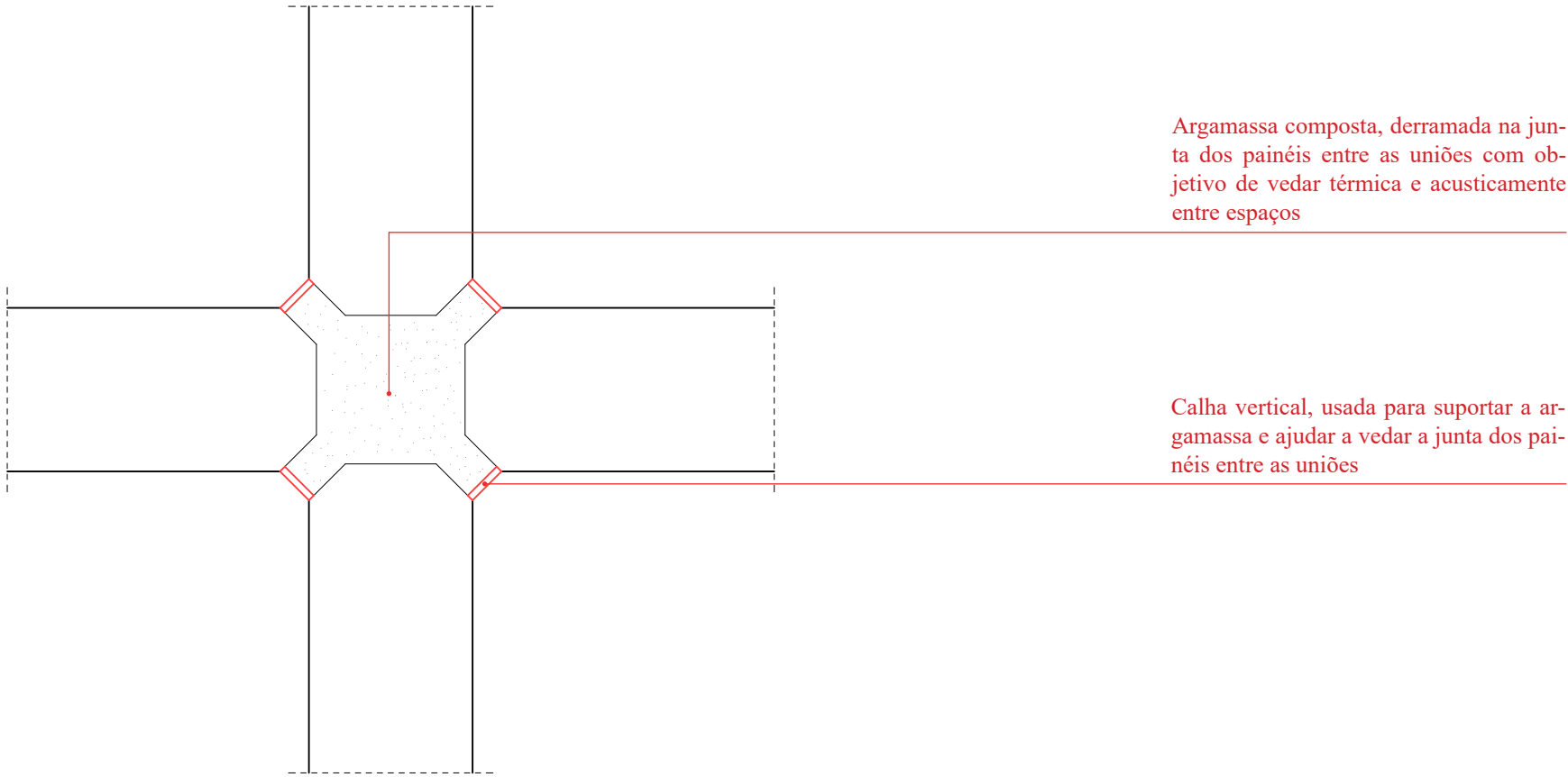


Figura 12 — Conector proposto. (1:2)

Junta dos painéis pelo conector



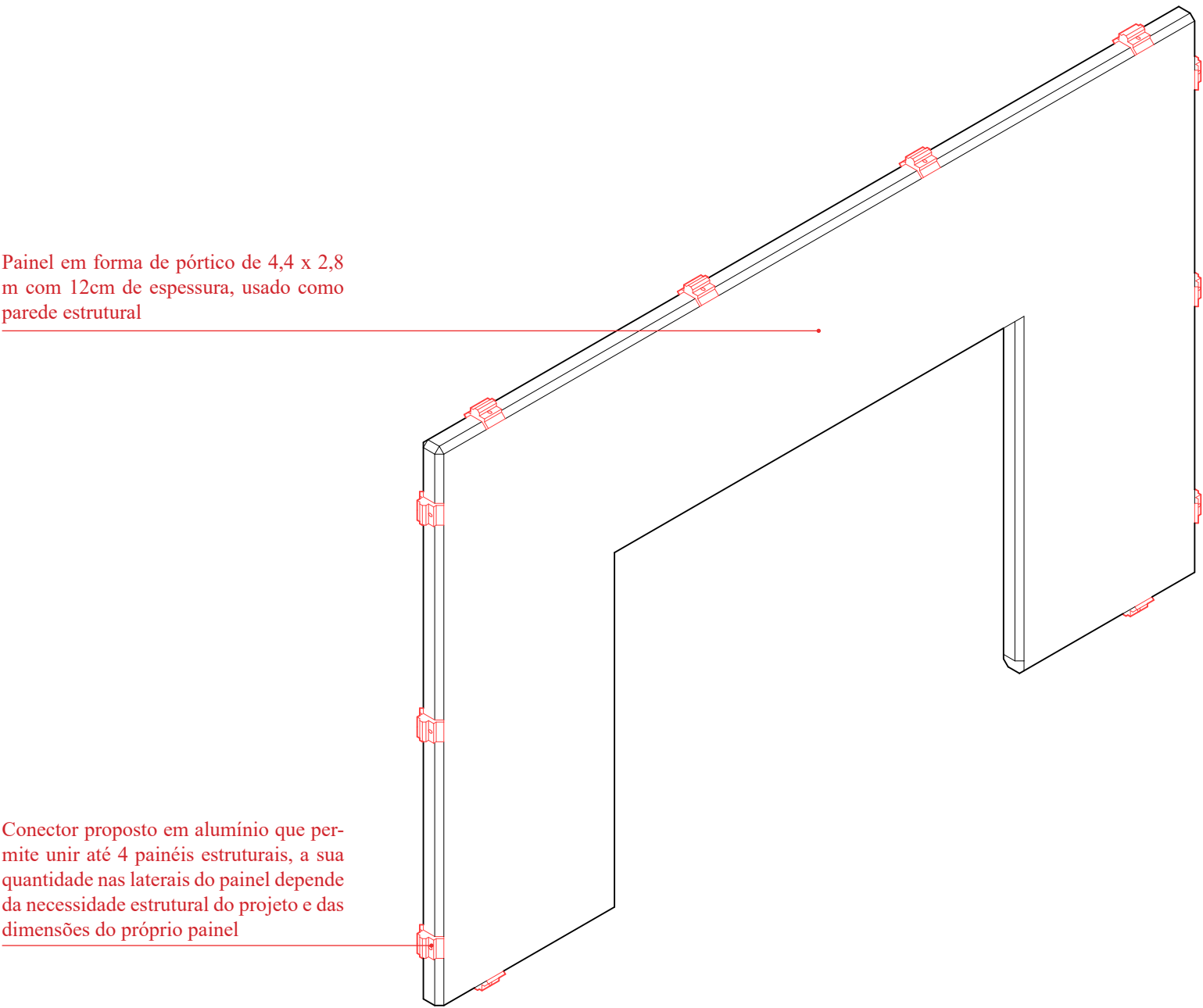
Junta dos painéis pela vedação



cm 0 5 10 25

Figura 13 — Ancoragem e vedação da junta. (1:5)

Posição dos conectores no painel parede



Posição dos conectores no painel laje

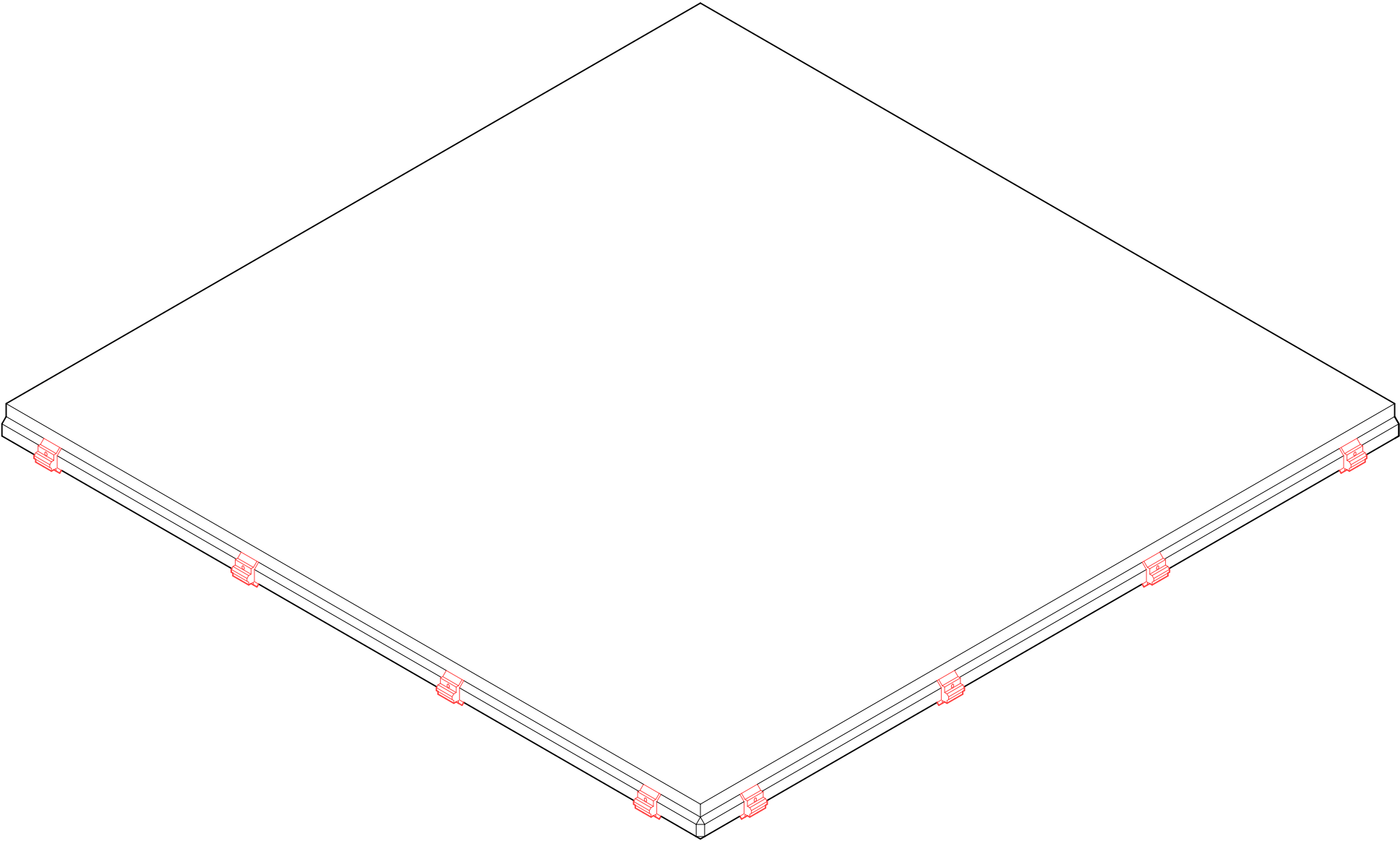


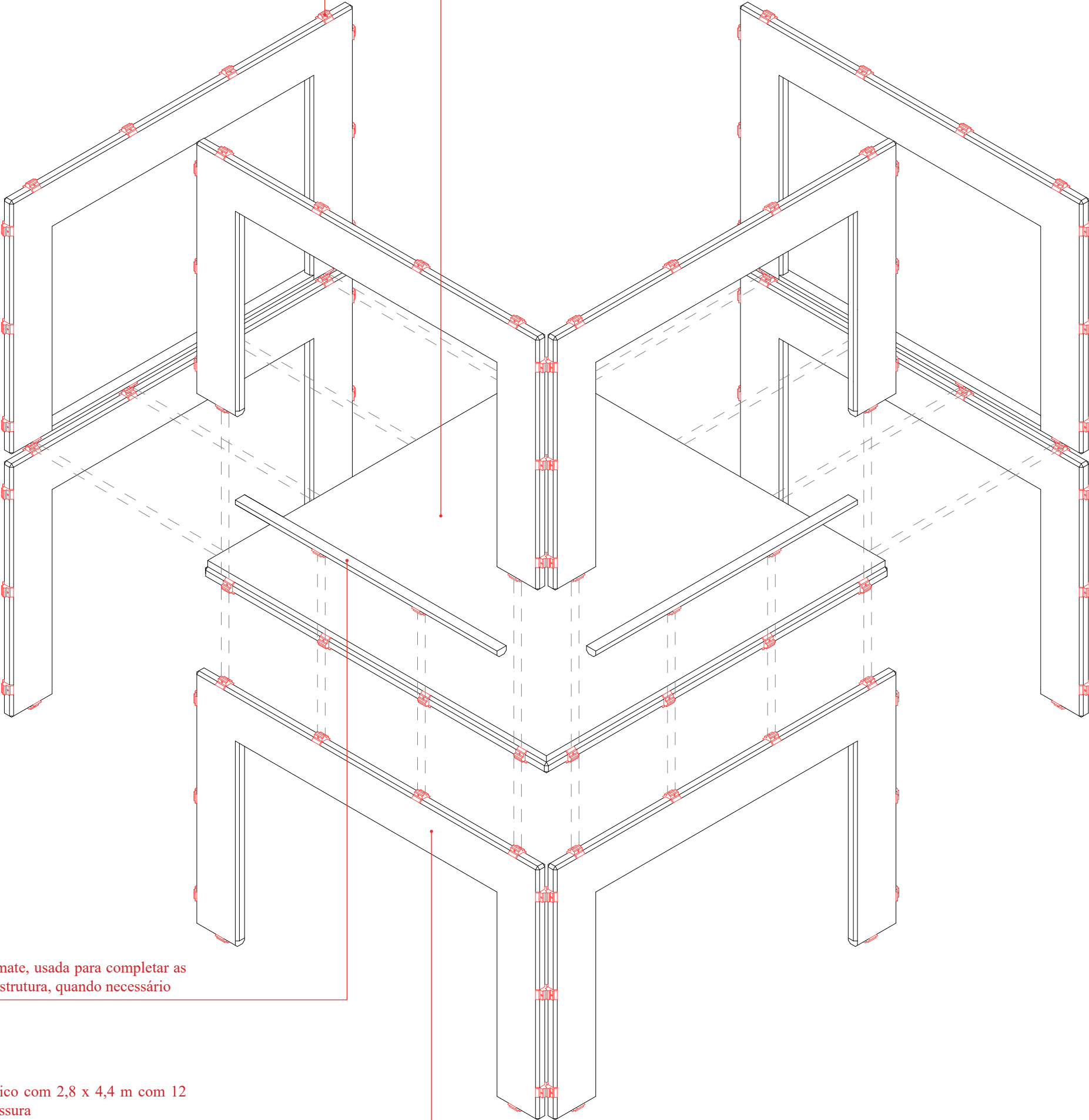
Figura 15 — Posição dos conectores nas lajes. (1:30)

Painel de laje com 4,4 x 4,4 m com 20 cm de espessura

Conector padronizado

Peça de remate, usada para completar as uniões da estrutura, quando necessário

Painel pórtico com 2,8 x 4,4 m com 12 cm de espessura



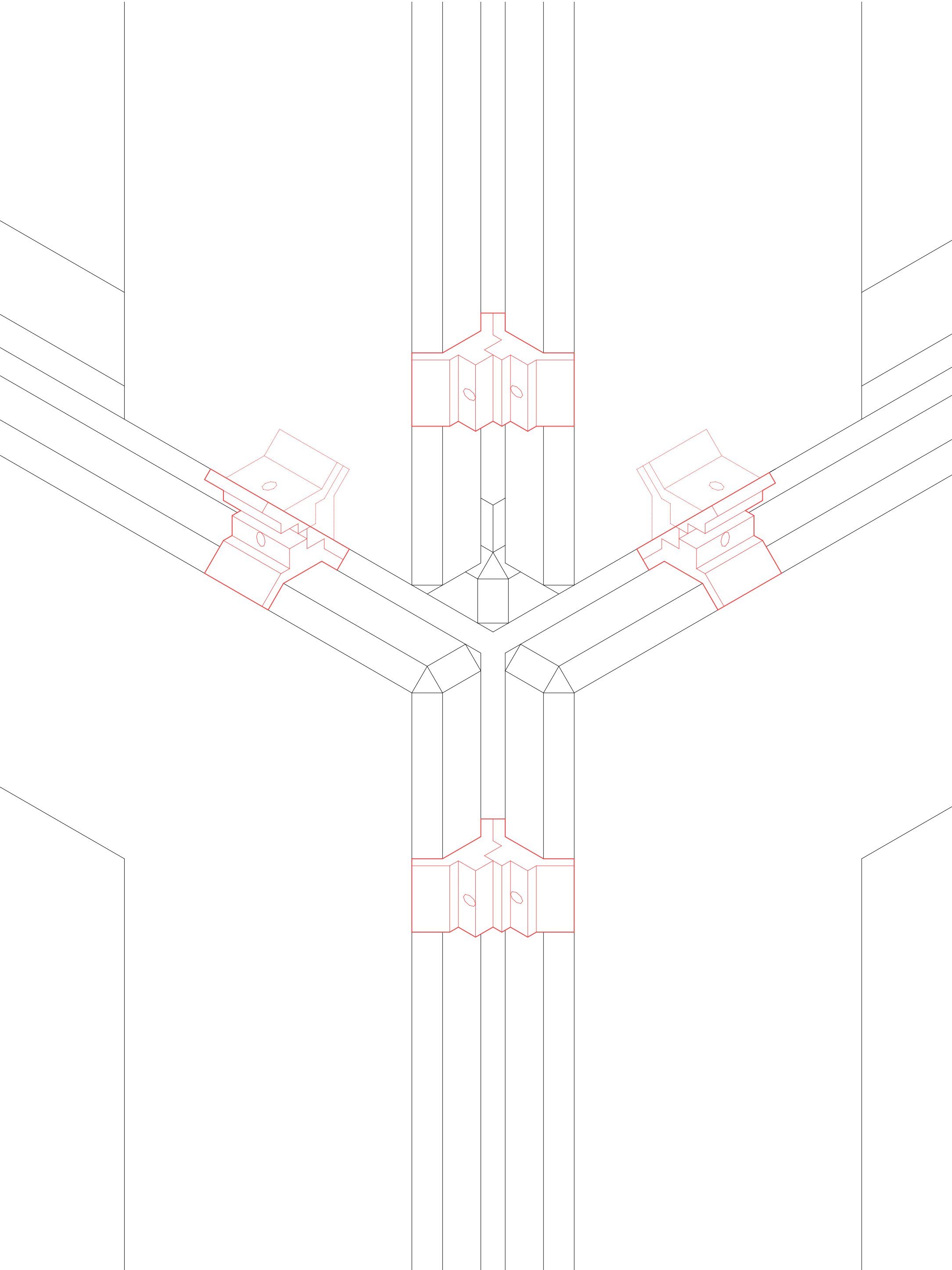
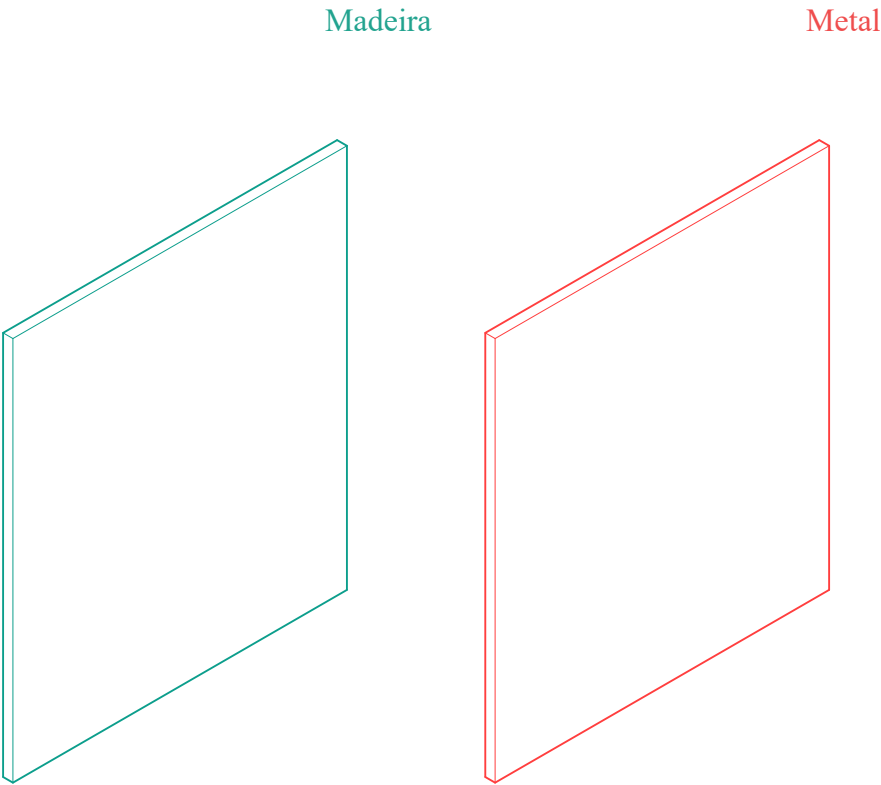


Figura 17 — Junta entre paredes e laje. (1:5)

II

DIVERSIDADE MATÉRIA

Painéis não estruturais da *Maison Démontable*



Painéis estruturais do sistema proposto

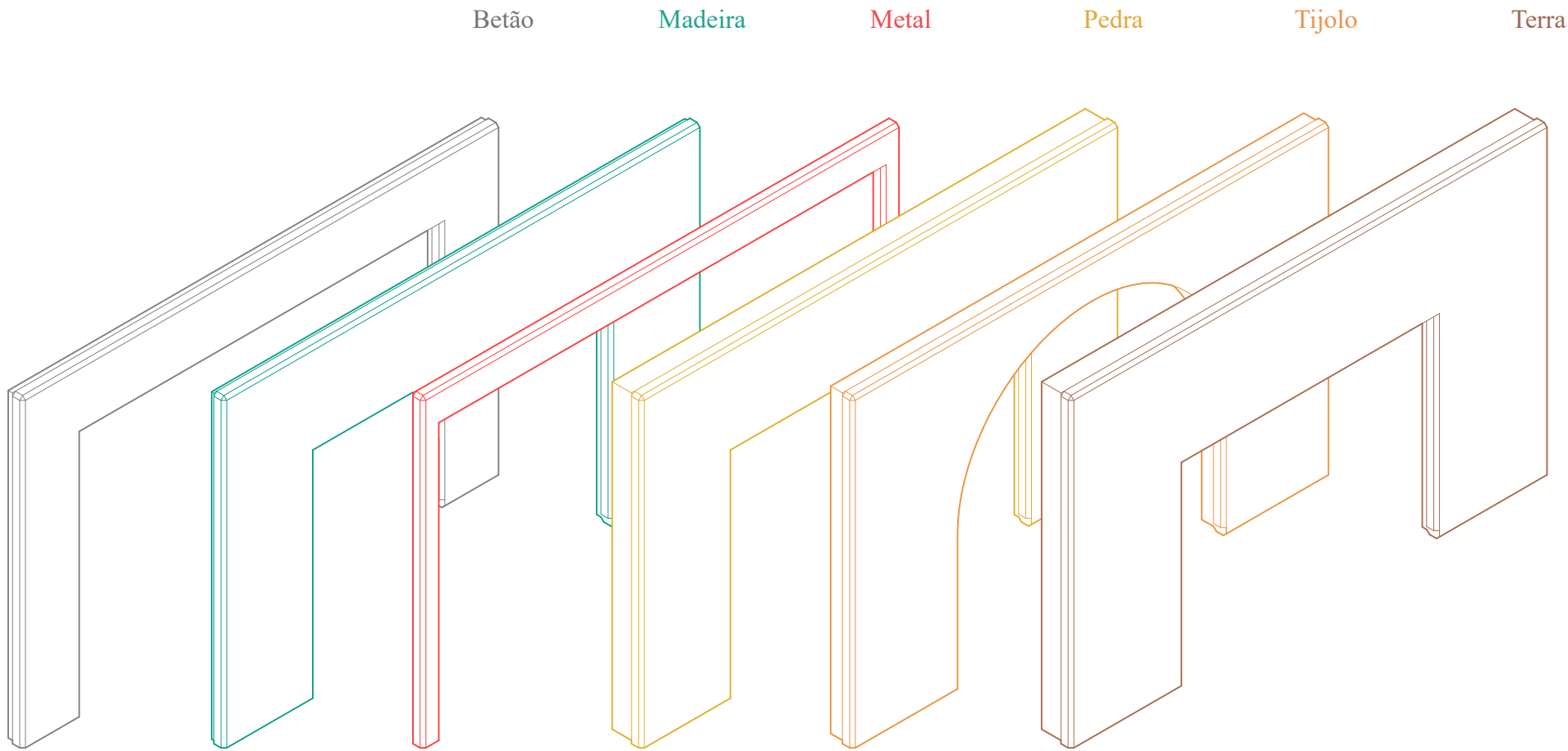


Figura 19 — Diversidade matérica proposta. (1:50)

Maison Démontable

A industrialização beneficia profundamente do uso combinado e inteligente de diversos materiais, escolhidos segundo critérios físico-químicos, térmicos e ambientais. Esta escolha afeta tanto o desempenho técnico quanto a adaptabilidade às condições económicas e climáticas.

Jean Prouvé foi pioneiro nesta abordagem híbrida: desde os anos 1920 integrava alumínio, aço e madeira em soluções industriais pré-fabricadas.

Um exemplo deste método são as suas casas pré-fabricadas, as célebres *Maisons Démontables*, onde através do mesmo método construtivo foram usados diferentes materiais em resposta a contextos e necessidades distintas. A escolha do material é uma decisão essencial para o desenvolvimento de cada projeto. Uma destas habitações, a *Maison 8x8*, possuía apenas o pórtico axial em aço como estrutura principal — devido à sua escassez no pós-guerra — enquanto que a maior parte dos componentes como painéis e lajes eram em madeira. Nesta solução híbrida cada material cumpria o seu papel, o aço por ser limitado foi reservado apenas à estrutura essencial, e a madeira preencheu os demais elementos, adaptando-se à disponibilidade de recursos e aproveitando a sua capacidade térmica.

Já a *Maison Tropique*, concebida para climas tropicais nas colónias francesas em África, foi feita predominantemente de alumínio e aço, devido à sua resistência à humidade e leveza, qualidades que eram essenciais para construir em climas quentes e para serem transportadas por navios. Para enfrentar o calor intenso, desenvolveu um sistema de ventilação que aproveitava o aquecimento da fachada metálica para criar correntes de ar e refrescar o interior. Aqui, a escolha de um material específico foi essencial para responder à questão climática, ao contrário da madeira, que poderia apodrecer devido à humidade tropical, ou do aço, que era escasso, o alumínio proporcionou durabilidade, conforto térmico e facilidade de transporte. Este projeto é um claro exemplo de como a alteração de material em função do contexto cria um sistema mais adequado e eficiente ao seu propósito. Diferentes materiais respondem a necessidades distintas e aproveitar essas qualidades de forma combinada é a melhor estratégia.

Esses projetos comprovam que o material certo no lugar certo aumenta a eficiência e a sustentabilidade de forma expressiva.

Estrutura de painéis da *Maison Démontable*

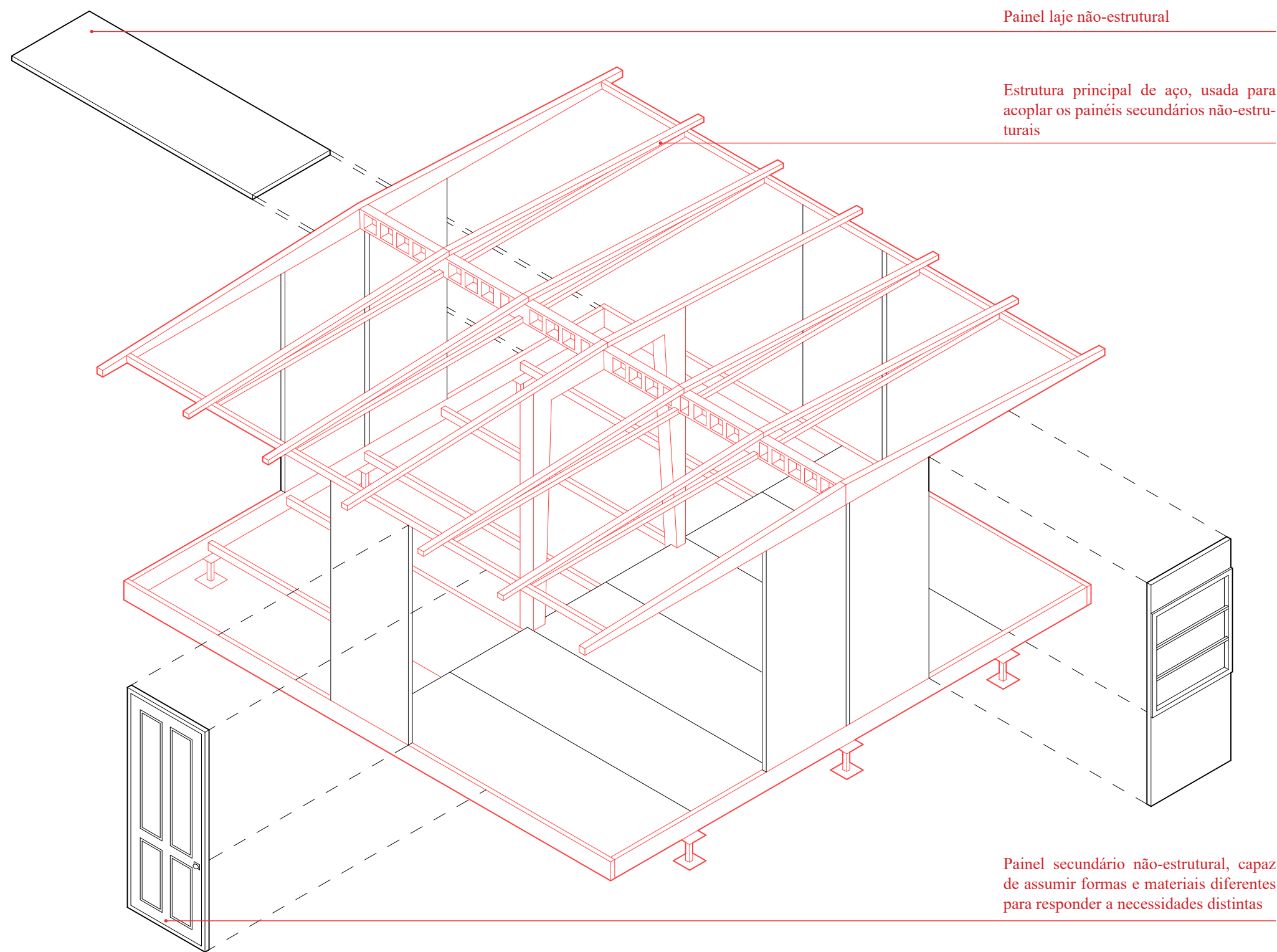


Figura 20 — Sistema de painéis, *Maison Démontable*. (1:50)



MAISON DÉMONTABLE 8x8
1944-1945

Autor	Jean Prouvé & Pierre Jeanneret
Construtora	<i>Bureau Central de Construction (BCC)</i>
Programa	Habitação Individual
Sistema	<i>Maison Démontable</i>

Área	72 m ²
Custo de Obra	45 101\$ (1942)
Tempo de Montagem	48 h
Numero de Exemplares	4

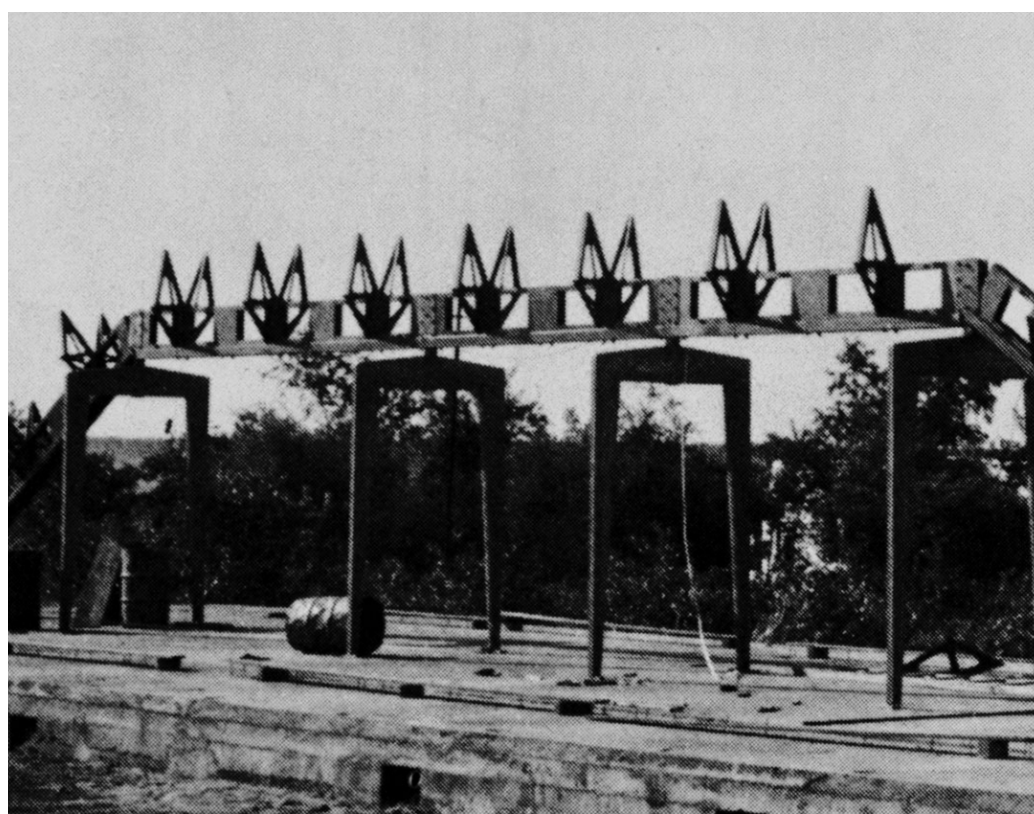


Figuras 21-25 — *Maison Démontable* 8x8. Bezaumont, França, 1944-45.



MAISON TROPICALE
1949 - 1952

Autor	Jean Prouvé	Área	140 m ²
Construtora	Compagnie Foncière et Industrielle Africaine	Custo de Obra	—
Programa	Habitação Individual	Tempo de Montagem	48 h
Sistema	Maison Demontable	Numero de Exemplares	3



Figuras 26-30 — *Maison Tropicale*. Niamey, Nigéria, 1949-1952.

Sistema Proposto

O sistema proposto nesta tese, parte da premissa que nenhum material é capaz de atender com excelência todos os requisitos técnicos, estéticos, económicos e ambientais de uma construção. Tendo isso em conta, adotou-se uma abordagem híbrida e aberta, que permite a utilização de diferentes materiais de forma estratégica e complementar, integrados no mesmo sistema.

O sistema é baseado em painéis bidimensionais estruturais autoportantes, projetados para atuar como elementos estruturais sem a necessidade de uma estrutura auxiliar. Cada painel possui entalhes laterais, que criam um eixo central de orientação — onde são acoplados os conectores— permitindo o encaixe preciso entre diferentes espessuras e materiais. Este detalhe assegura que os painéis possam ser inseridos em qualquer posição da estrutura, sem comprometer a continuidade do sistema, mesmo com espessuras diferentes.

Esta lógica de união permite que os painéis de diferentes espessuras possam ser combinados livremente, o que é essencial quando lidamos com materiais com densidades e propriedades mecânicas diferentes. Por exemplo, é possível unir um painel de betão armado de 24cm com um painel de CLT (*Cross Laminated Timber*) de 12cm, através do mesmo sistema. Esta combinação de materiais convencionais como o betão, o aço e a madeira, aliados a materiais alternativos como o hempcrete e a terra compactada, permite a construção de edifícios mais versáteis e que respondem melhor às exigências de cada projeto.

Para permitir a união de painéis de diferentes materiais e espessuras, o conector, por ser impresso em 3D, adapta-se a estas variedades, aumentando a sua largura para se fixar em painéis mais largos, e fixado-se aos painéis de maneira diferente dependendo do material. A ancoragem dos painéis também varia de acordo com as necessidades estruturais, painéis mais largos permitem ancoragens transversais e diagonais.

Estrutura de painéis proposto

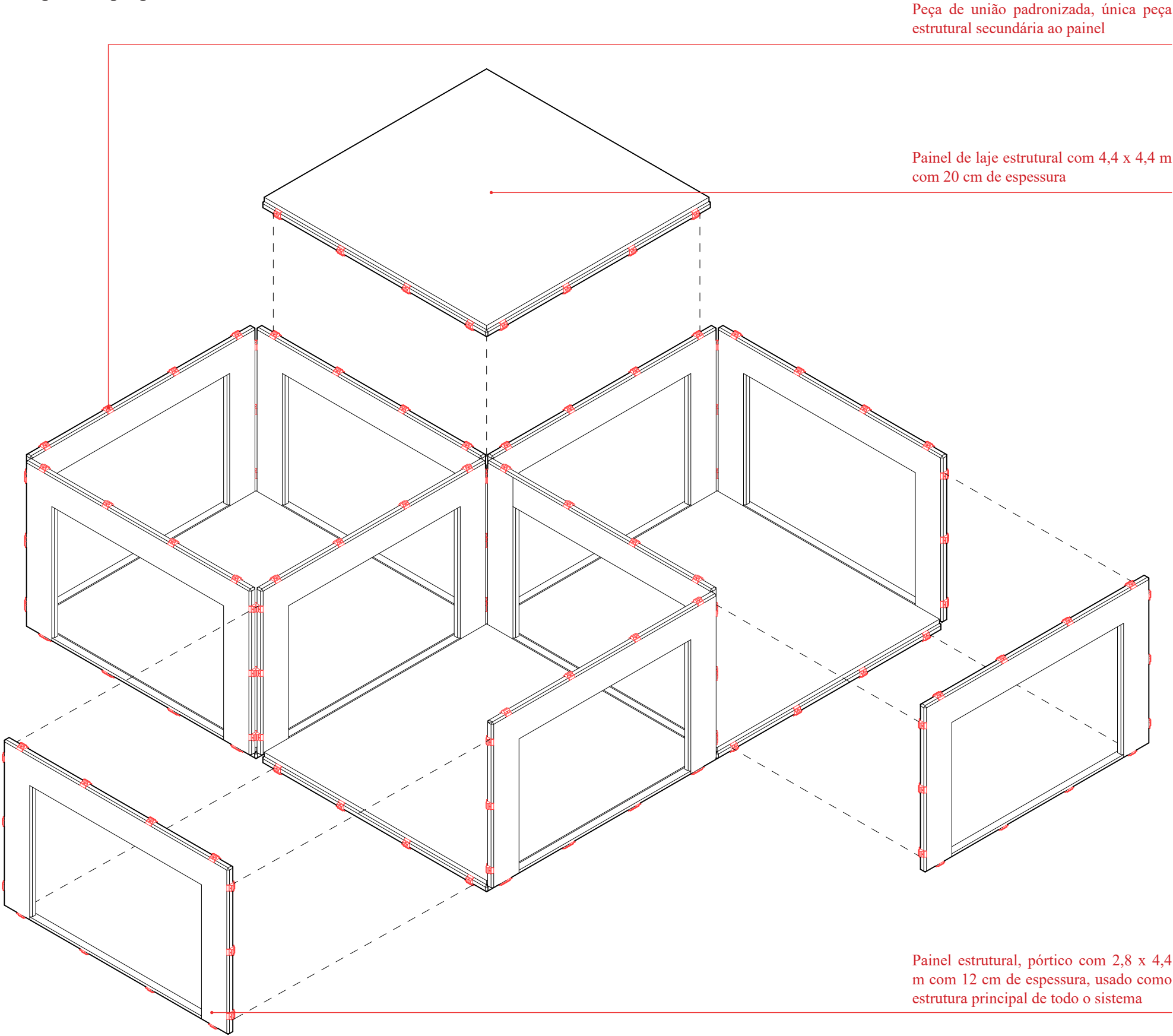


Figura 31 — Sistema de painéis proposto. (1:50)

Categoria	Material	Espessura mínima (mm)	Resistência térmica (m²-K/W)	Resistência ao Fogo	Isolamento acústico (dB)	Emissão CO₂ (Kg-eq/m³)	Densidade (Kg/m³)
Betão	Convencional	100	0,06	A1	50	300	2 400
Betão	Leve	100	0,33	A1	40	250	1 800
Betão	Protendido pré-moldado	80	0,05	A1	45	200	2 400
Betão	Auto compactante	100	0,06	A1	50	320	2 400
Betão	Painel pré-fabricado	50	0,03	A1	45	280	2 400
Betão	Bloco maciço	140	0,08	A1	52	300	2 400
Betão	Bloco leve	140	0,56	A1	45	250	1 600
Betão	Laje alveolar	200	0,11	A1	55	300	2 300
Betão	Com fibra de vidro	10	0,006	A1	45	300	1 800
Betão	Alta resistência	100	0,06	A1	50	350	2 400
Betão	Celular auto clavado	200	1,67	A2-s1,d0	35	100	600
Betão	Refratário	50	0,03	A1	40	400	2 000
Betão	Translúcido	10	0,01	A1	45	300	2 500
Betão	Polimérico	50	0,33	B-s2,d0	40	1 500	1 800
Vidro	Liso	6	0,008	A1	30	2 460	2 500
Vidro	Temperado	6	0,008	A1	32	2 460	2 500
Vidro	Laminado	12	0,015	A1	33	4 920	2 500
Vidro	De segurança	12	0,015	A1	33	4 920	2 500
Vidro	Low-E	6	0,008	A1	30	2 460	2 500
Vidro	Auto limpante	6	0,008	A1	30	2 460	2 500
Vidro	Temperado fosco	6	0,008	A1	30	2 460	2 500
Vidro	Refletivo	6	0,008	A1	30	2 460	2 500
Vidro	Temperado colorido	6	0,008	A1	30	2 460	2 500
Vidro	Celular leve	10	0,013	A1	28	4 100	2 400
Vidro	Borossilicato	6	0,008	A1	30	3 000	2 230
Vidro	Cerâmico	4	0,005	A1	28	2 460	2 300
Plástico	PVC rígido	4	0,02	B-s1,d0	25	10 962	1 400
Plástico	Polycarbonato	10	0,05	B-s1,d0	30	7 123	1 200
Plástico	Polimetacrilato	5	0,02	B-s1,d0	25	7 200	1 180
Plástico	EPS expandido	100	2,86	B-s1,d0	8	76	20
Plástico	XPS extrudado	50	1,67	B-s1,d0	15	190	35
Plástico	Espuma de poliuretano	50	1,43	B-s1,d0	20	1 200	30
Plástico	GRP	5	0,03	B-s3,d0	28	200	1 800
Plástico	ABS	3	0,015	B-s3,d0	25	840	1 050
Plástico	HDPE	5	0,022	B-s1,d0	25	30	950
Plástico	Polipropileno	5	0,025	B-s1,d0	25	4 293	900
Plástico	PET	3	0,02	B-s3,d0	30	3 500	1 400
Plástico	Fenólico HPL	3	0,016	B-s2,d0	25	1 500	1 200
Metal	Aço carbono	7	0,002	A1	45	14 840	7 850
Metal	Aço galvanizado	0,7	0,000016	A1	20	14 840	7 800
Metal	Aço inoxidável	2	0,000044	A1	30	15 000	8 000
Metal	Alumínio	3	0,000013	A1	25	37 476	2 700
Metal	Cobre	2	0,000005	A1	25	26 800	8 960
Metal	Zinco	2	0,000018	A1	25	35 600	7 130
Metal	Chumbo	2	0,000057	A1	25	22 680	11 340
Metal	Níquel	2	0,000022	A1	25	12 000	8 900
Metal	Latão	2	0,000018	A1	25	6 000	8 500
Metal	Titânio	0,3	0,00047	A1	10	135 180	4 500
Metal	Titânio-zircônico	0,25	0,00043	A1	11	65 700	6 570
Metal	Magnésio	0,5	0,000006	A1	6	9 200	1 740

■ Representa o melhor valor em cada coluna por categoria.

Categoria	Material	Espessura mínima (mm)	Resistência térmica (m²·K/W)	Resistência ao Fogo	Isolamento acústico (dB)	Emissão CO₂ (Kg-eq/m³)	Densidade (Kg/m³)
Biológicos	Hempcrete	150	2,5	C-s2,d0	40	100	400
Biológicos	Mycelium	50	0,5	C-s2,d0	35	10	250
Biológicos	Palha	400	5,71	D-s3,d0	35	20	120
Biológicos	Lã de madeira	20	0,2	D-s1,d0	35	50	320
Biológicos	Cortiça aglomerada	20	0,5	D-s1,d0	30	50	180
Biológicos	Bamboo laminado	20	0,13	D-s2,d0	30	100	600
Biológicos	Linho	10	0,1	C-s2,d0	30	20	300
Biológicos	Juta	10	0,1	C-s2,d0	30	20	300
Biológicos	Kenaf	10	0,1	C-s2,d0	30	20	300
Biológicos	Miscanthus	10	0,1	C-s2,d0	30	20	300
Biológicos	Celulose reciclada	100	5,56	C-s3,d0	30	50	40
Biológicos	Lã de ovelha	100	4	C-s3,d0	25	30	30
Biológicos	Cortiça isolante	100	2,5	B-s1,d0	25	100	200
Biológicos	Serragem	30	0,6	C-s3,d0	30	100	500
Madeira	Pinho maciço	100	0,67	D-s2,d0	30	100	500
Madeira	Carvalho maciço	100	0,67	D-s2,d0	30	50	700
Madeira	Plywood	12	0,08	D-s2,d0	25	500	600
Madeira	OSB	12	0,08	D-s2,d0	25	500	600
Madeira	MDF	15	0,1	D-s2,d0	25	500	700
Madeira	LVL	30	0,2	D-s2,d0	30	600	500
Madeira	CLT	100	0,67	D-s2,d0	30	220	500
Madeira	Glulam	50	0,33	D-s2,d0	30	-686	500
Madeira	Laminado marinho	15	0,1	D-s2,d0	25	500	700
Madeira	Tábuas maciças	20	0,13	D-s2,d0	25	50	600
Madeira	Auto clave tratada	15	0,1	D-s2,d0	30	50	600
Madeira	Aglomerado	15	0,1	D-s2,d0	30	500	650
Madeira	Tropical	15	0,1	D-s2,d0	30	50	900
Madeira	Lapacho	20	0,13	D-s2,d0	30	50	950
Madeira	Bambu laminado	8	0,05	D-s2,d0	30	100	800
Madeira	Faia	6	0,04	D-s2,d0	30	40	750
Madeira	Bétula	6	0,03	D-s2,d0	28	60	620
Madeira	Douglas-fir	6	0,05	D-s2,d0	26	60	530
Minerais	Tijolo maciço	100	0,11	A1	50	1 300	1 600
Minerais	Tijolo vazado	80	0,09	A1	45	1 000	1 400
Minerais	Telha	25	0,03	A1	35	180	1 900
Minerais	Tijolo refratário	50	0,03	A1	40	2 000	2 500
Minerais	Placa de gesso	12	0,034	A1	45	1 000	800
Minerais	Cimento	200	1,67	A2-s1,d0	35	100	600
Minerais	Ardósia	20	0,013	A1	50	1 500	2 600
Minerais	Granito	25	0,008	A1	50	1 800	2 700
Minerais	Mármore	20	0,0067	A1	50	1 700	2 700
Minerais	Cerâmica vermelha	15	0,01	A1	30	1 000	2 200
Minerais	Porcelanato	10	0,0033	A1	30	1 200	2 400
Minerais	Argila expandida	40	0,89	A1	30	1 500	500
Minerais	Cerâmica	50	0,1	A1	40	2 600	1 700
Minerais	Terra compactada	200	2,5	A1	30	0	1 800
Minerais	Quartezito	10	0,0033	A1	52	15	2 650
Minerais	Basalto	10	2,9	A1	53	20	3 000
Minerais	Diatomito	50	0,08	A1	48	5	300
Minerais	Talco	5	0,007	A1	46	12	2 700

Figura 32 — Tabela de materiais construtivos.

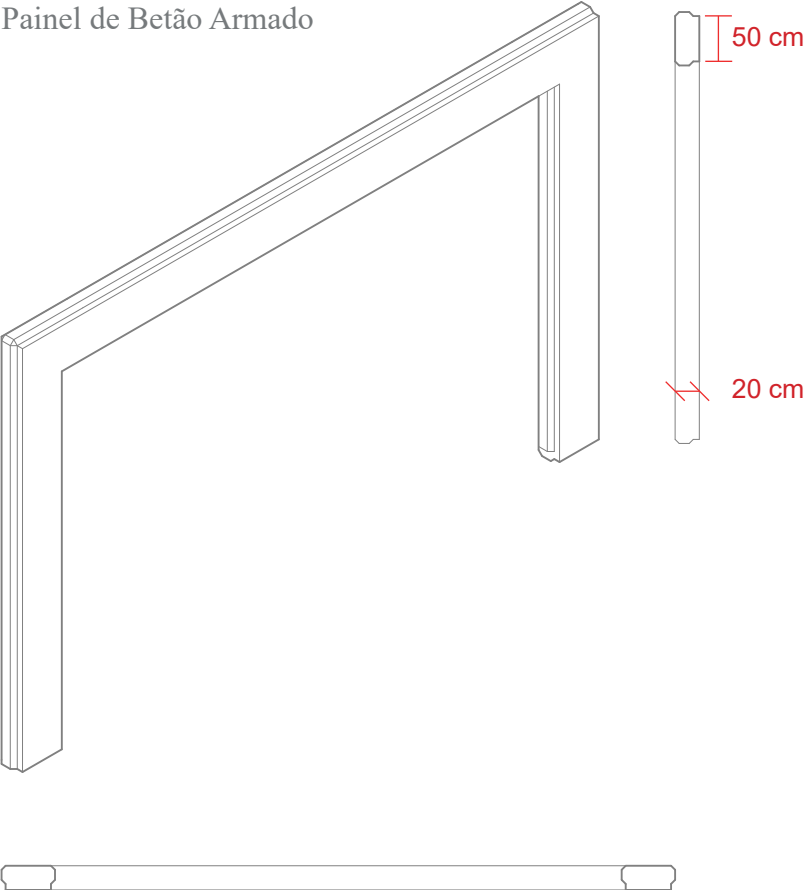
Diversidade matéria dos painéis propostos

Resistências Mecânicas	Compressão: 25 - 60 Mpa
	Tração : 2 - 5 Mpa
Densidade	2 300 - 2 500 kg/m³
Elasticidade	Módulo: 25 - 40 Gpa
Durabilidade	Vida Útil > 50 anos
Resistência ao Fogo	Incombustível (Classe A1)
Isolamento Acústico	Bom (massa elevada)
Isolamento Térmico	Fraco 1,6 - 2,0 W/m.K
Impermeabilidade	Alta

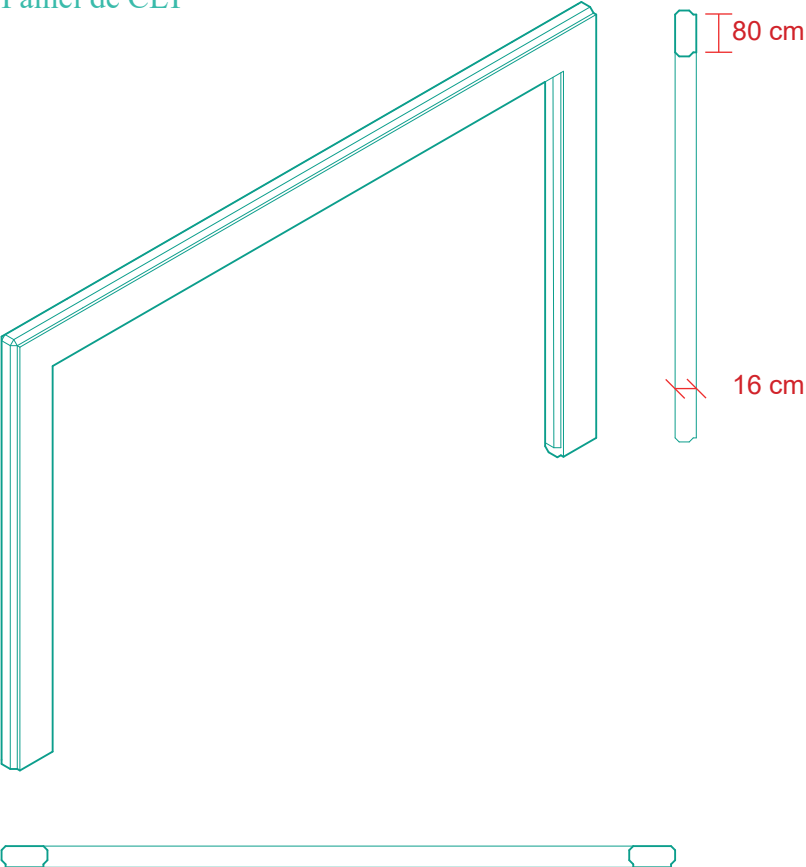
Resistências Mecânicas	Compressão: 20 - 40 Mpa
	Tração : 10 - 20 Mpa
Densidade	450 - 500 kg/m³
Elasticidade	Módulo: 8 - 14 Gpa
Durabilidade	Vida Útil > 50 anos
Resistência ao Fogo	Carbonizável (Classe D-s2)
Isolamento Acústico	Médio (com camadas adicionais)
Isolamento Térmico	Médio 0,12 W/m.K
Impermeabilidade	Baixa

Resistências Mecânicas	Tração : 250 - 600 Mpa
	Compressão: 250 - 600 Mpa
Densidade	7 800 kg/m³
Elasticidade	Módulo: 210 Gpa
Durabilidade	Vida Útil > 100 anos
Resistência ao Fogo	Incombustível (Classe A1)
Isolamento Acústico	Fraco (necessita isolamento extra)
Isolamento Térmico	Muito Fraco 50 W/m.K
Impermeabilidade	Total (não poroso)

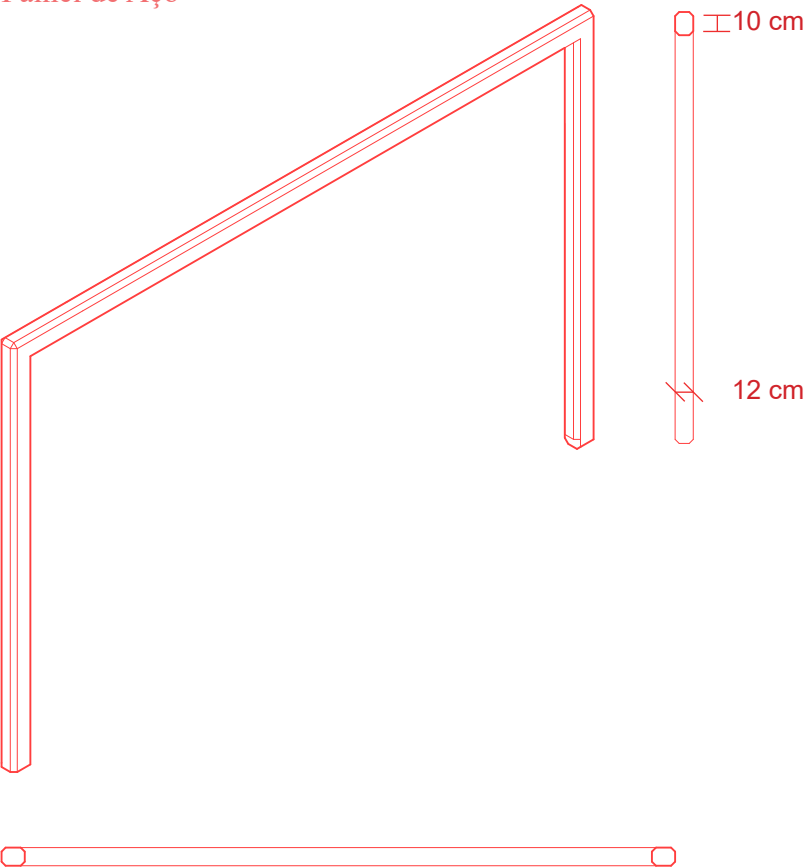
Painel de Betão Armado



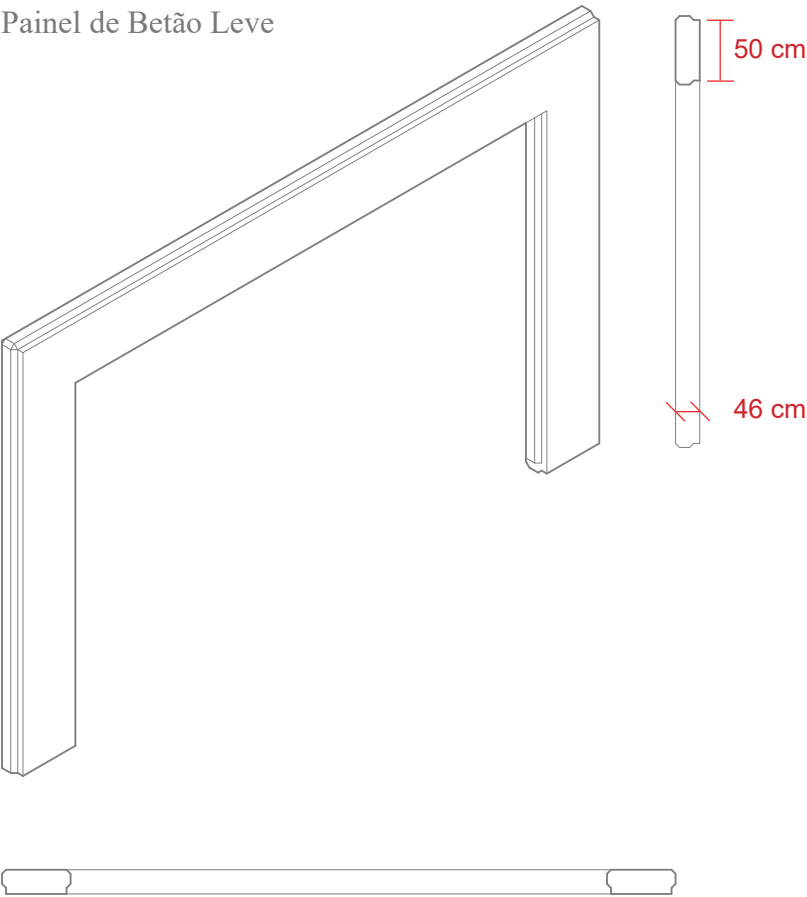
Painel de CLT



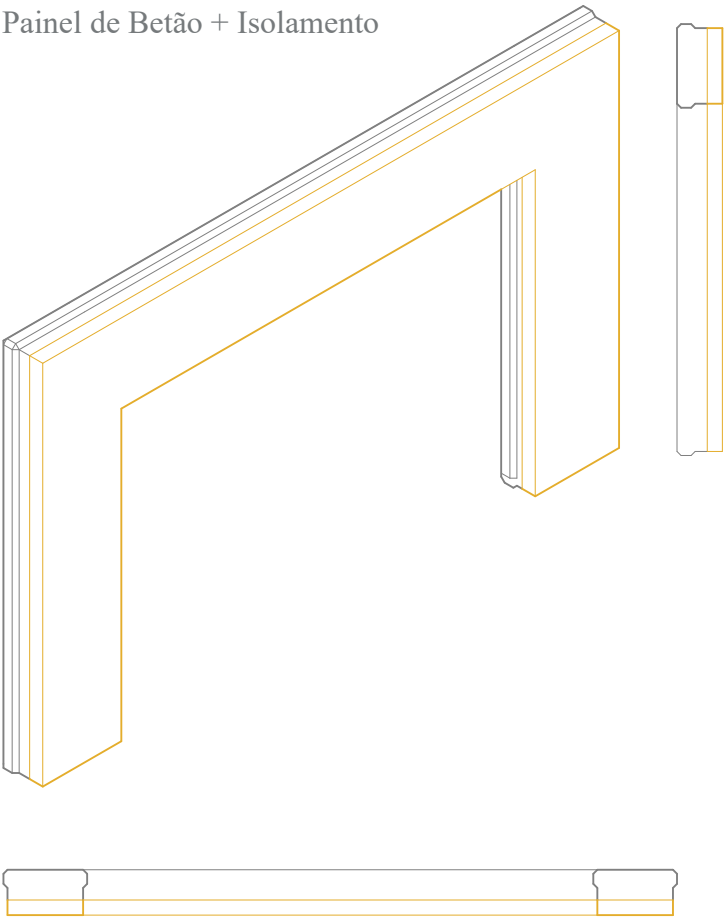
Painel de Aço



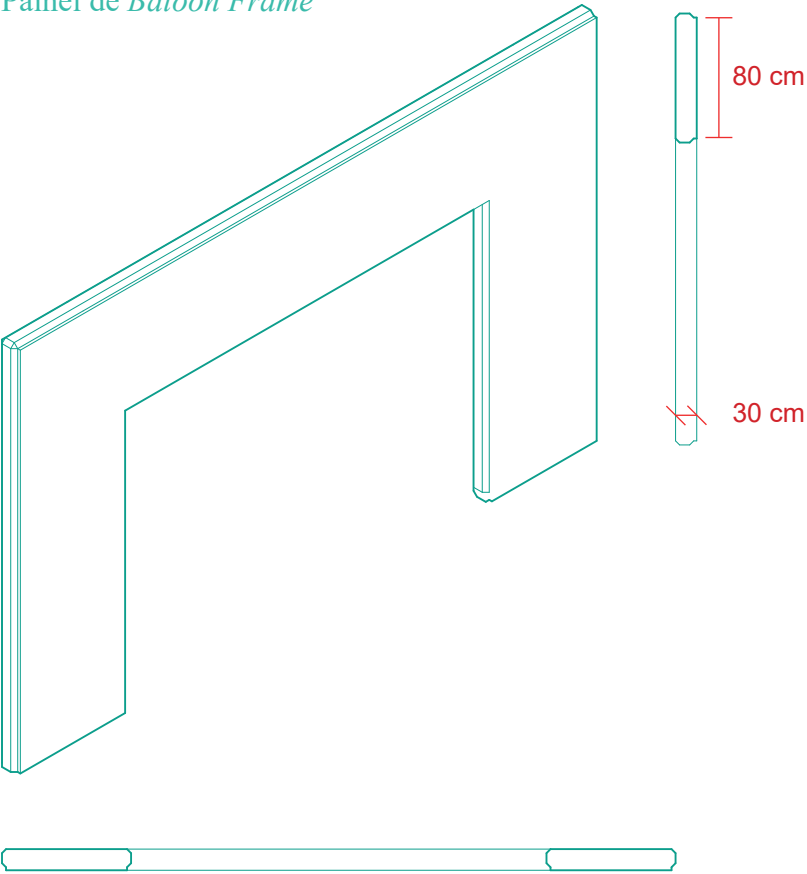
Painel de Betão Leve



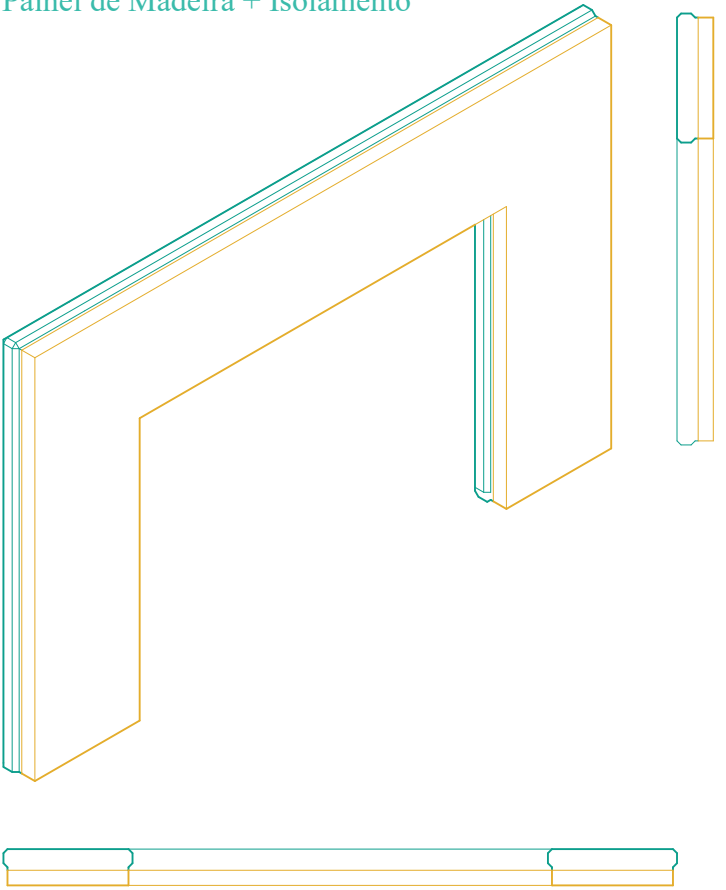
Painel de Betão + Isolamento



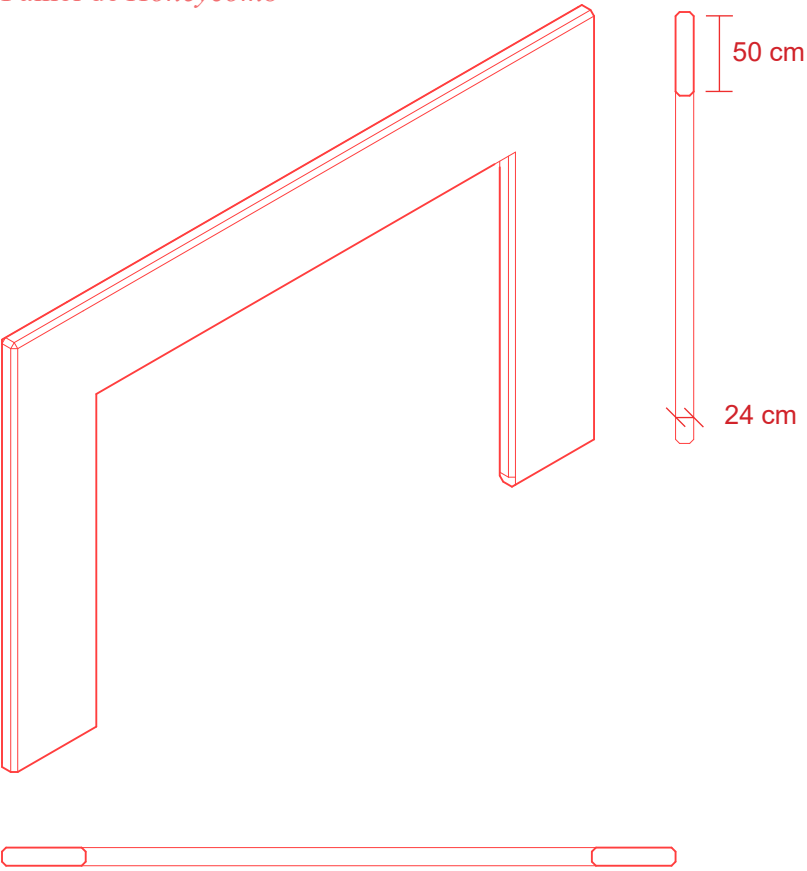
Painel de *Baloon Frame*



Painel de Madeira + Isolamento



Painel de *Honeycomb*



Painel de Metal + Isolamento

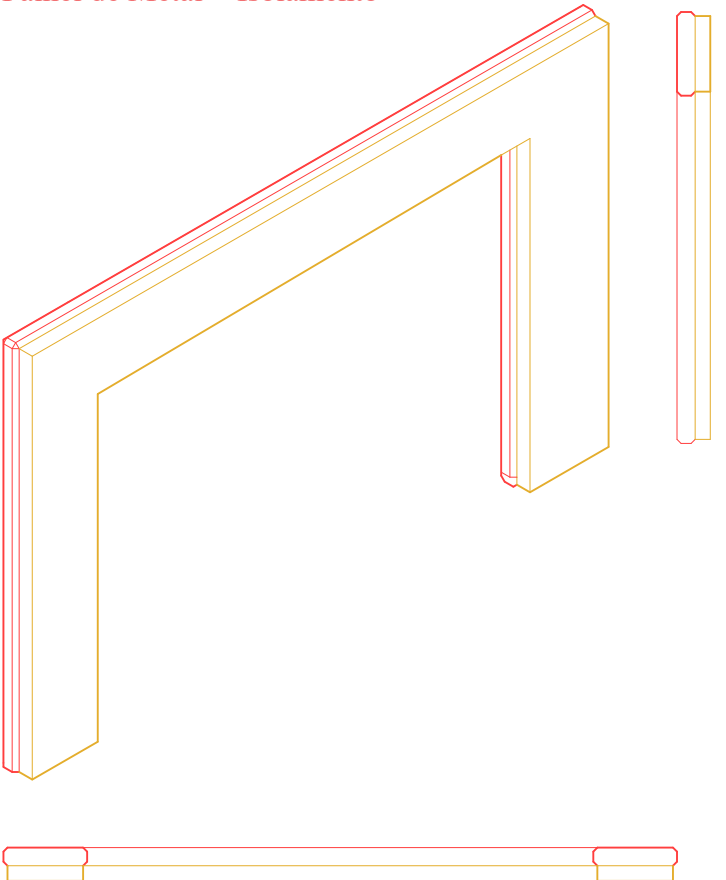
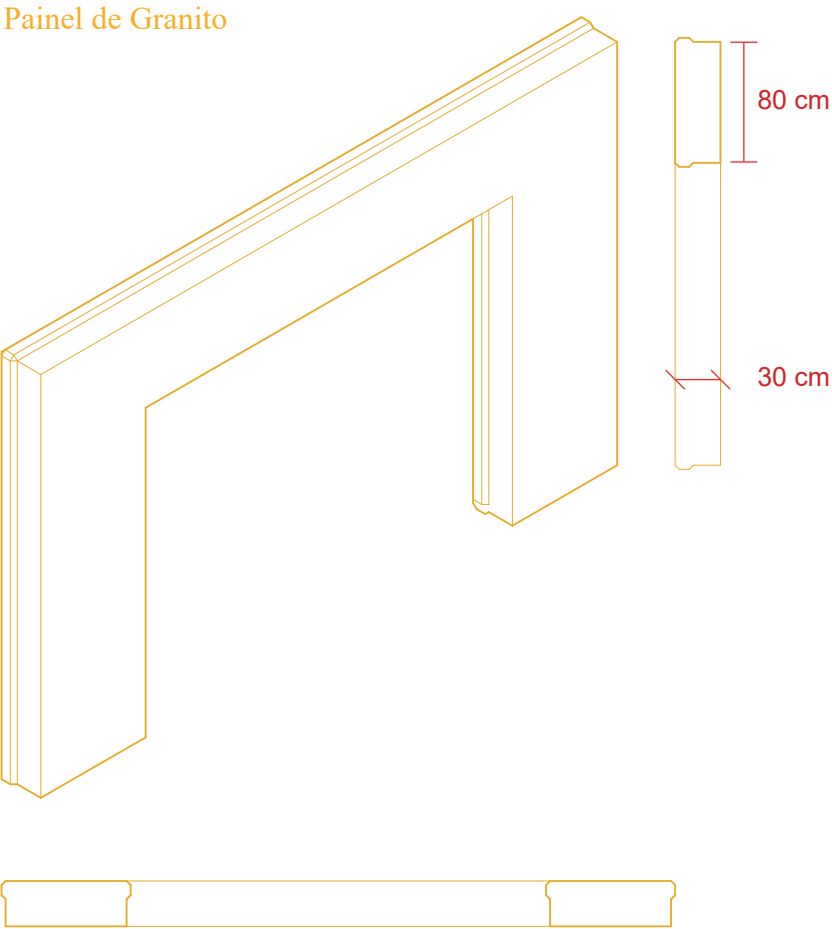


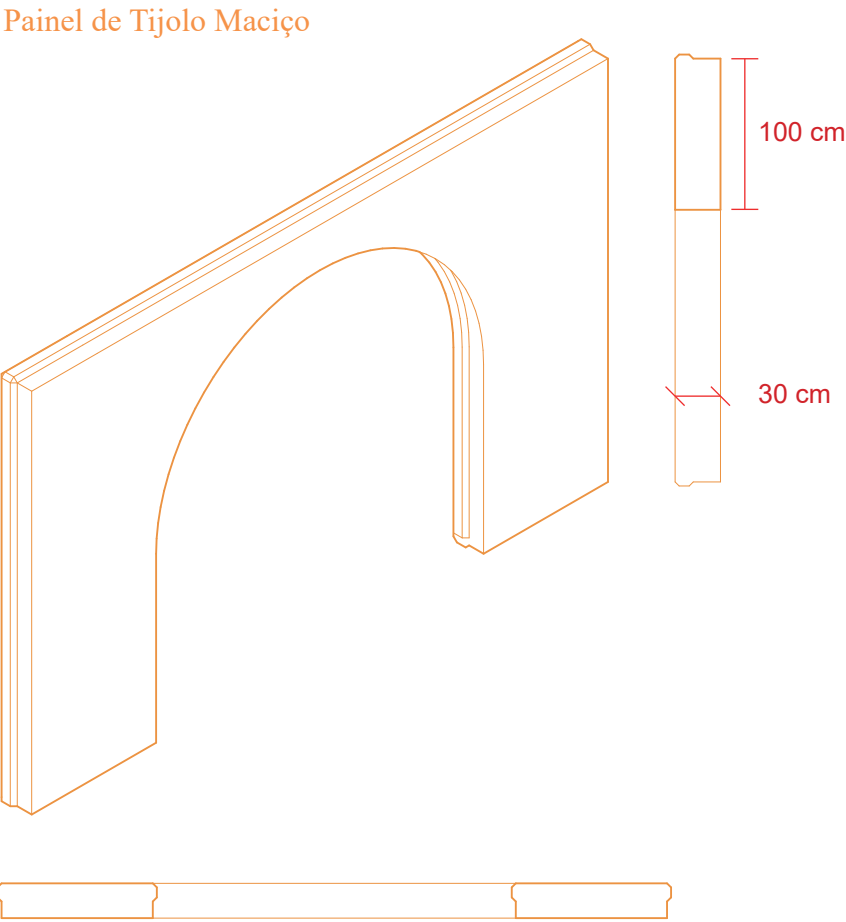
Figura 33 —Painéis de diferentes materiais. (1:50)

Diversidade matériaica dos painéis propostos

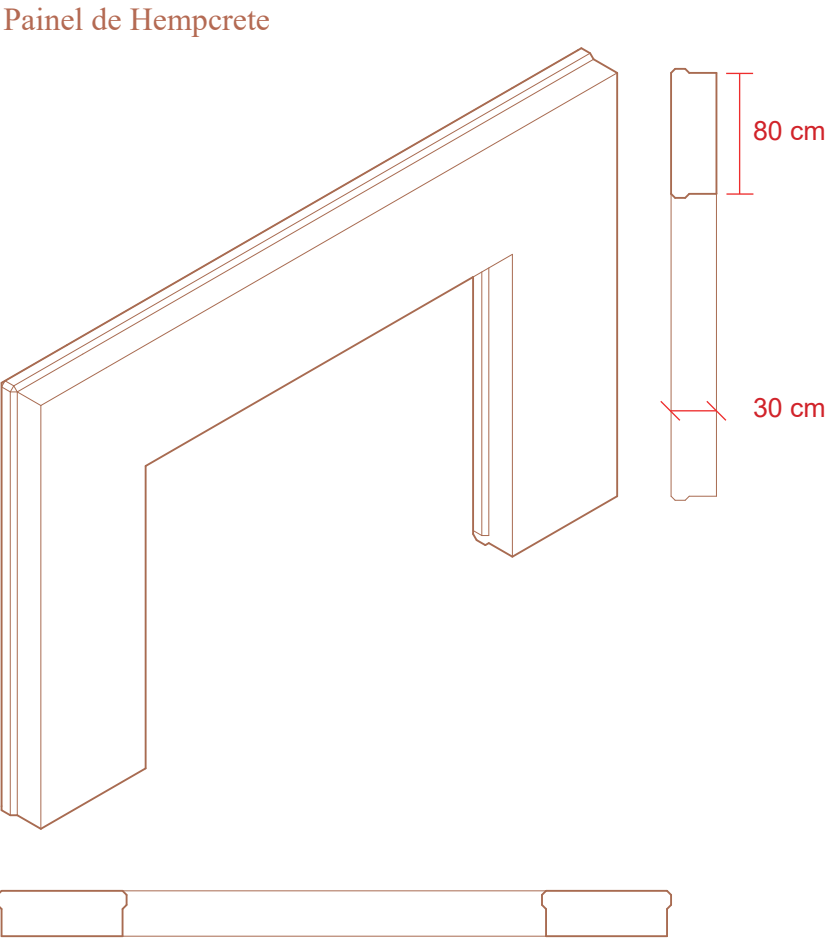
Resistências Mecânicas	Compressão: 130 - 200 Mpa
	Tração : 7 - 25 Mpa
Densidade	2 600 - 2 800 kg/m³
Elasticidade	Módulo: 40 - 70 Gpa
Durabilidade	Vida Útil > 100 anos
Resistência ao Fogo	Incombustível (Classe A1)
Isolamento Acústico	Médio (alta densidade)
Isolamento Térmico	Fraco 3,0 W/m.K
Impermeabilidade	Alta (quando polido)



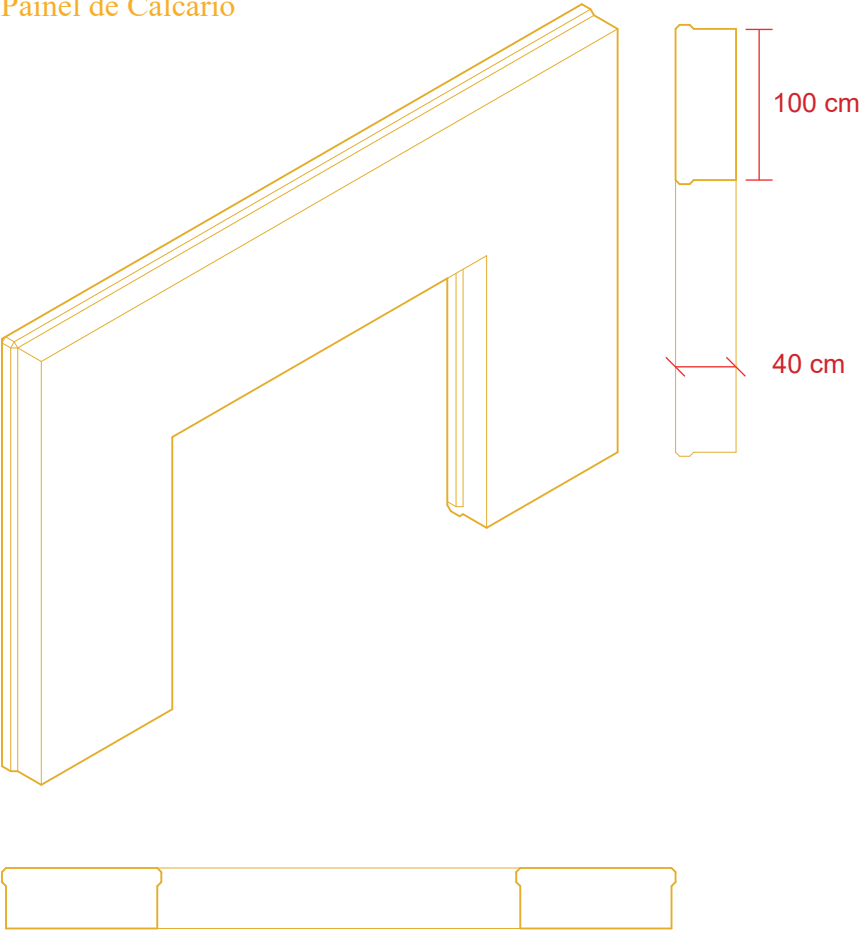
Resistências Mecânicas	Compressão: 10 - 40 Mpa
	Tração : 1 - 3 Mpa
Densidade	1 800 - 2 000 kg/m³
Elasticidade	Módulo: 15 - 20 Gpa
Durabilidade	Vida Útil > 100 anos
Resistência ao Fogo	Incombustível (Classe A1)
Isolamento Acústico	Médio (massa razoável)
Isolamento Térmico	Médio 0,6 - 0,9 W/m.K
Impermeabilidade	Médio (absorve água)



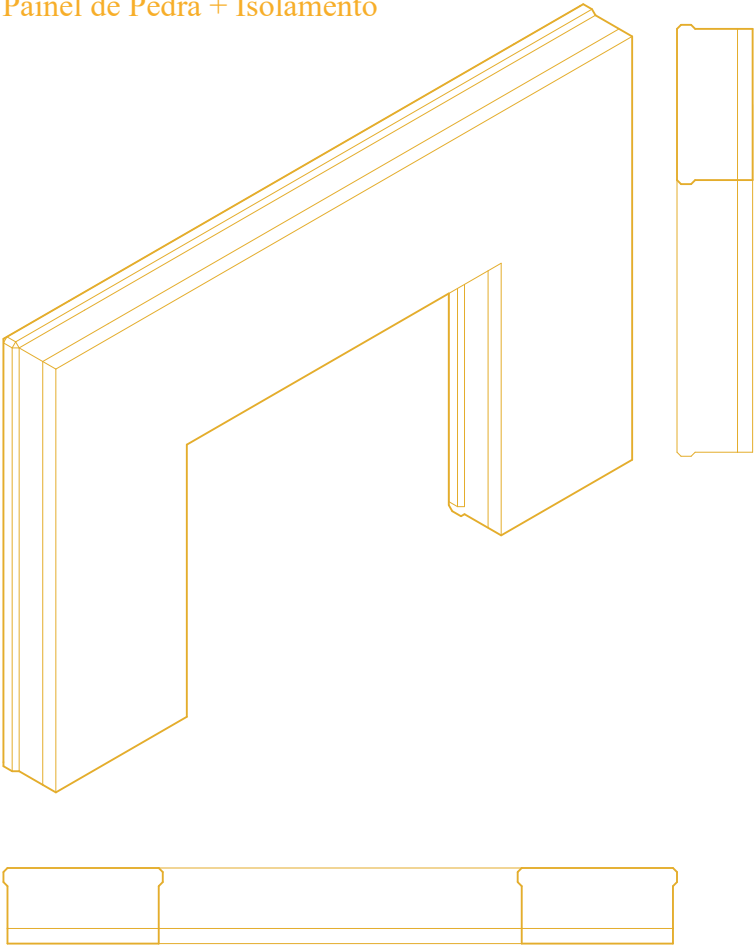
Resistências Mecânicas	Tração : 0,05 - 0,3 Mpa
	Compressão: 0,3 - 3,5 Mpa
Densidade	300 - 500 kg/m³
Elasticidade	Módulo: 0,5 Gpa
Durabilidade	Vida Útil > 50 anos
Resistência ao Fogo	Auto extingüível (Classe A)
Isolamento Acústico	Muito Bom
Isolamento Térmico	Excelente 0,07 - 0,1 W/m.K
Impermeabilidade	Baixa (altamente permeável ao vapor)



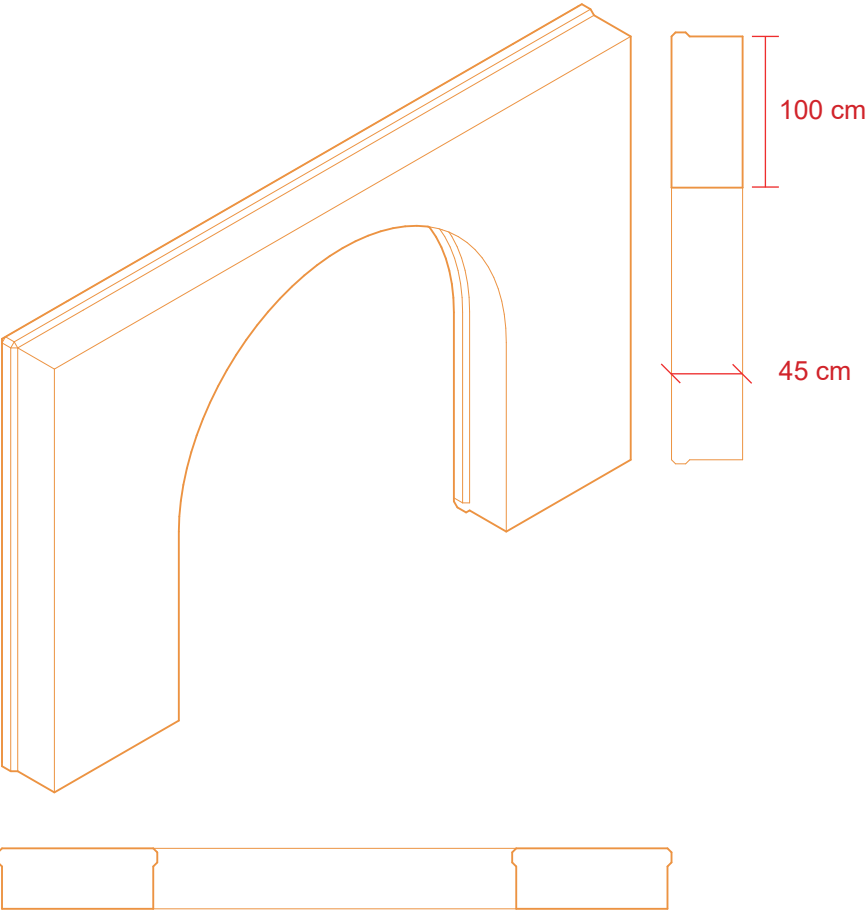
Painel de Calcário



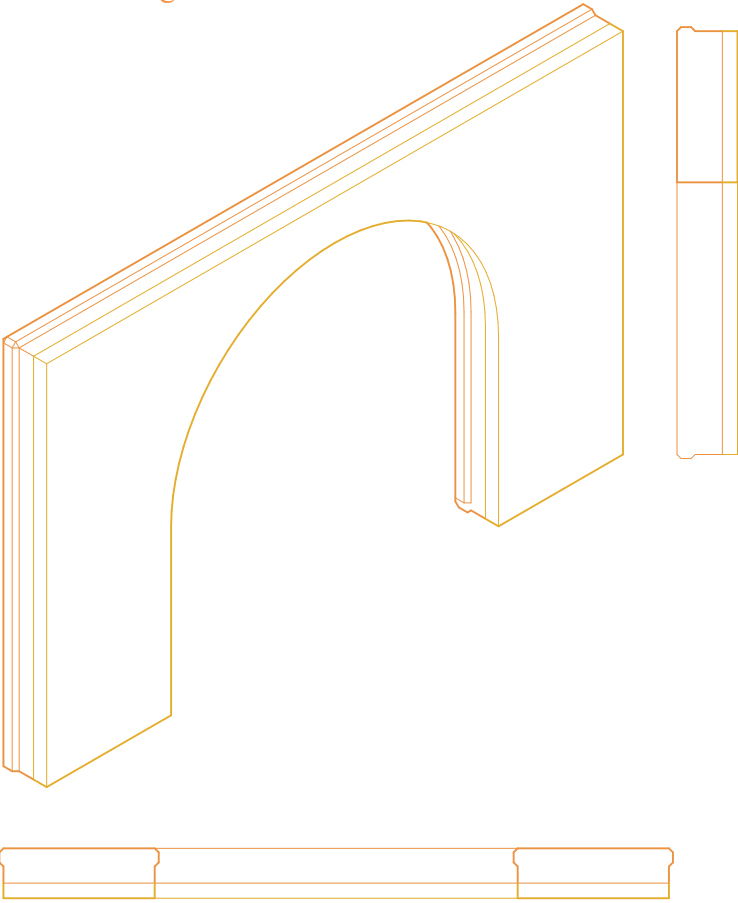
Painel de Pedra + Isolamento



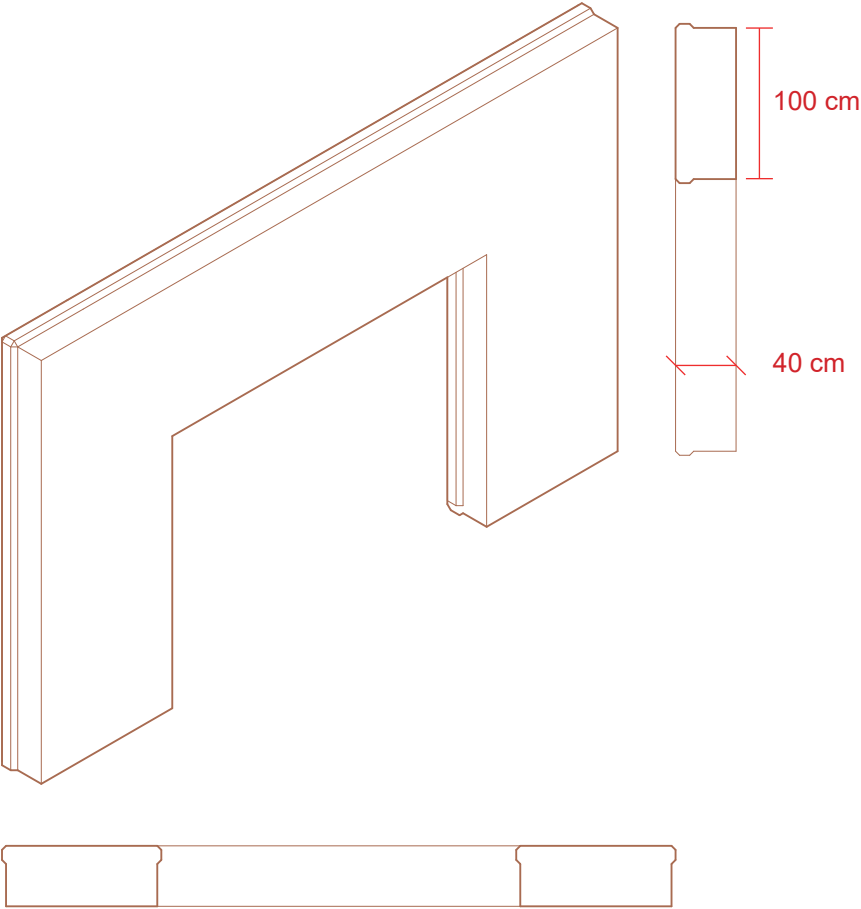
Painel de Terracota



Painel de Argila + Isolamento



Painel de Terra Compactada



Painel de Terra + Isolamento

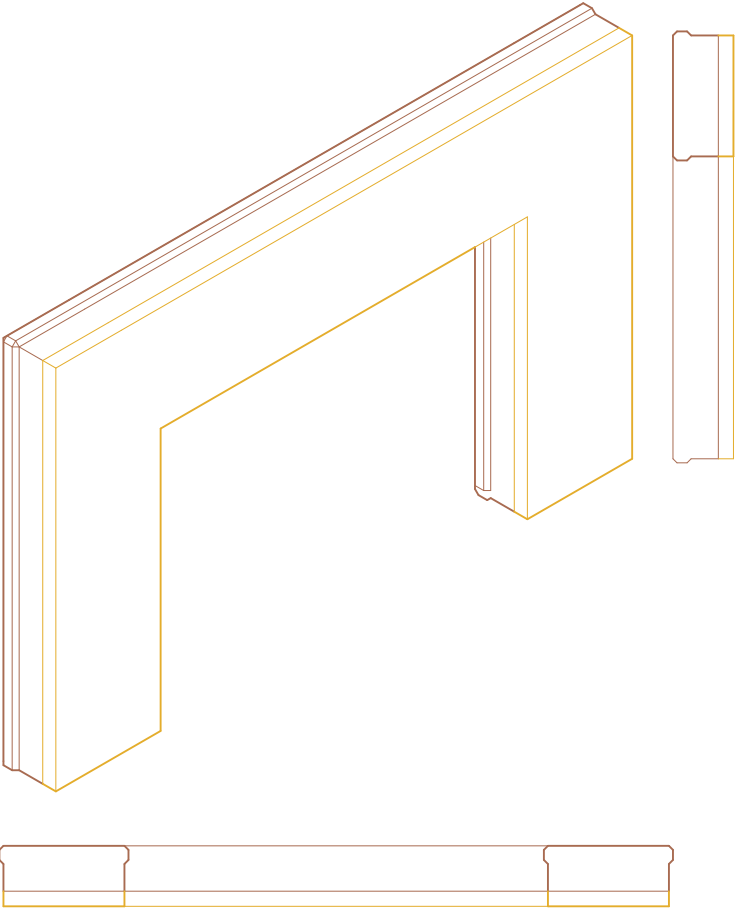
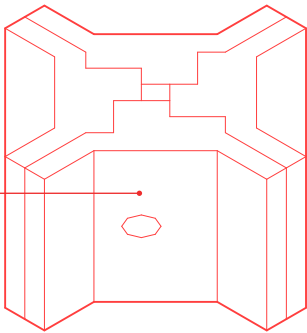
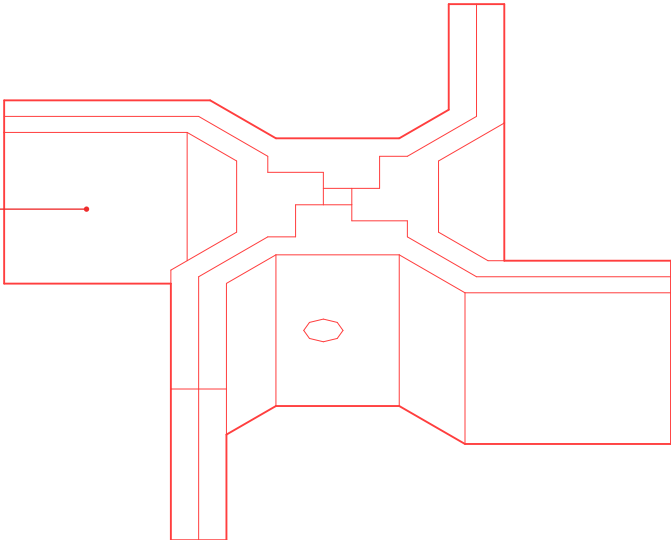


Figura 34 — Painéis de diferentes materiais. (1:50)

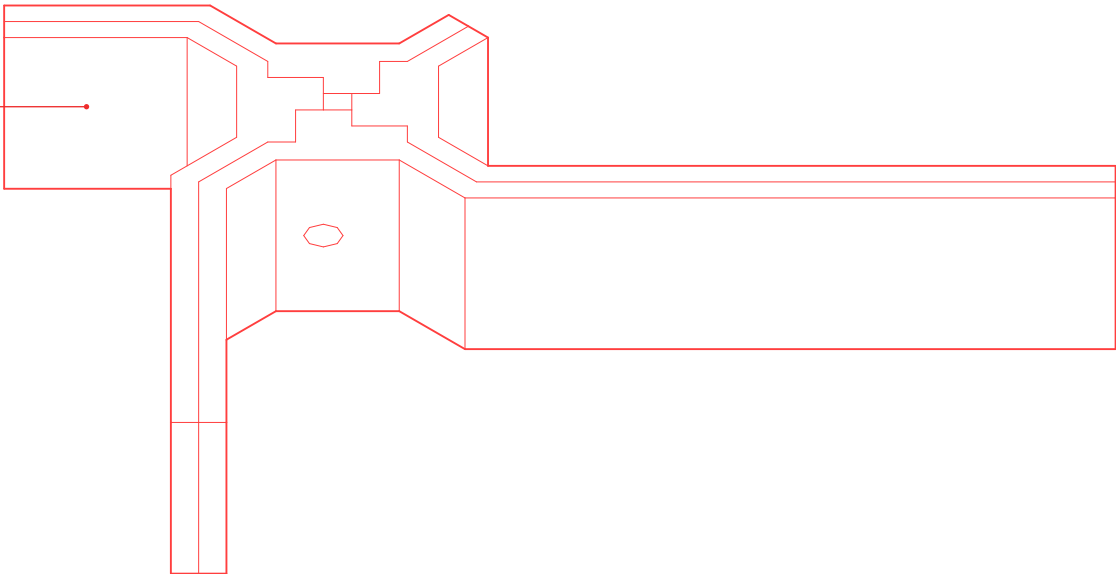
União e ancoragem base, tamanho mínimo do painel 12cm de espessura



Peça de união base, para painéis de 24cm de espessura



Adaptação da peça de união a diferentes espessuras de painéis, através da variação de comprimento das laterais da peça



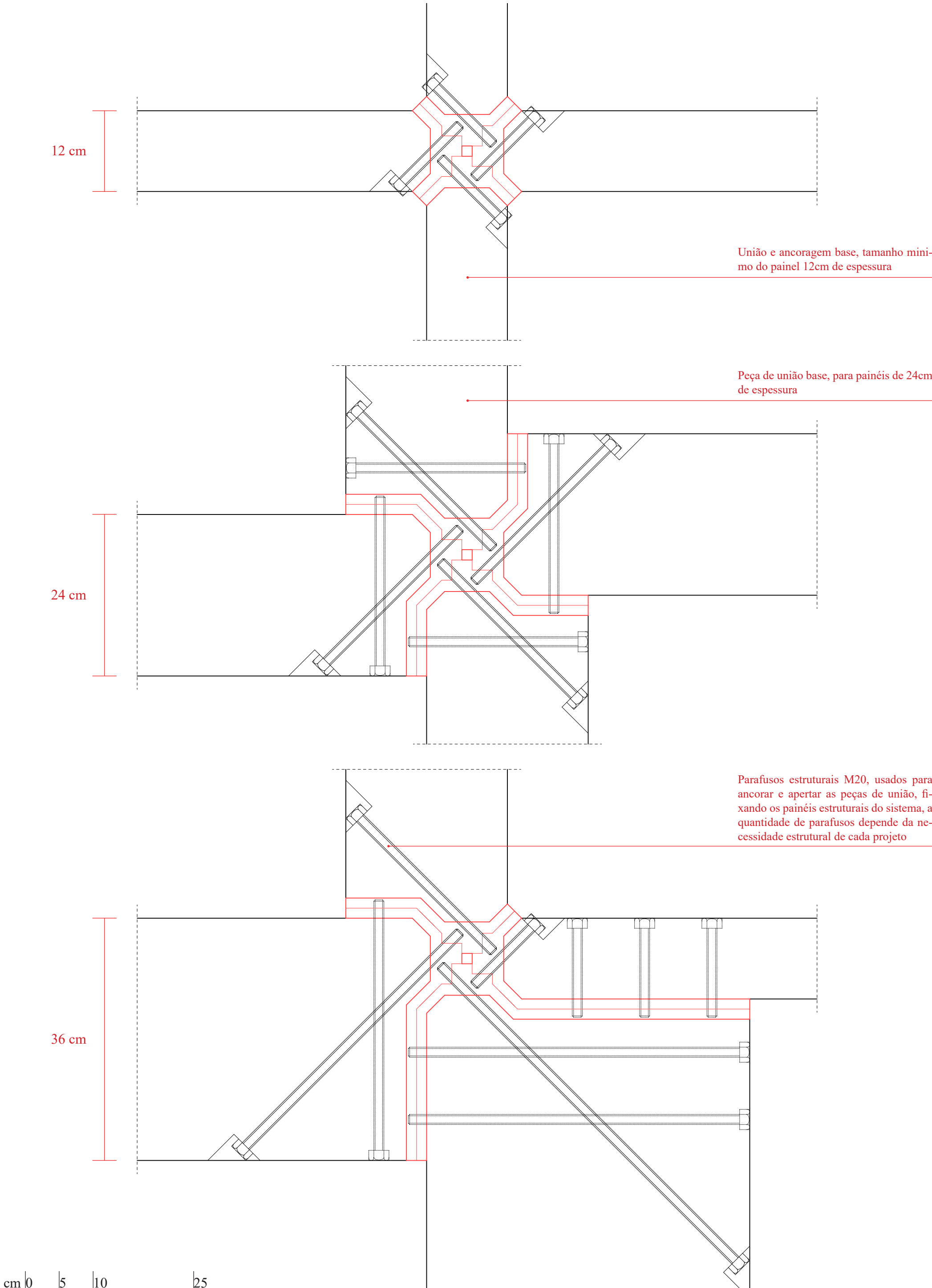


Figura 36 — Adaptação da ancoragem a diferentes espessuras de painéis. (1:5)

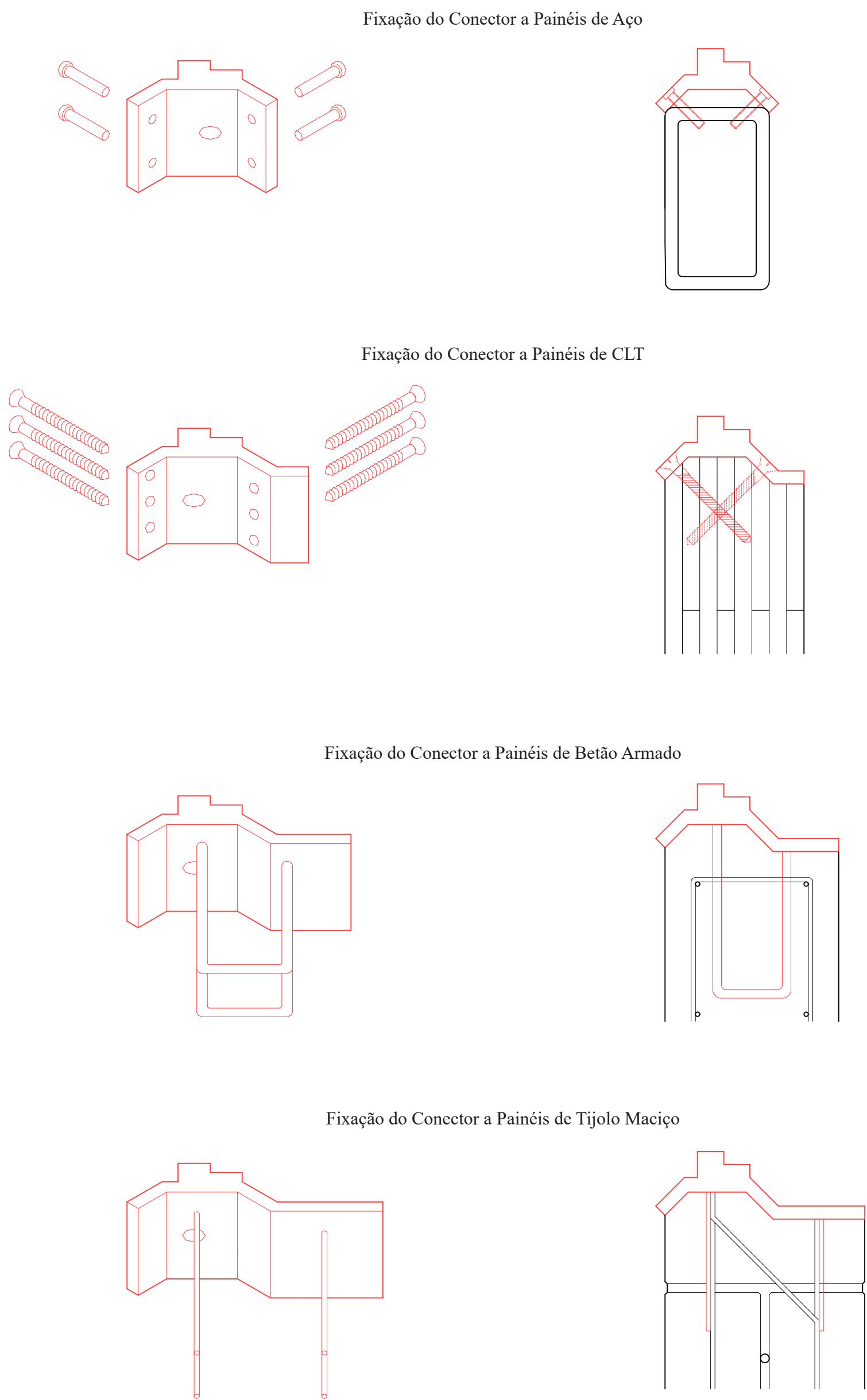


Figura 37 — Fixação do conector a diferentes materiais. (1:5)

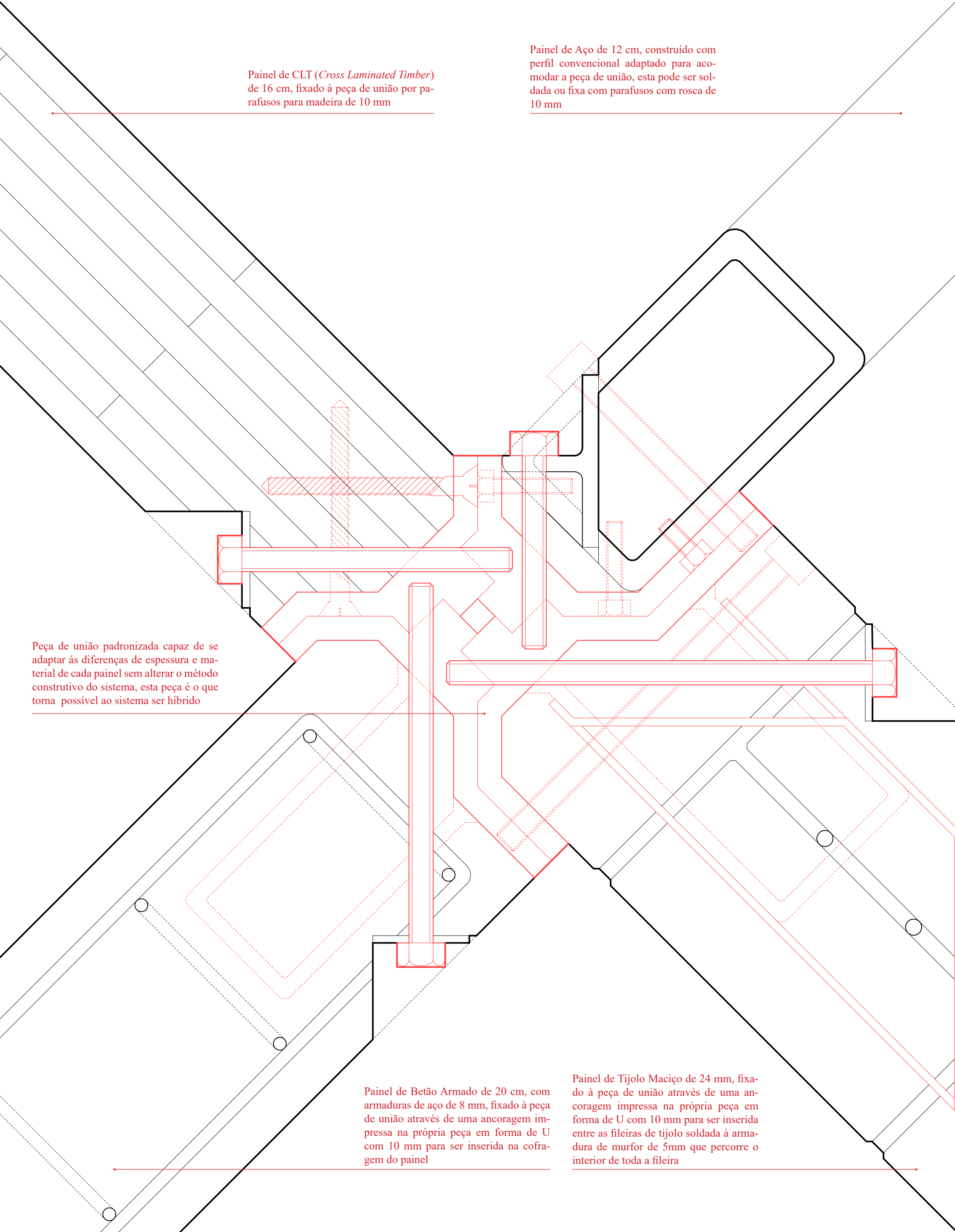
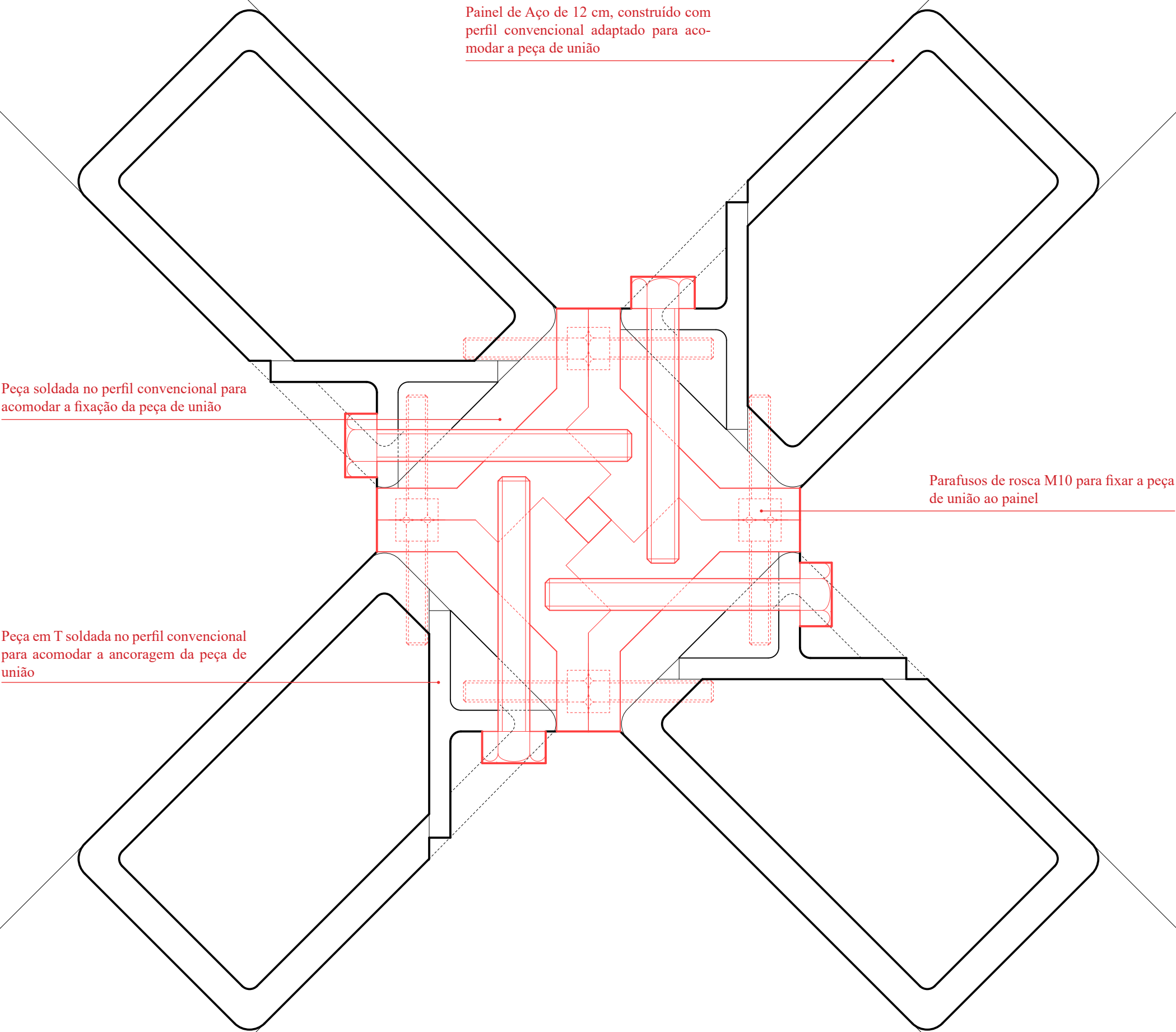
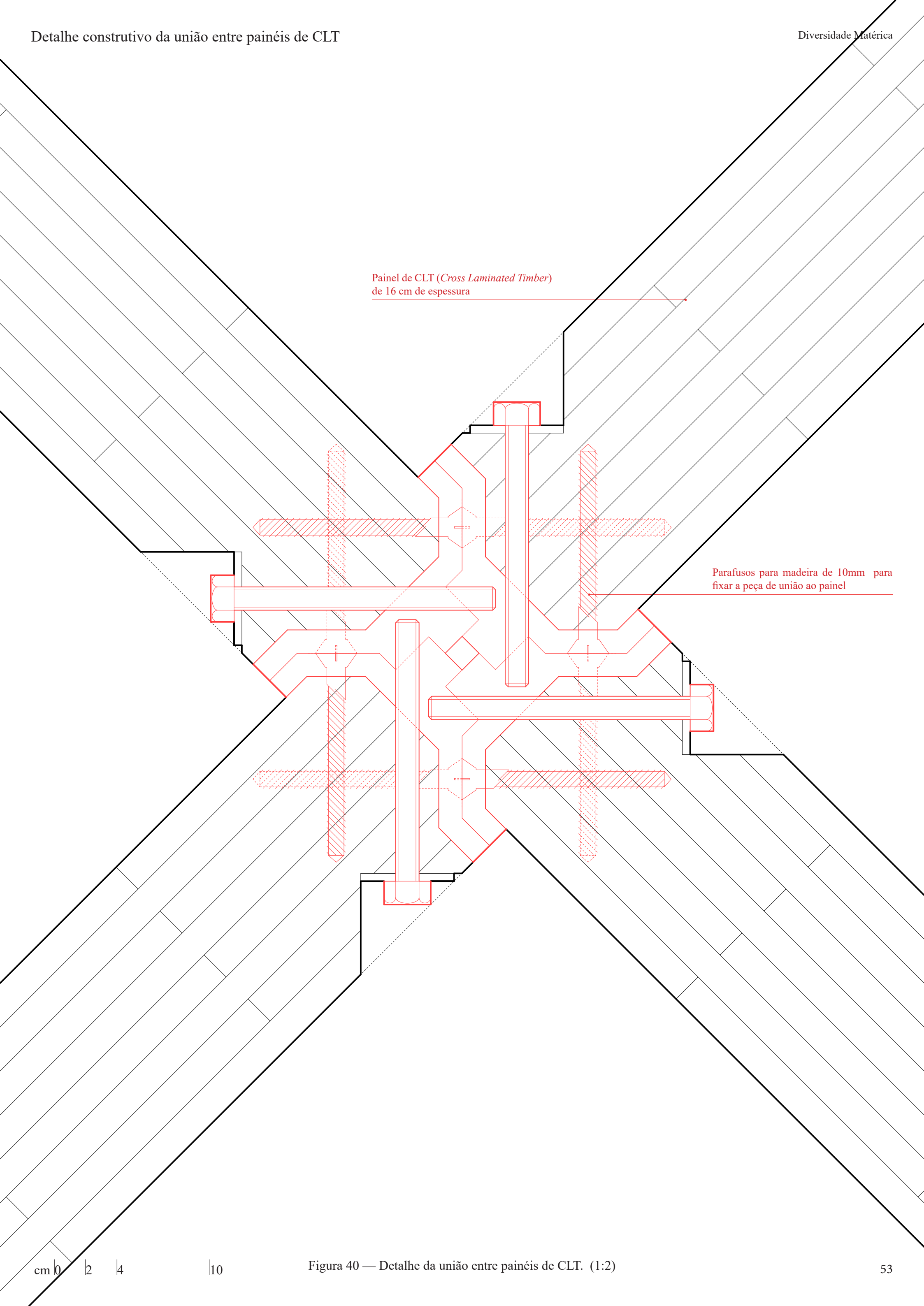


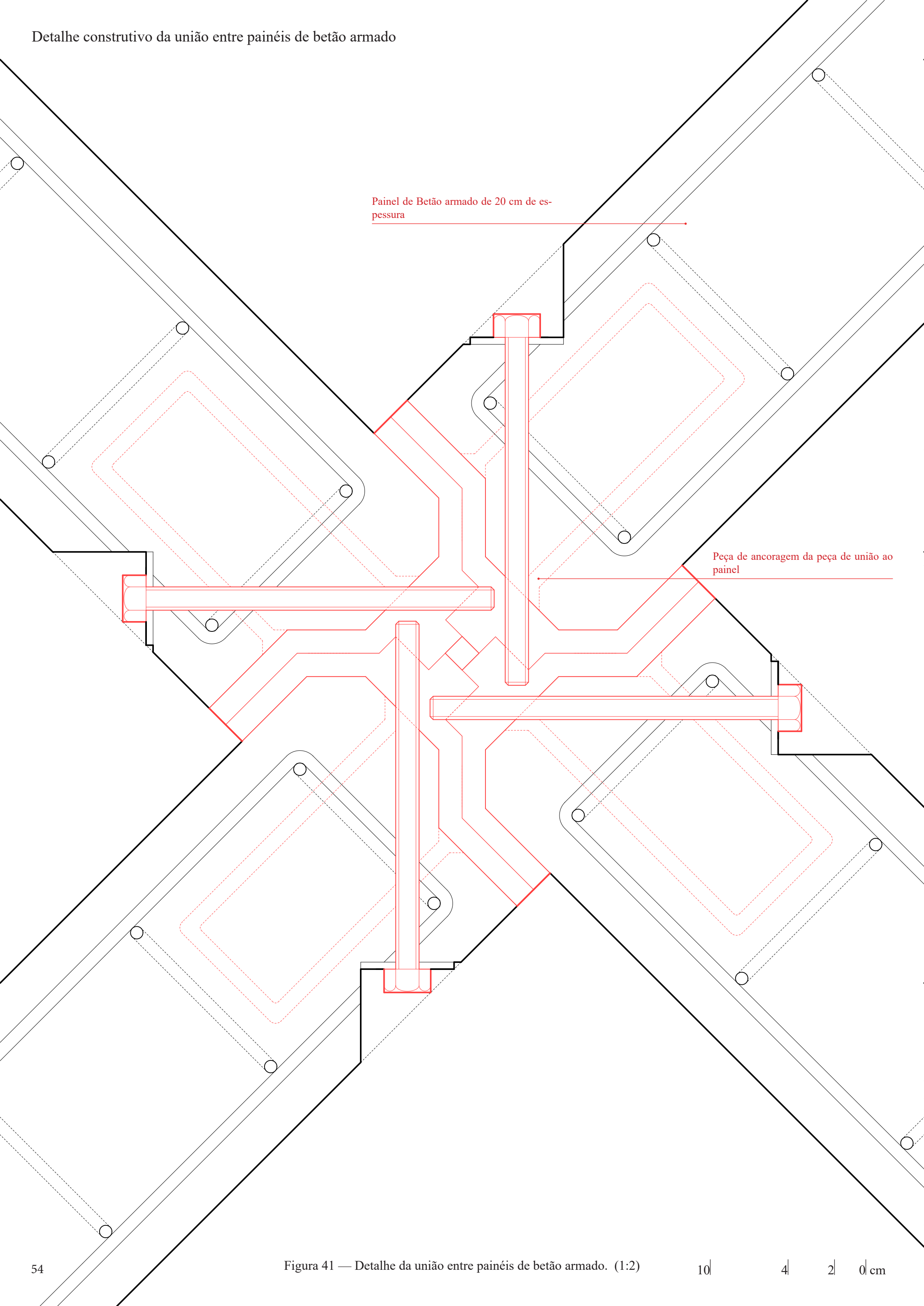
Figura 38 — Detalhe da união proposta. (1:2)

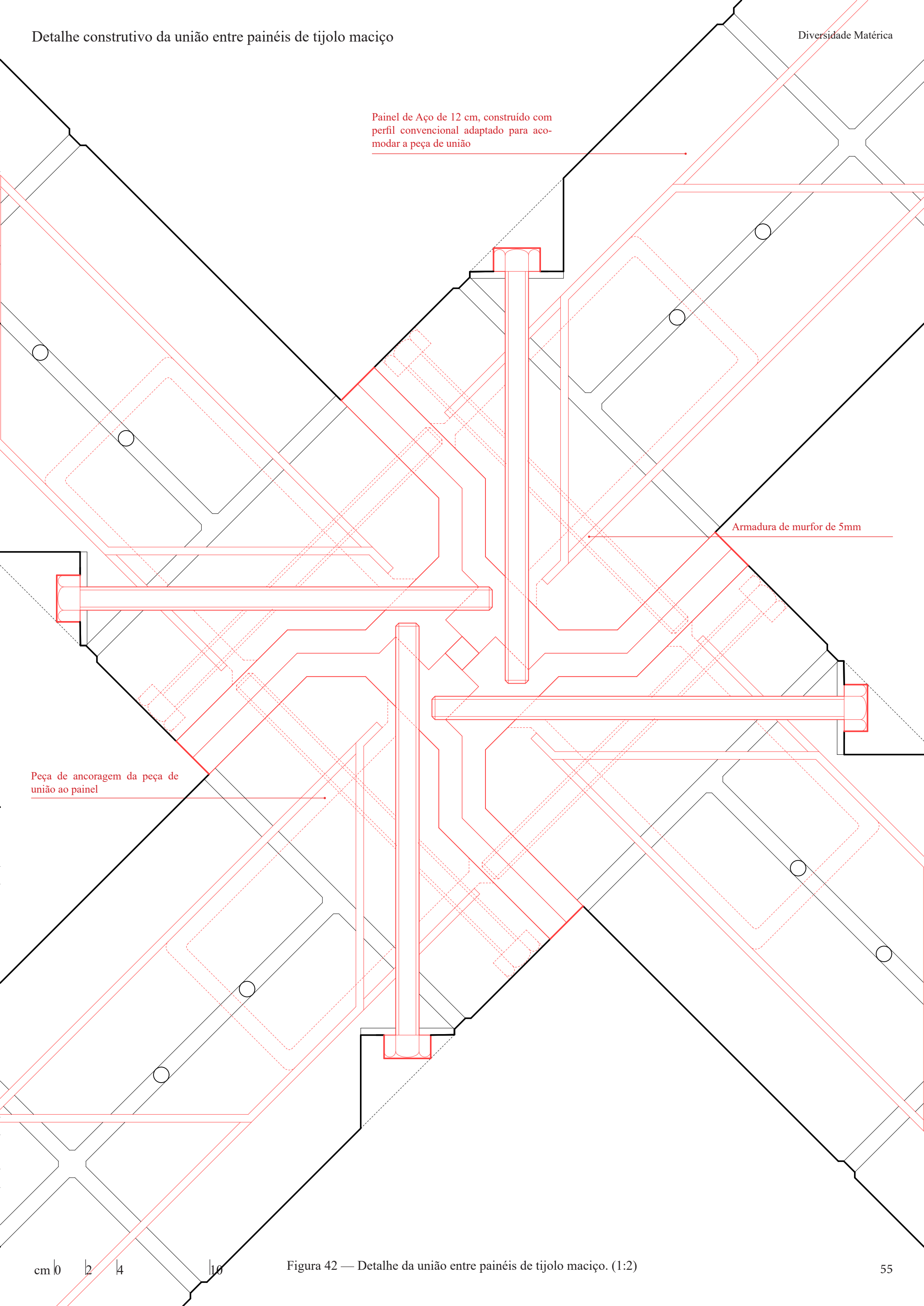




Painel de CLT (*Cross Laminated Timber*)
de 16 cm de espessura

Parafusos para madeira de 10mm para
fixar a peça de união ao painel





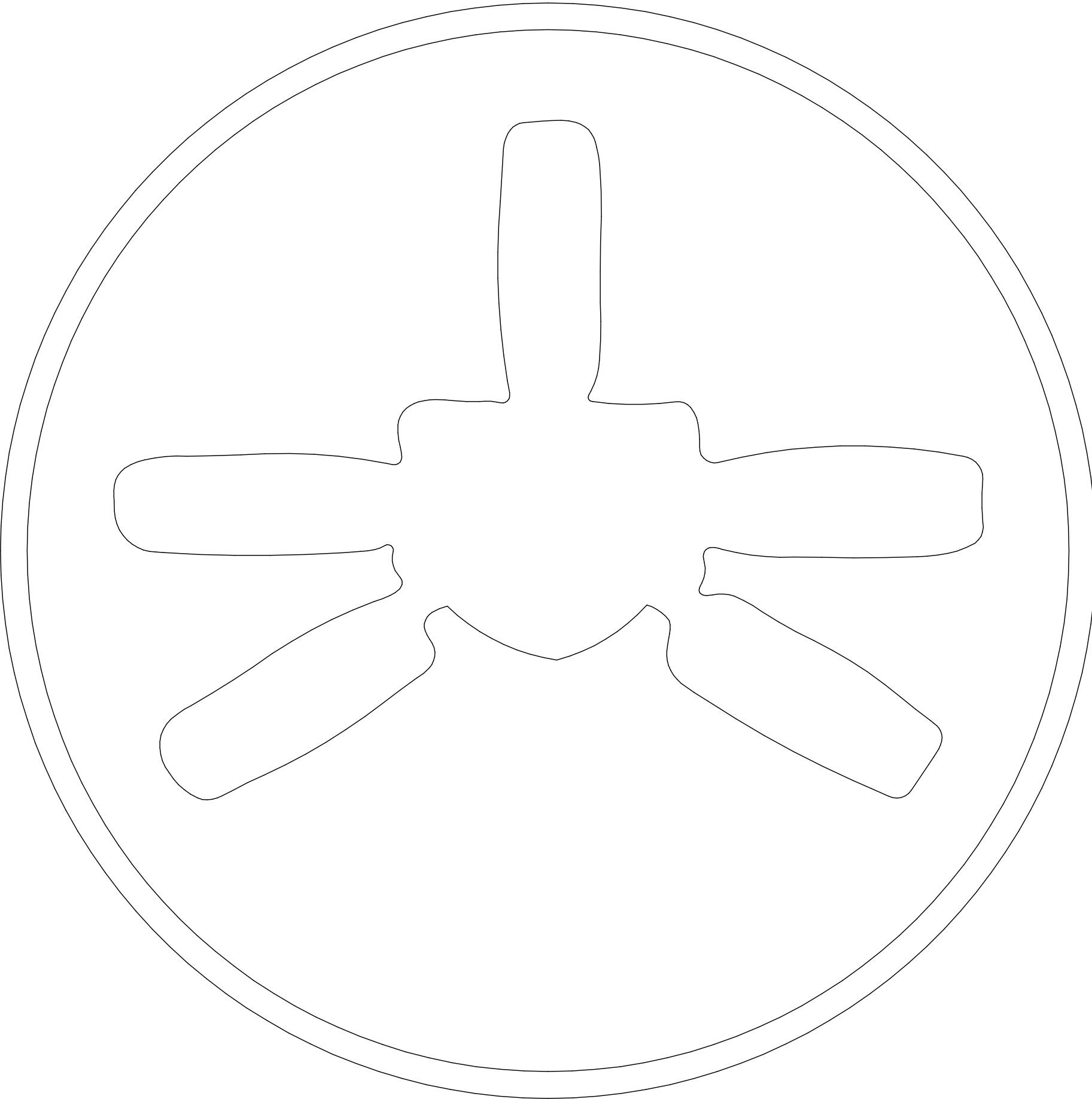
Painel de Aço de 12 cm, construído com perfil convencional adaptado para acomodar a peça de união

Armadura de murfor de 5mm

Peça de ancoragem da peça de união ao painel

III

VERSATILIDADE FUNCIONAL



Tipologia proposta



Dymaxion House

A versatilidade funcional é crucial num sistema construtivo verdadeiramente industrializado, pois apreende a capacidade de adaptação ao longo do tempo e às variadas necessidades humanas — sejam mudanças de uso, alterações demográficas ou especificidades culturais. A arquitetura industrial deve, tal como um organismo vivo, ser capaz de se reconfigurar sem perda de identidade ou desempenho.

Richard Buckminster Fuller foi pioneiro ao conceber a *Dymaxion House*, como uma «máquina de habitar» completa, pensada para ser produzida em massa como um automóvel, distribuída globalmente em embalagens planas e montada em poucas horas. Fuller antecipou preocupações atuais, como a eficiência energética e a pegada ambiental mínima. Fuller idealizou um sistema que dispensava paredes portantes — a casa pendia de um mastro central, permitindo uma planta circular flexível — e centralizava as infraestruturas essenciais (cozinha, casa de banho, rede hidráulica e elétrica) num núcleo modular. Graças a este conceito, os espaços adjacentes poderiam expandir-se ou contrair-se conforme a situação: quartos podiam encolher para ampliar a sala durante a visita de convidados, por exemplo. Fuller estimava que essa «ephemeralização» — o aumento de eficiência para produzir mais com menos recursos, tempo e esforço — representava o futuro da habitação.

A *Dymaxion House* incluía também tecnologias avançadas para a época: uma sanita a vácuo sem água, chuveiro compacto de alta eficiência, turbinas eólicas para geração, cisternas de recolha de água da chuva e ventilação natural por efeito chaminé. Era uma casa com autoconsumo, que antecipava a contemporânea preocupação com a elegância funcional.

Apesar de nunca ter sido produzida em larga escala, a *Dymaxion House* mostrou que a padronização pode coexistir com liberdade espacial, tecnologia de ponta e construção sustentável. Foi uma demonstração de que a pré-fabricação não exige rigidez — pode gerar edifícios expressivos, de alta performance e adaptáveis.

Versatilidade funcional da *Dymaxion House*

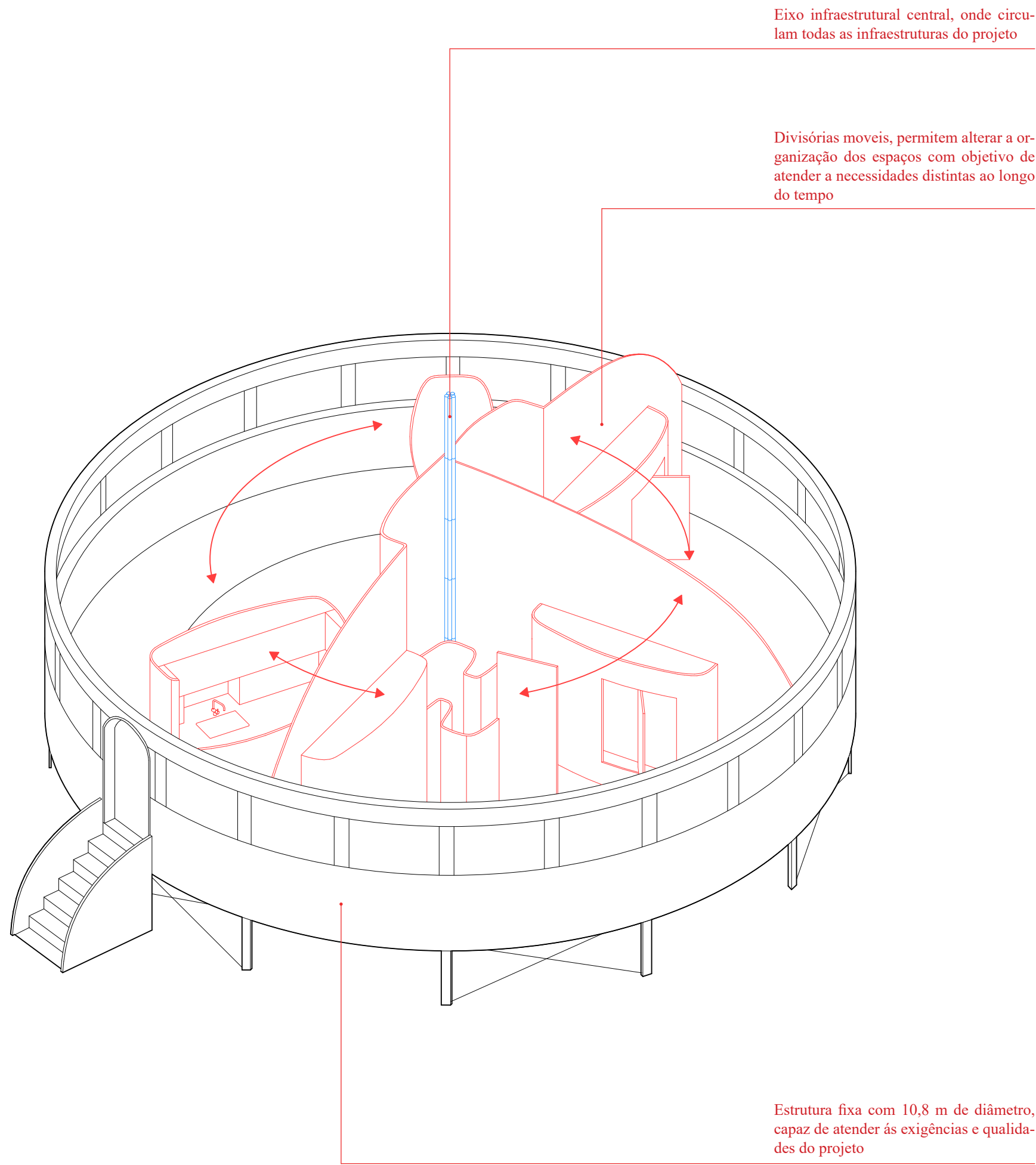


Figura 45 — Versatilidade funcional da *Dymaxion House*. (1:50)



DYMAXION HOUSE
1929 - 1947

Autor	Richard Buckminster Fuller
Construtora	<i>Beech Aircraft Company</i>
Programa	Habitação Individual
Sistema	<i>Dymaxion Dwelling Machine</i>

Área	103 m ²
Custo de Obra	6 500\$ (1946)
Tempo de Montagem	48 h
Numero de Exemplares	2



Figuras 46-50 — *Dymaxion House*. Wichita, Estados Unidos, 1929-1947.

Tipologia Proposta

O modelo proposto nesta tese aprofunda essa herança funcional, mantendo a estrutura modular, mas libertando-a completamente do paradigma da parede portante. Os painéis bidimensionais tornam-se unidades autónomas e estruturais, permitindo composições livres e expansíveis. Podem assumir geometrias variadas, liberam o desenho arquitetónico de condicionamentos e abrem caminho à edificação orgânica e contextual.

As infraestruturas continuam concentradas em núcleos húmidos pré-fabricados — cozinha, casa de banho, instalações técnicas — mas agora encaixam-se perfeitamente nos painéis modulares através de conectores universais. Isso torna possível a reconfiguração fácil desses espaços no edifício terminado, sem intervenção estrutural pesada, antecipando os usos futuros e prolongando o ciclo de vida útil da construção.

Além disso, o sistema permite expansão incremental: construções modulares podem ser prolongadas em qualquer direção, desmontadas ou remontadas sem atacar o conjunto. Esse tipo de mutabilidade é crucial em habitação coletiva, onde variações de composição social ou familiar exigem reações rápidas, económicas e eficientes.

Com estes avanços, o sistema proposto dá continuidade ao legado da *Dymaxion House* ao unir o desempenho tecnológico com a adaptabilidade, mantendo coerência estrutural, logística racional e liberdade criativa.

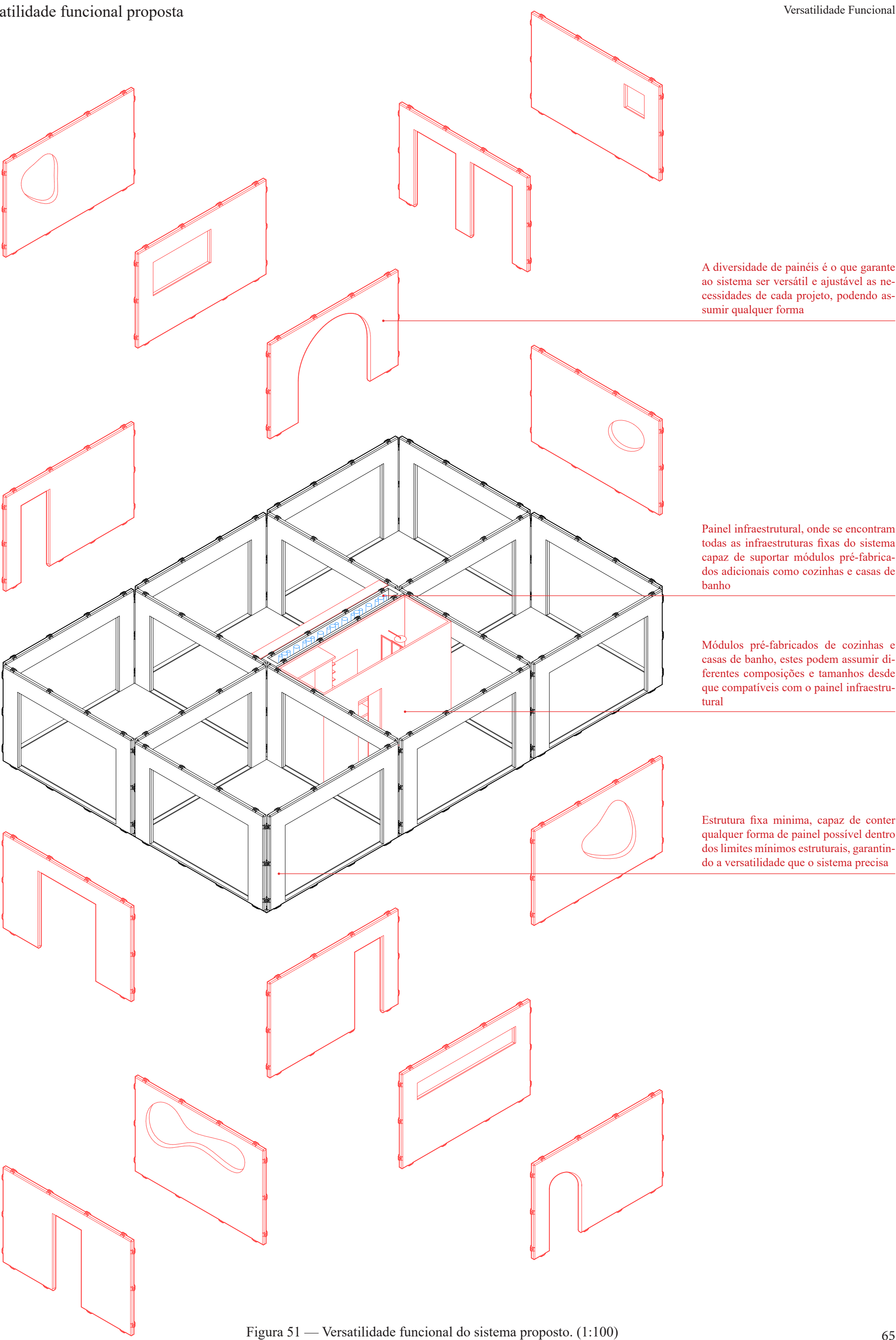
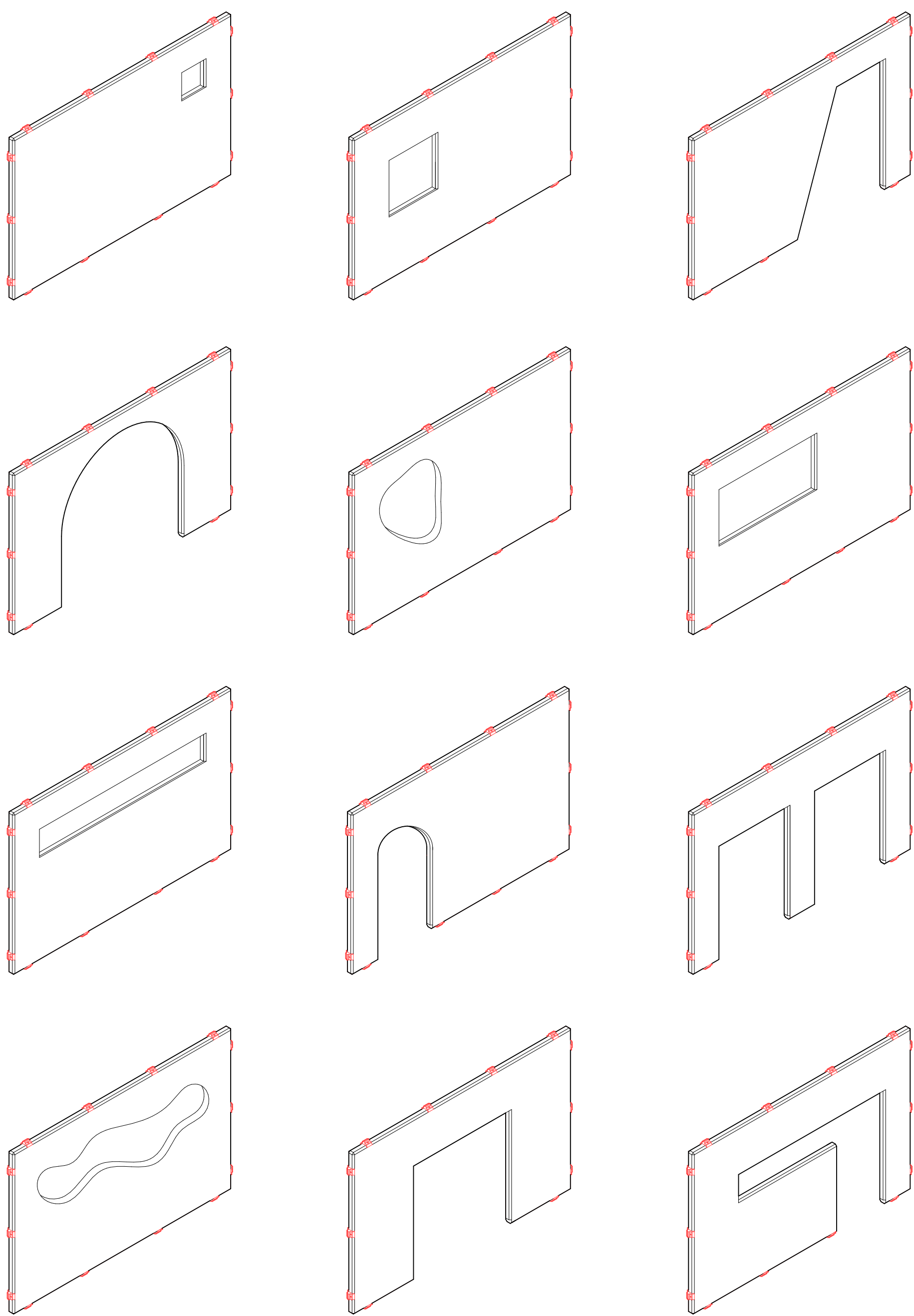


Figura 51 — Versatilidade funcional do sistema proposto. (1:100)



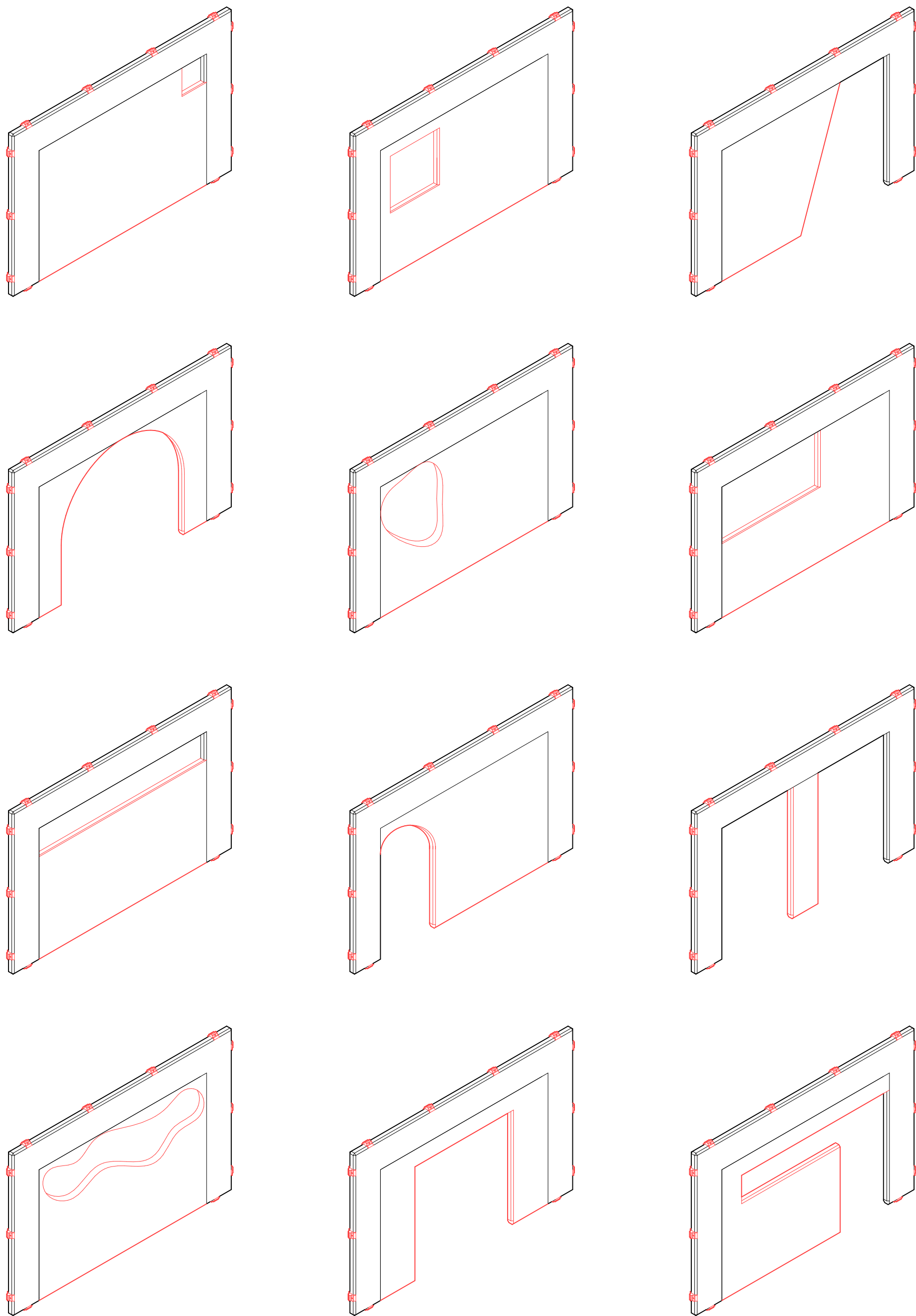
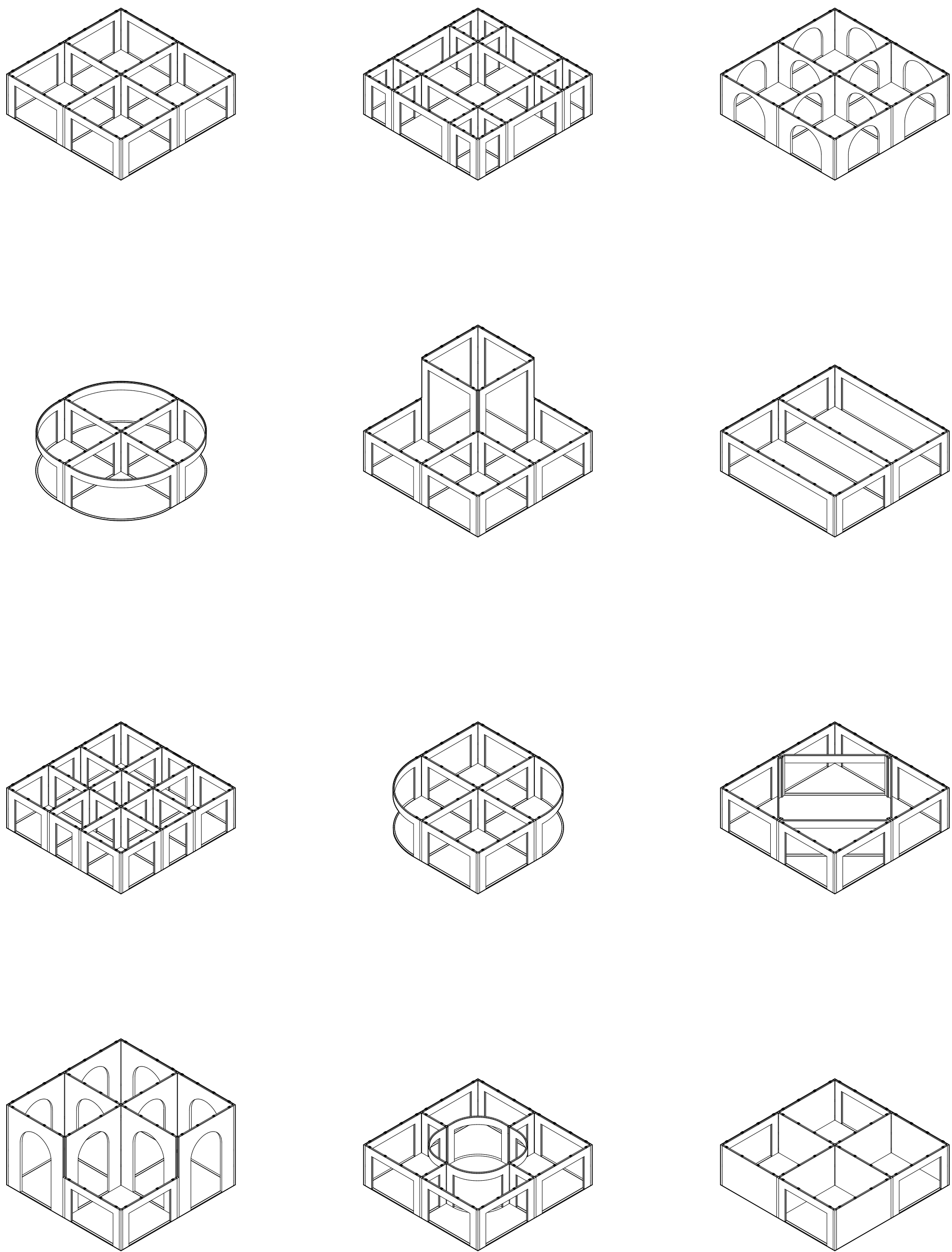


Figura 53 — Catálogo da variedade formal dos painéis. (1:100)



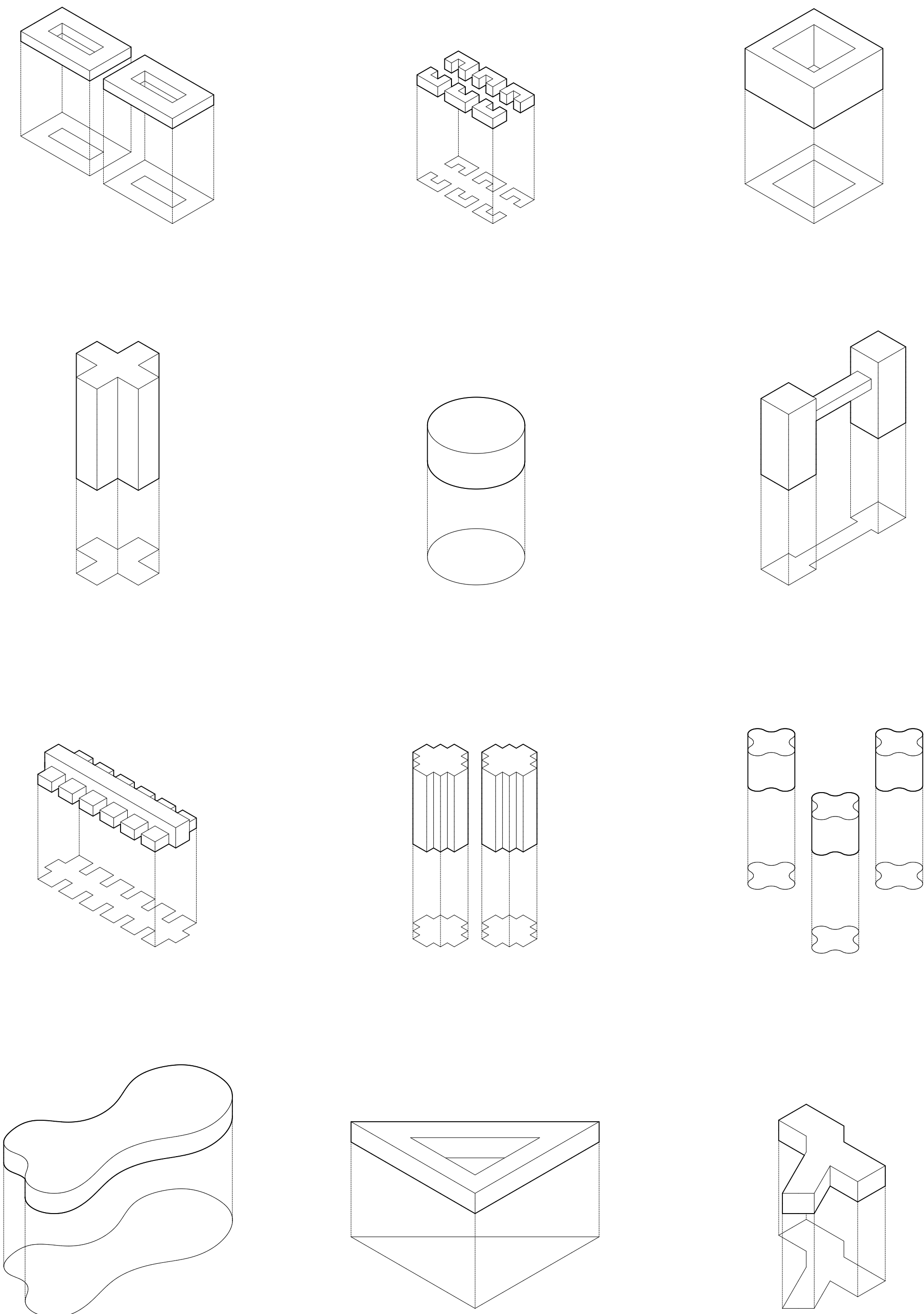


Figura 55 — Catálogo de variedade de projetos. (1:2000)

IV

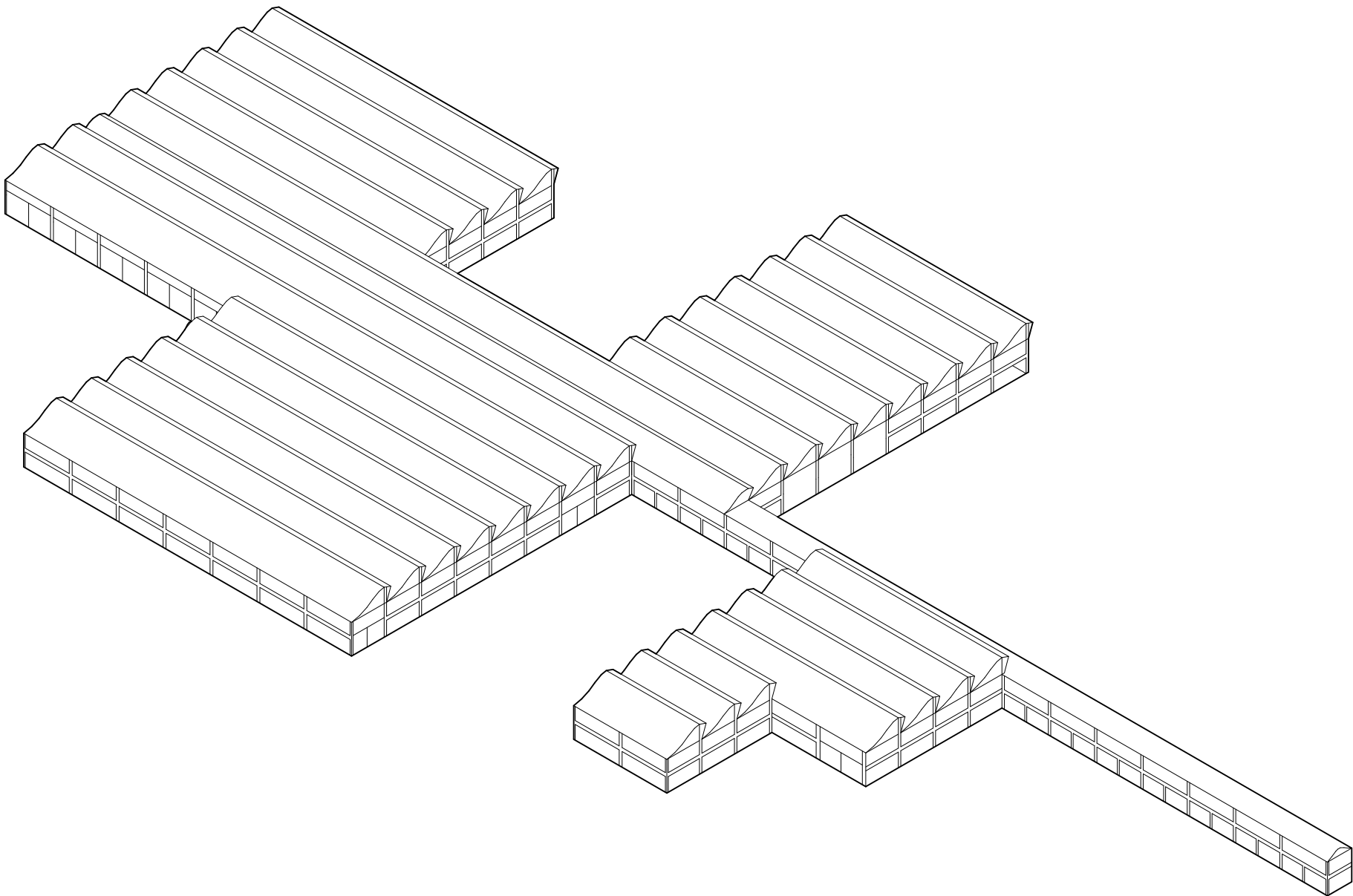
IV

IV

IV

EFICIÊNCIA PRODUTIVA

Fábrica CTRS



Fábrica proposta

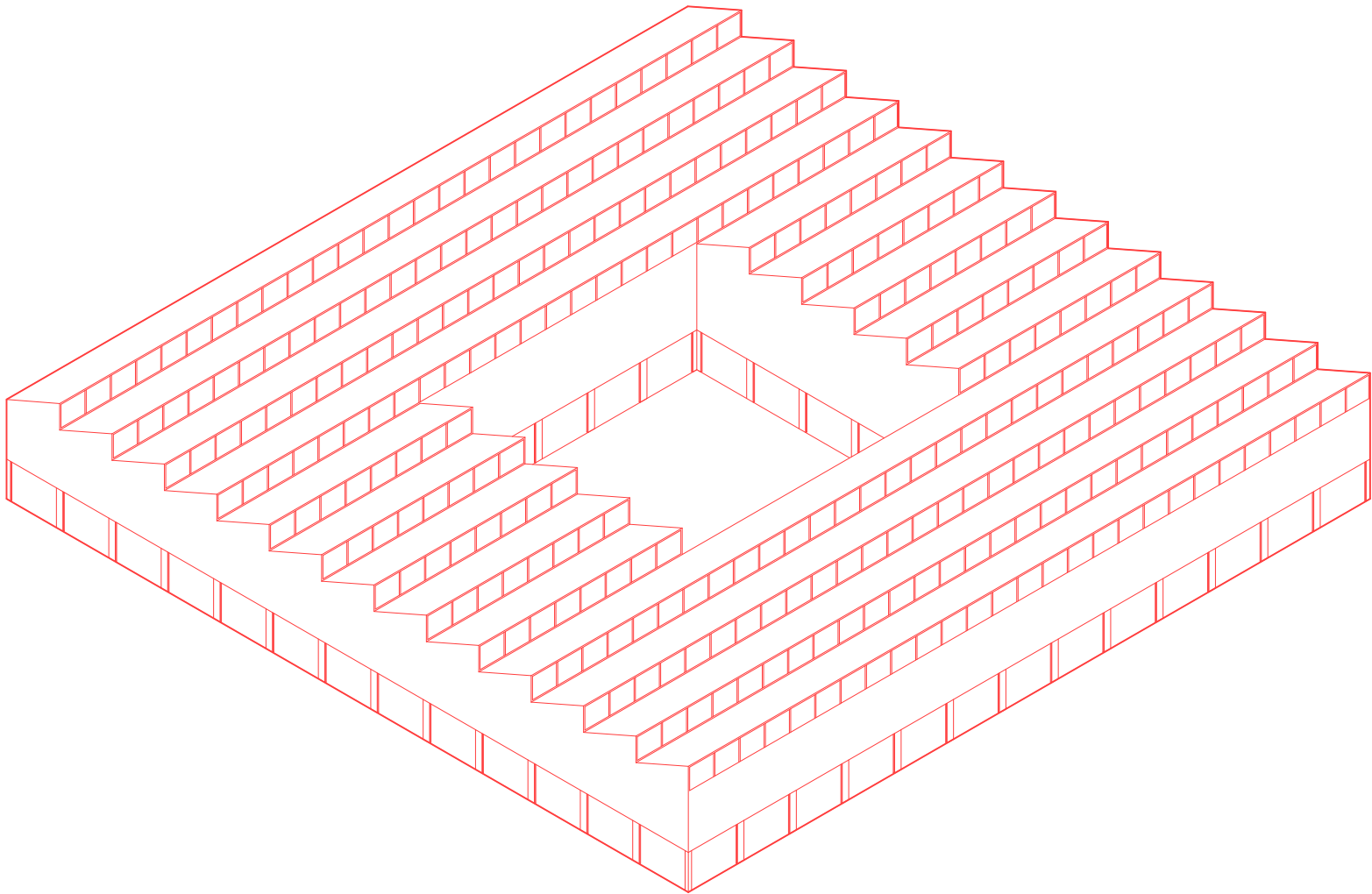


Figura 57 — Fábrica proposta. (1:500)

Hospitais Rede Sarah

A industrialização da construção não é apenas uma questão tecnológica, mas sobretudo uma reorganização radical dos processos produtivos — do projeto ao estaleiro — visando a máxima racionalização, previsibilidade e controle de qualidade. A eficiência produtiva, enquanto pilar fundamental de um sistema construtivo industrializado, implica a articulação entre concepção arquitetônica, fabrico de componentes e montagem em obra. Esta integração exige técnicas que não apenas agilizem a execução, mas também assegurem adaptabilidade aos contextos locais, sejam eles climáticos, económicos ou sociais.

Neste campo, a experiência de João Filgueiras Lima — conhecido como Lelé — constitui uma referência seminal. A sua abordagem à industrialização da arquitetura não foi apenas técnica: foi profundamente territorial, social e ambiental. A estratégia que adotou em diversos projetos, sobretudo nos hospitais da Rede Sarah e na RENURB, assenta numa lógica de descentralização produtiva, com implantação de pequenas unidades fabris nos estaleiros. Estas fábricas operavam com processos padronizados, moldes reutilizáveis e equipas locais treinadas, garantindo simultaneamente escala, adaptabilidade e apropriação.

Um dos exemplos mais elucidativos é a fábrica municipal de pré-fabricados ligeiros implantada no âmbito da RENURB (Companhia de Renovação Urbana de Salvador), onde foi instalada uma fábrica municipal de pré-moldados leves junto ao estaleiro. Em vez de depender de fábricas distantes, Lelé produziu diretamente no local painéis, paragens de autocarro, quiosques, bancos e outros equipamentos urbanos. Esta lógica reduziu drasticamente os custos e prazos logísticos, permitindo produzir centenas de peças com rapidez e uniformidade, acelerando a requalificação urbana num terreno com topografia acidentada, os morros de Salvador.

Para viabilizar a produção em massa sem comprometer a qualidade, Lelé utilizou a coordenação modular e a padronização. Os projetos foram concebidos dentro de malhas modulares precisas, onde painéis, pilares, vigas e módulos estruturais se encaixassem com facilidade e simplicidade nas interfaces de montagem. Ao limitar-se a poucos tipos de componentes, repetidos em grande número, a produção tornou-se mais simples, reduzindo erros e variabilidade de execução. A formação de equipas locais foi igualmente fundamental. Reconhecendo que a industrialização exige técnica e rigor, Lelé promoveu oficinas e formação contínua para pedreiros e carpinteiros da região. Assim, esses profissionais passaram a dominar as técnicas pré-fabricadas e industriais, garantindo a correta montagem dos componentes no local.

O projeto emblemático da Rede Sarah de Hospitais evidencia a eficácia desse método. Foi criado o Centro Tecnológico da Rede Sarah (CTRS), em Salvador, uma fábrica central que produziu componentes estruturais, painéis, coberturas e acabamentos para hospitais construídos em oito capitais brasileiras. Graças a essa produção centralizada e padronizada, os edifícios foram erguidos com precisão milimétrica, qualidade homogênea e executados rapidamente. Outro ponto de destaque foi a qualidade arquitetónica e desempenho ambiental alcançados. Mesmo tratando-se de pré-fabricados padronizados, os hospitais Sarah incorporaram soluções ajustadas ao clima tropical. Lelé desenhou estruturas e fachadas que privilegiam a ventilação natural cruzada e o conforto térmico em clima quente, evitando a dependência de ar-condicionado, algo extraordinário para edifícios hospitalares. Essa preocupação bioclimática foi possível porque o próprio sistema construtivo industrializado foi pensado com esse objetivo, com coberturas modulares dotadas de lanternins e ventilação. Assim, podemos verificar que a industrialização do sistema construtivo pode não impedir a adaptação ao contexto local; pelo contrário, a padronização inteligente de Lelé contemplava variáveis climáticas e funcionais.

Organização dos setores da fábrica CTRS

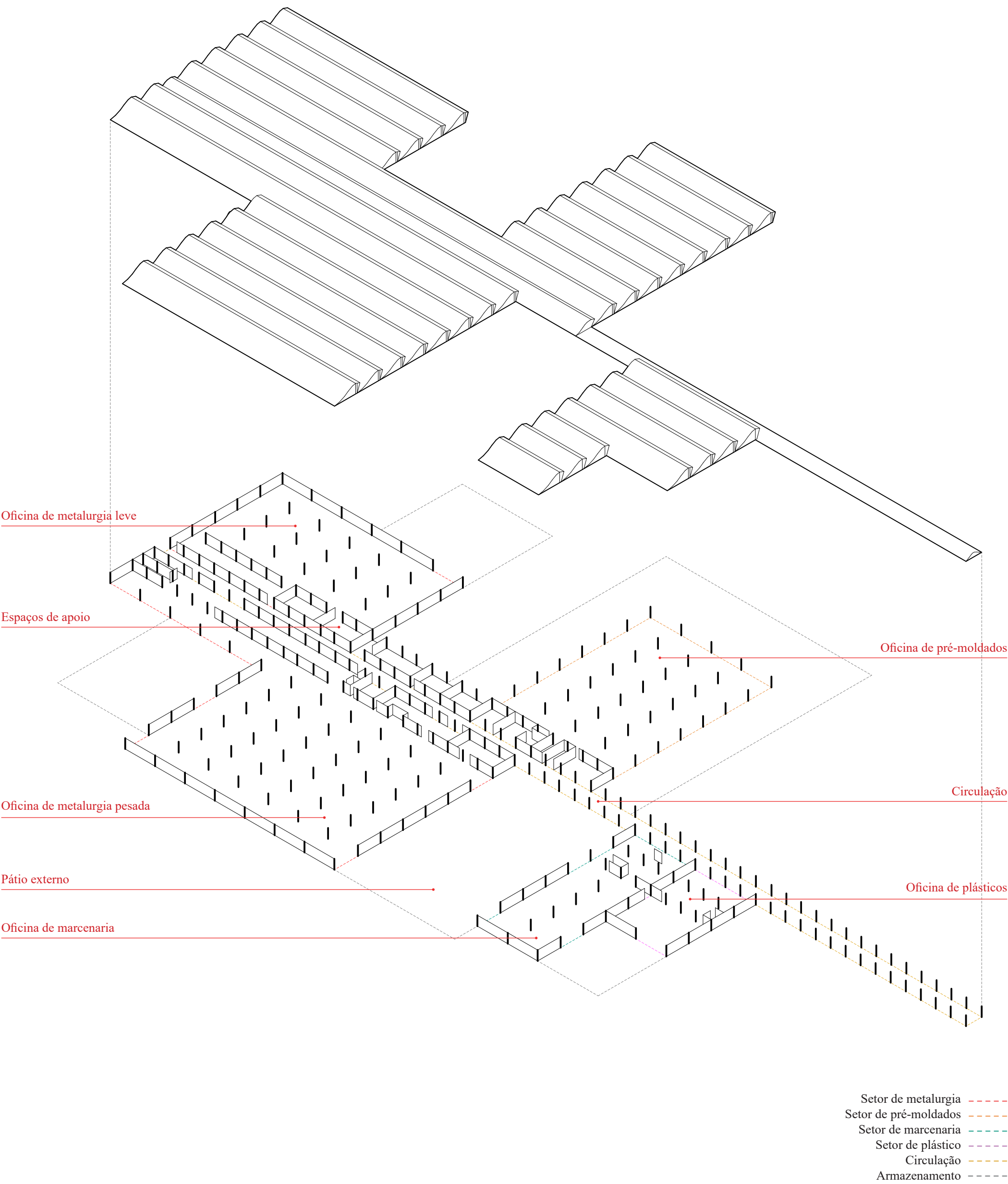


Figura 58 — Organização da fábrica CTRS. (1:1000)



HOSPITAL SARAH RIO

1994

Autor	João Filgueiras Lima
Construtora	CTRS
Programa	Programa recreativo
Sistema	—

Área	52 000 m²
Custo de Obra	—
Tempo de Montagem	6 meses
Numero de Exemplares	1



Figuras 59-63 — Hospital Sarah Rio. Rio de Janeiro, Brasil, 1994.

Produção Proposta

Inspirado por essas metodologias, o sistema proposto nesta tese potencializa a ideia da construção como uma cadeia industrial moderna, baseada na eficiência produtiva, controlo de qualidade e economia de escala. A otimização da produção e montagem é alcançada através da padronização inteligente, modularidade repetível, impressão 3D e montagem simples com mão de obra minimamente especializada.

Propõe-se um sistema de painéis bidimensionais padronizados que representam unidades básicas repetíveis — mas que permitem personalização — e conectores universais digitalmente fabricados, possibilitando escalar ou adaptar o sistema sem alterar a fábrica.

A eficiência surge na lógica de encaixe universal e montagem simplificada. Cada painel contém entalhes laterais pré definidos, onde os conectores impressos em 3D de alumínio são previamente instalados na fábrica. O painel chega ao estaleiro já pronto para encaixe e fixação com aperto cruzado, garantindo rigidez estrutural e eliminando margens de erro humano, mesmo com mão de obra pouco especializada.

A impressão 3D dos conectores permite a produção de peças geometricamente complexas, com precisão milimétrica e sem desperdício. Com a digitalização do conector, os ficheiros podem ser enviados para impressão em qualquer parte do mundo, eliminando a necessidade de transporte internacional e promovendo descentralização produtiva — a mesma lógica territorial de Lelé, atualizada à era digital.

A padronização também se estende ao transporte. Os painéis bidimensionais, empilháveis, otimizam a ocupação dos camiões, reduzindo o número de viagens e a pegada carbónica. Ao transferir para ambientes fabris tarefas que exigem precisão, este sistema reduz desperdício, melhora o controlo de qualidade e acelera prazos de execução — aproximando-se da racionalidade da indústria automóvel, mas mantendo a versatilidade da arquitetura.

Este sistema recupera, radicaliza e atualiza os princípios de Lelé. Estabelece uma plataforma técnica aberta, escalável e ajustável — apta a responder de forma eficiente e sustentável às exigências técnicas, logísticas, ambientais e sociais da construção do século XXI.

Fábrica Proposta

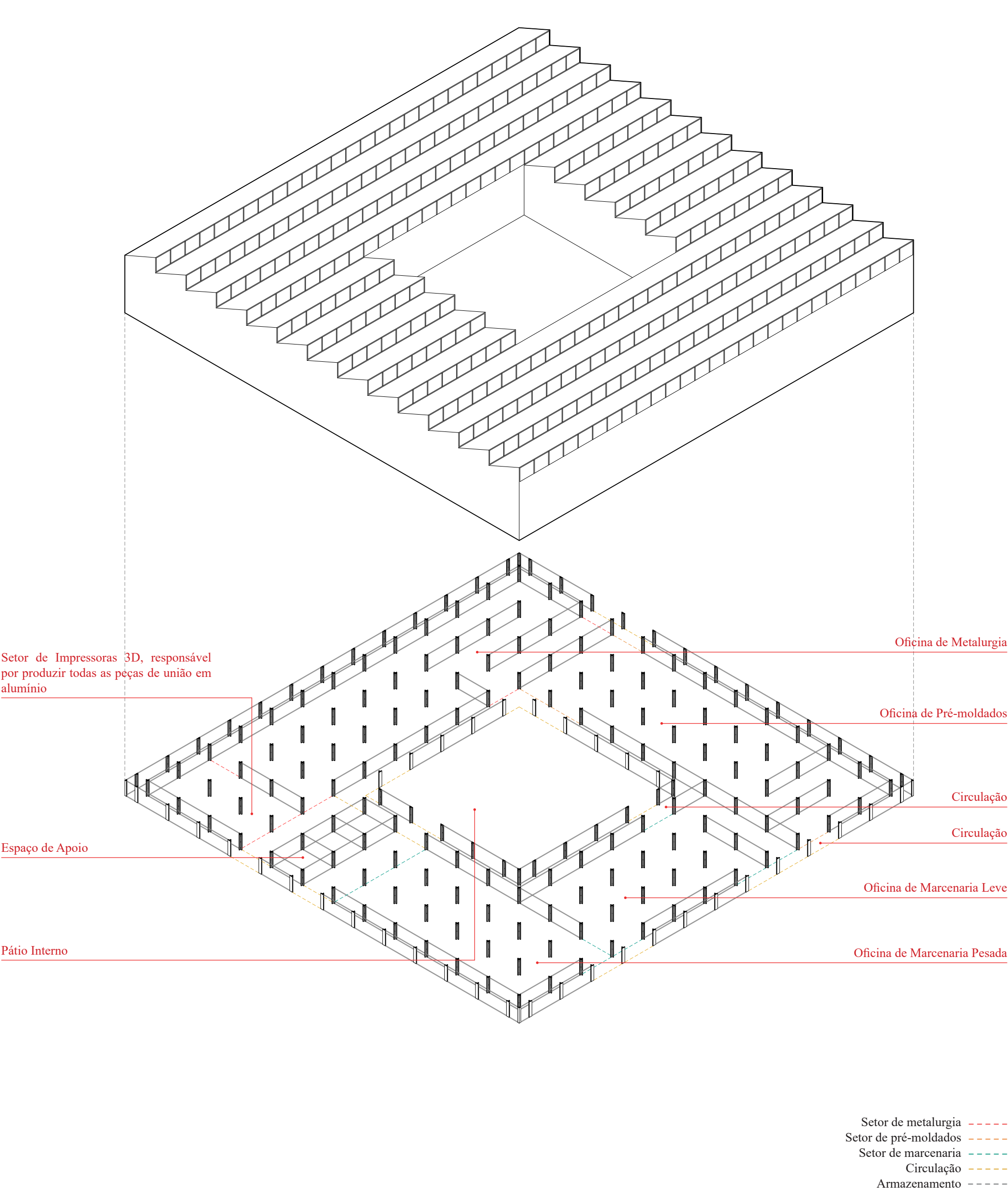
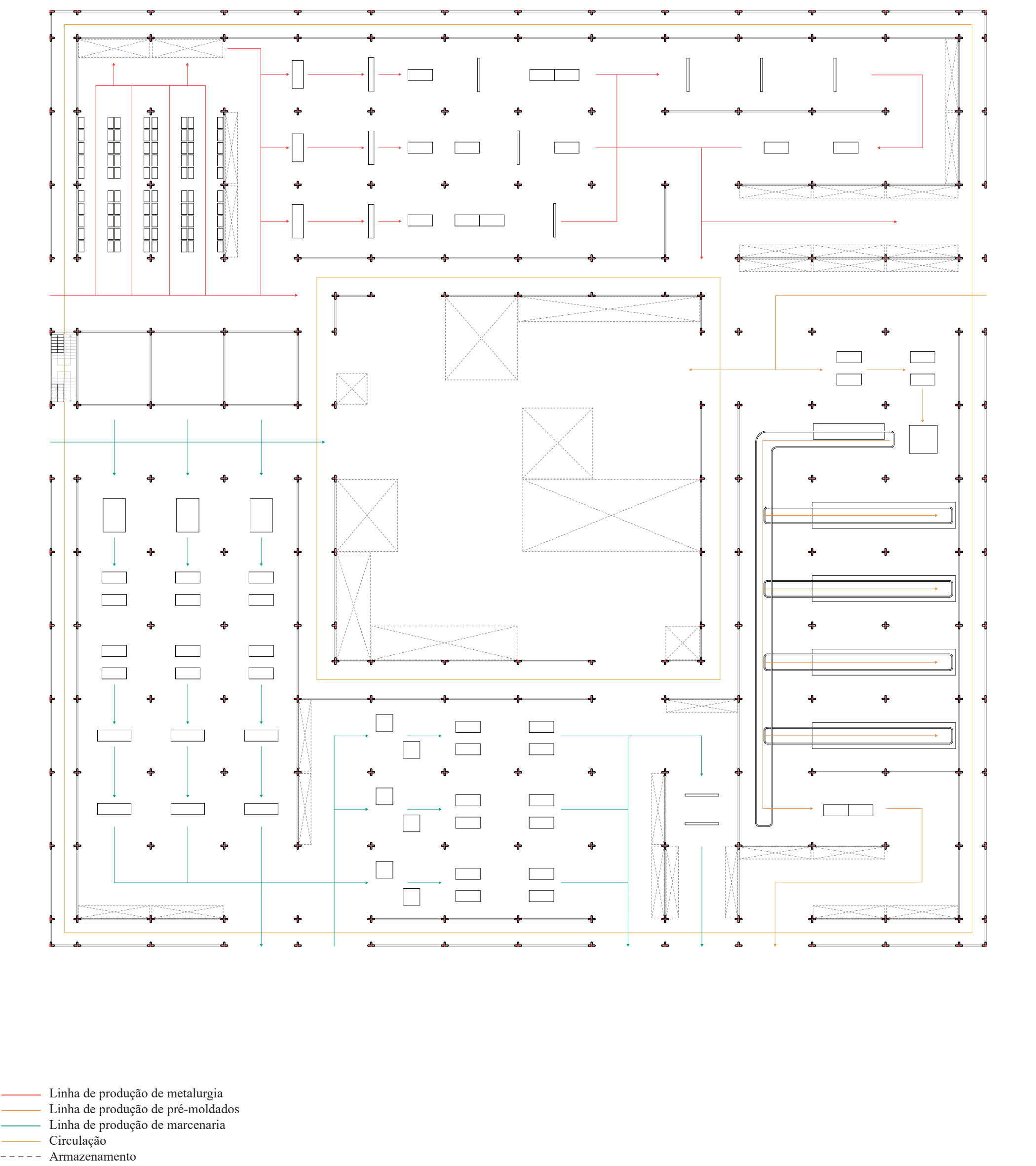
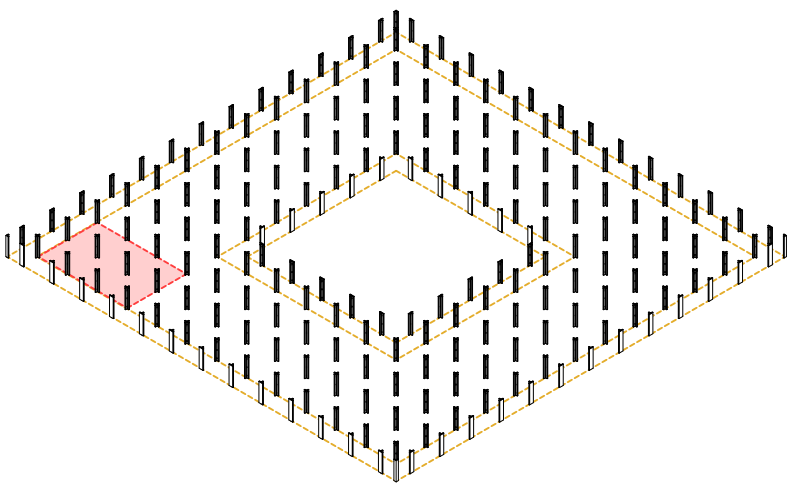


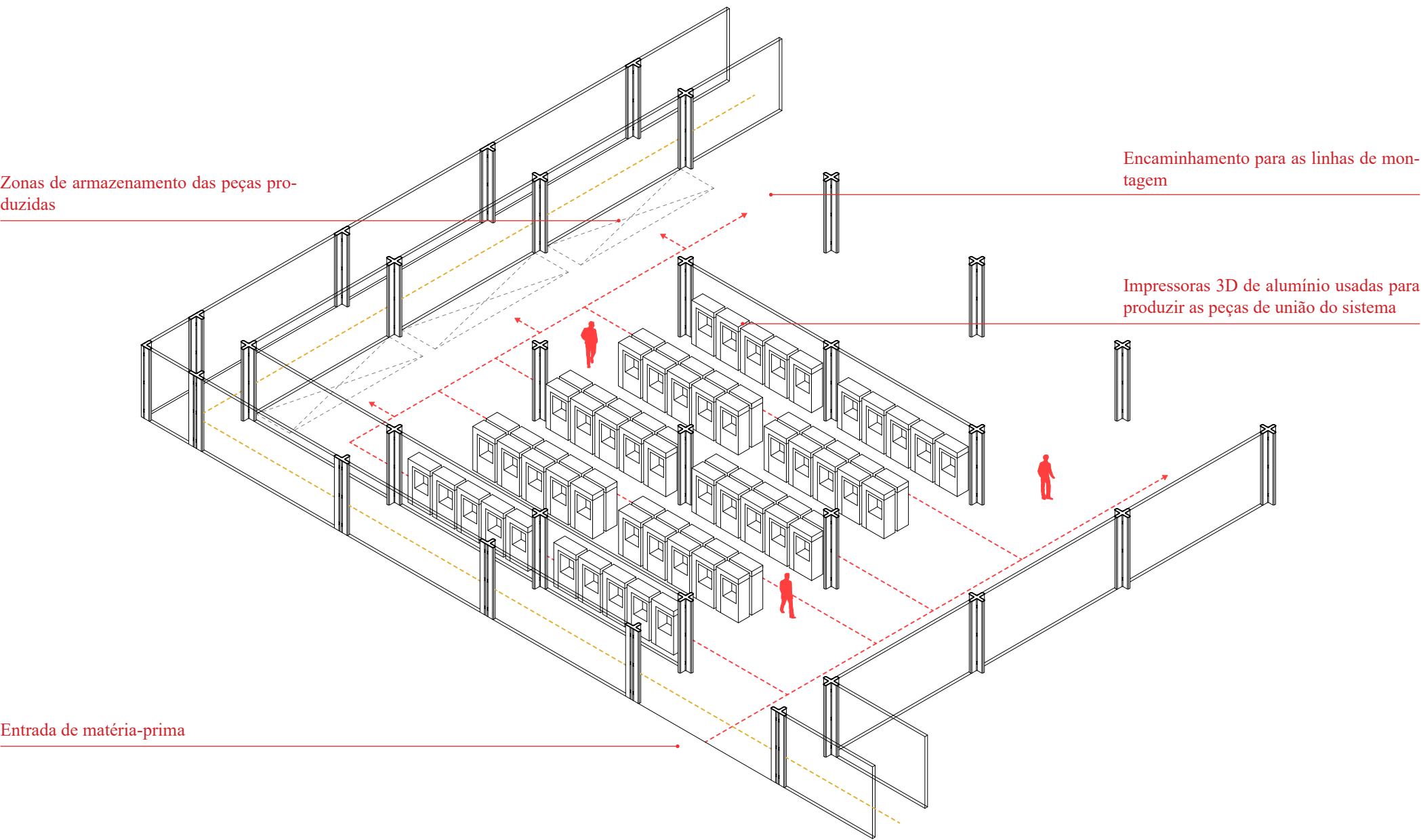
Figura 64 — Organização da fábrica proposta. (1:500)

Planta das linhas de produção



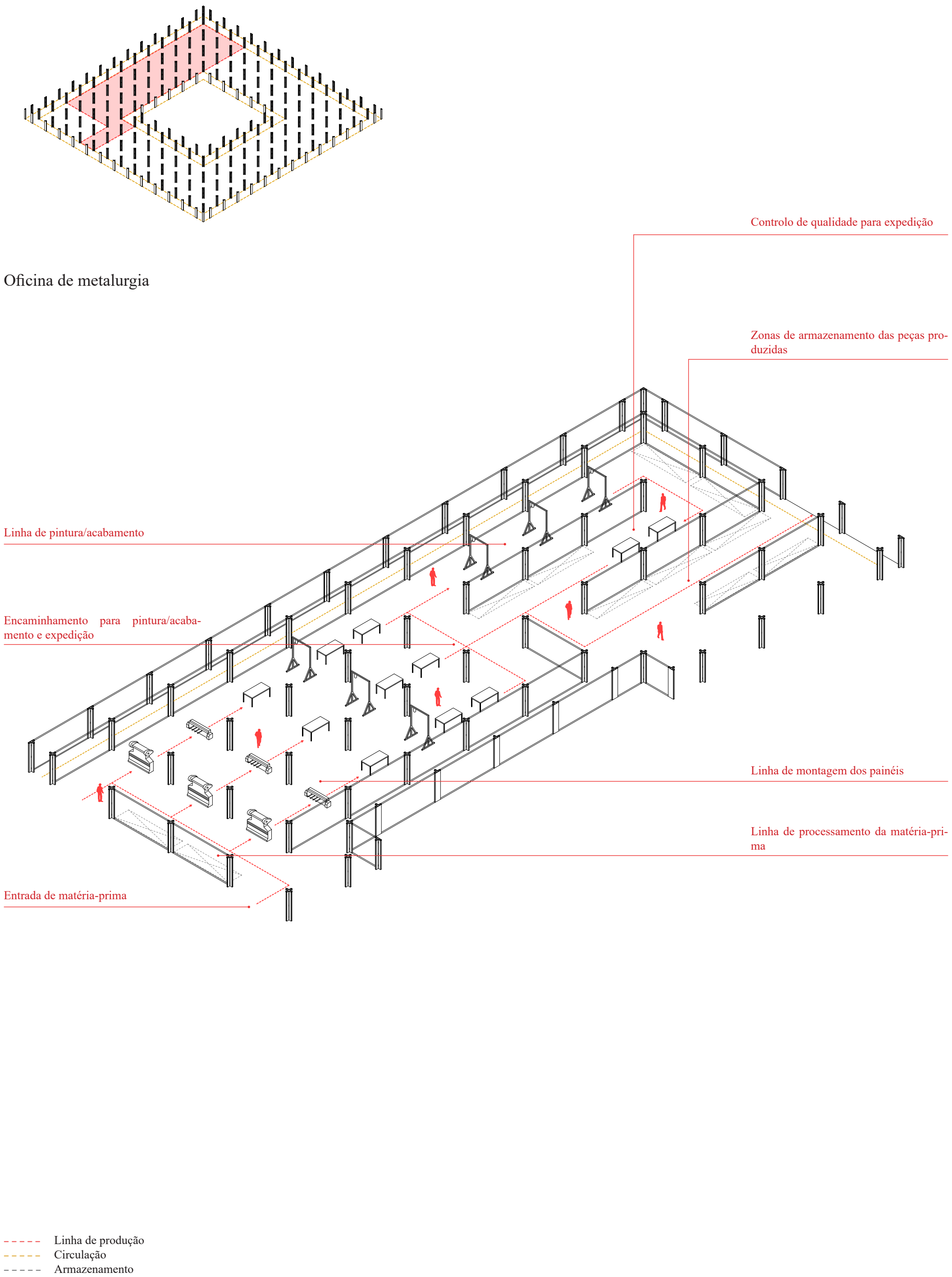


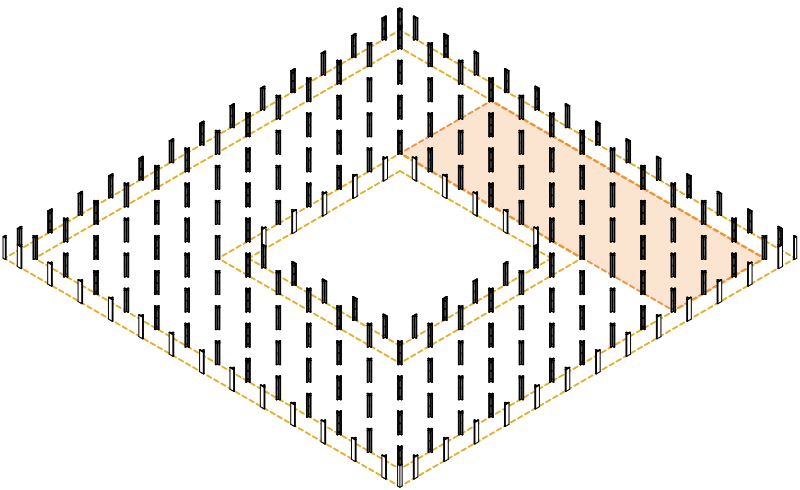
Oficina de impressão 3D



Linha de produção - - - - -
Circulação - - - - -
Armazenamento - - - - -

Figura 66 — Isometria da oficina das impressoras 3D. (1:200)





Oficina de pré-moldados

Montagem das armaduras

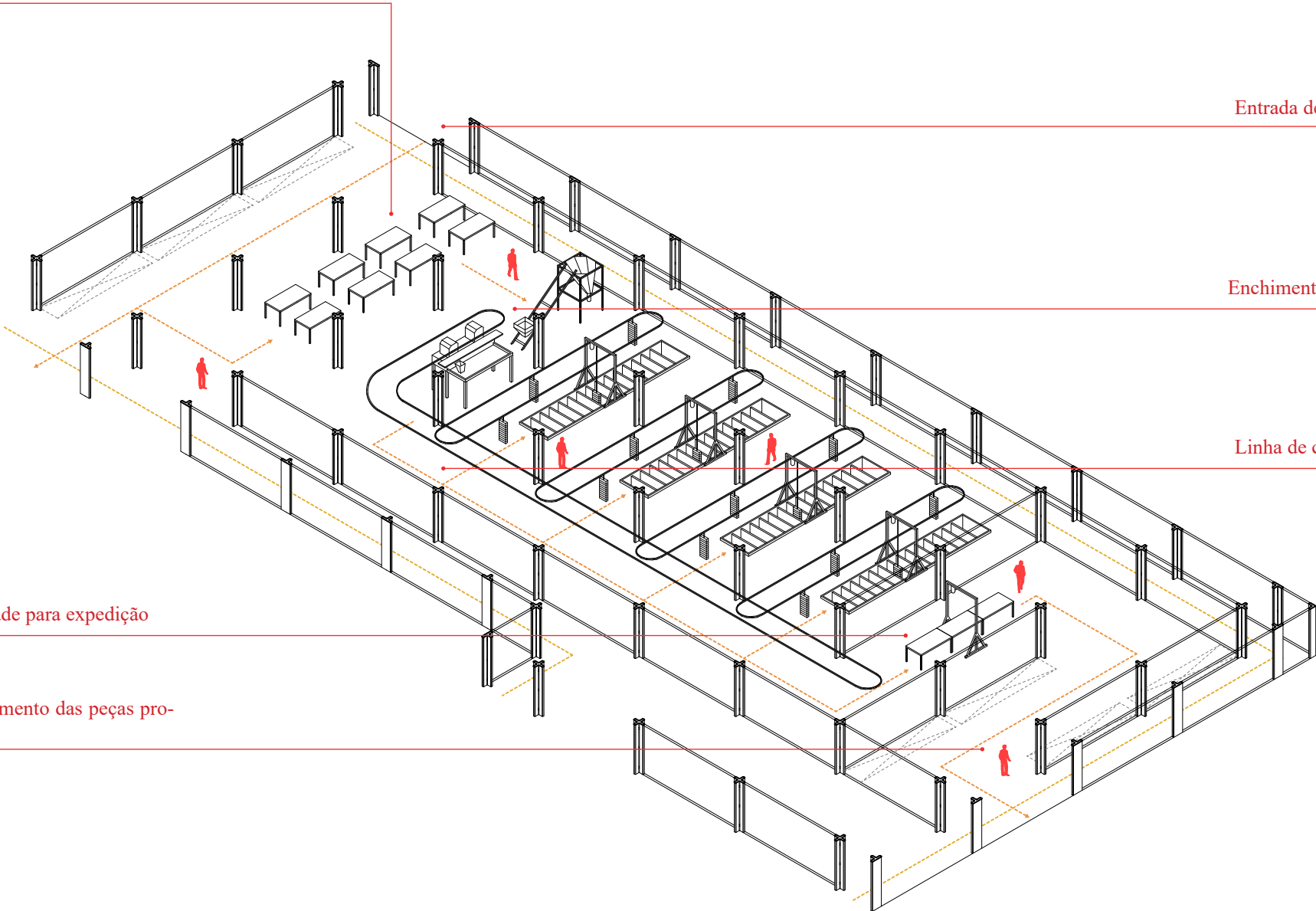
Entrada de matéria-prima

Enchimento das cofragens

Linha de cura dos painéis

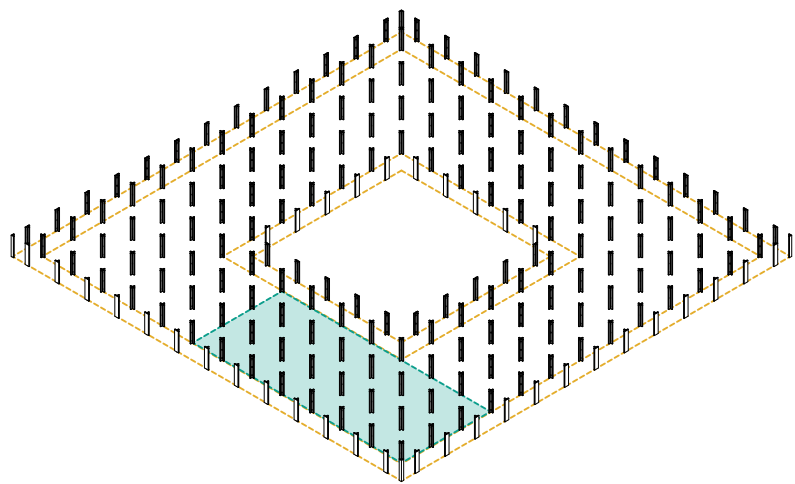
Controlo de qualidade para expedição

Zonas de armazenamento das peças produzidas

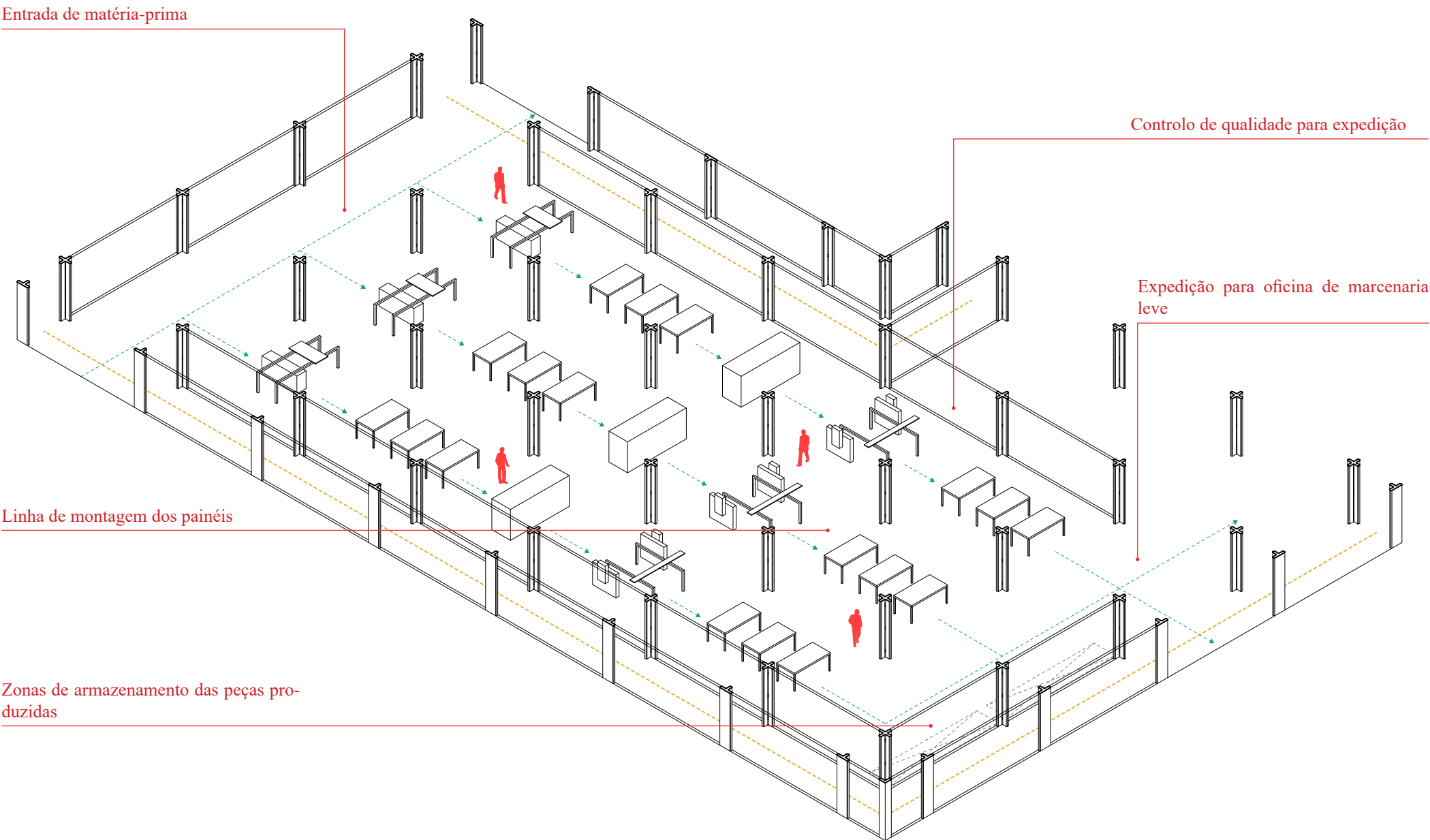


- Linha de produção - - - - -
- Circulação - - - - -
- Armazenamento - - - - -

Figura 68 — Isometria da oficina dos pré-moldados. (1:300)

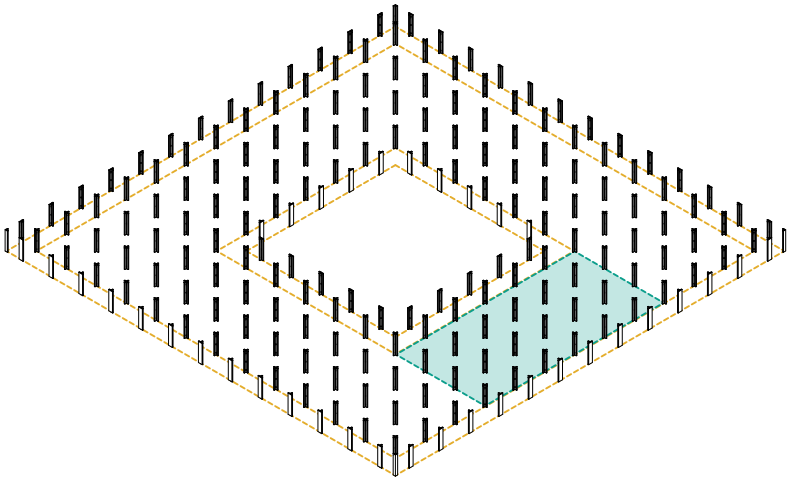


Oficina de marcenaria pesada

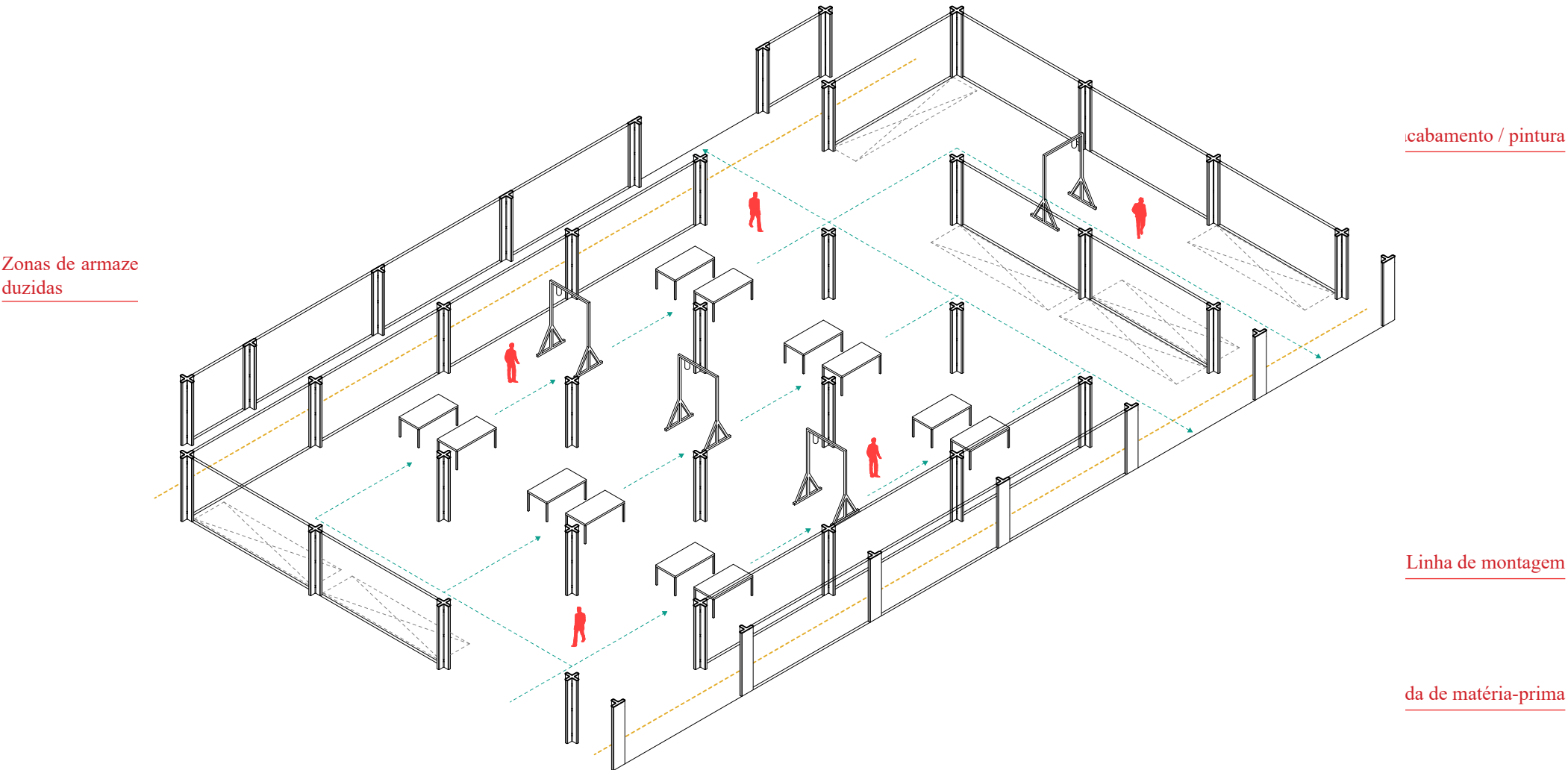


- Linha de produção
- Circulação
- Armazenamento

Figura 69 — Isometria da oficina das marcenarias pesadas. (1:300)



Oficina de marcenaria leve

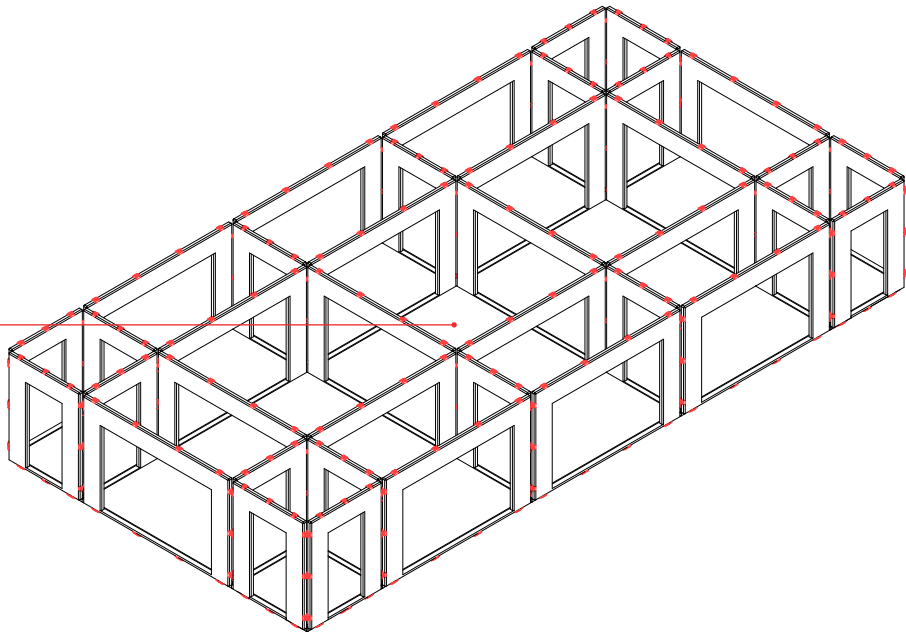


Linha de produção - - - - -
Circulação - - - - -
Armazenamento - - - - -

Figura 70 — Isometria da oficina das marcenarias leves. (1:300)

Módulo de tipologia base

Tipologia base do sistema proposto, decomposta em peças abaixo



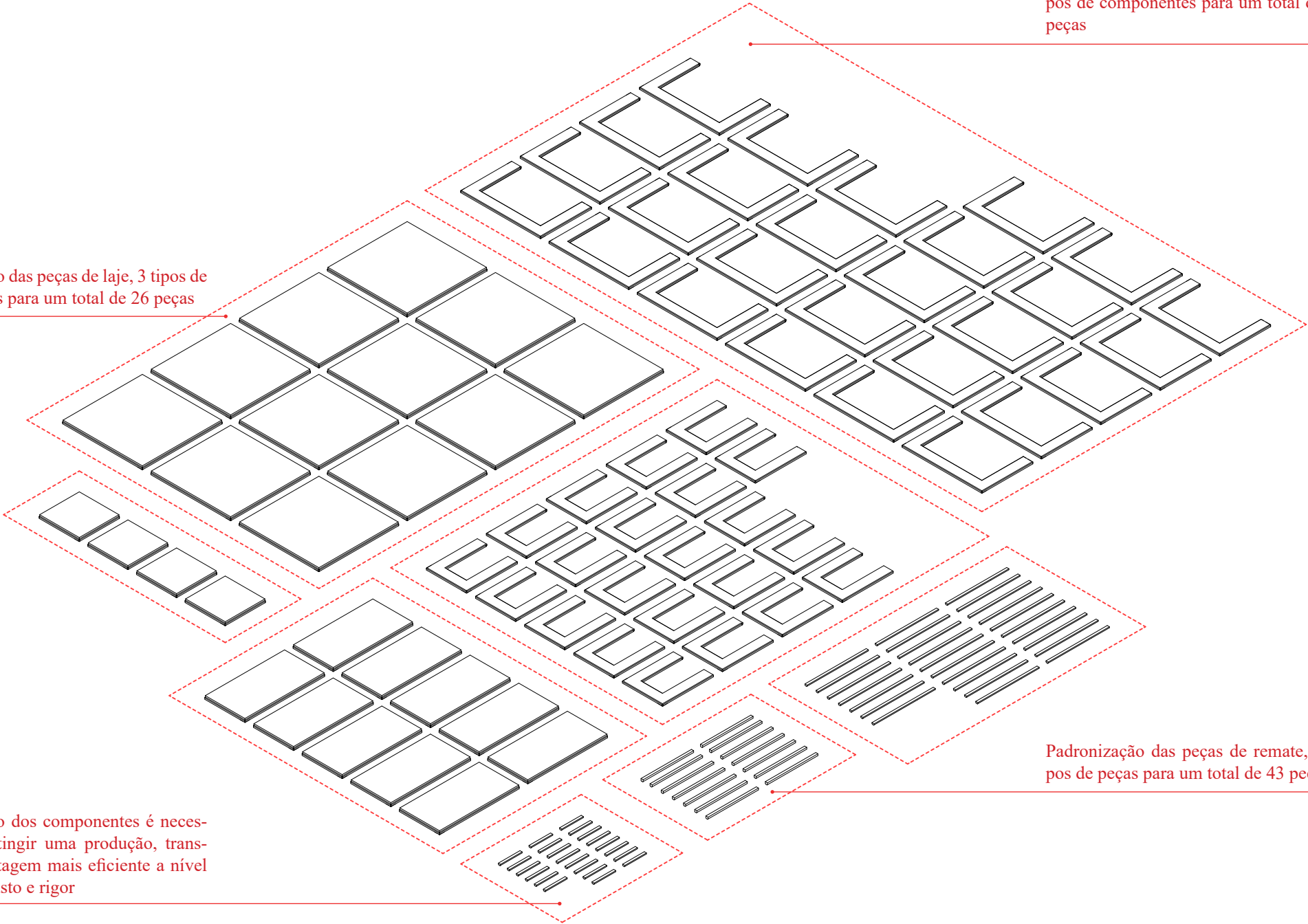
Padronização de componentes

Padronização das peças de laje, 3 tipos de componentes para um total de 26 peças

Padronização das peças de pórtico, 2 tipos de componentes para um total de 49 peças

Padronização dos componentes é necessária para atingir uma produção, transporte e montagem mais eficiente a nível de tempo, custo e rigor

Padronização das peças de remate, 3 tipos de peças para um total de 43 peças



Transporte bi-dimensional

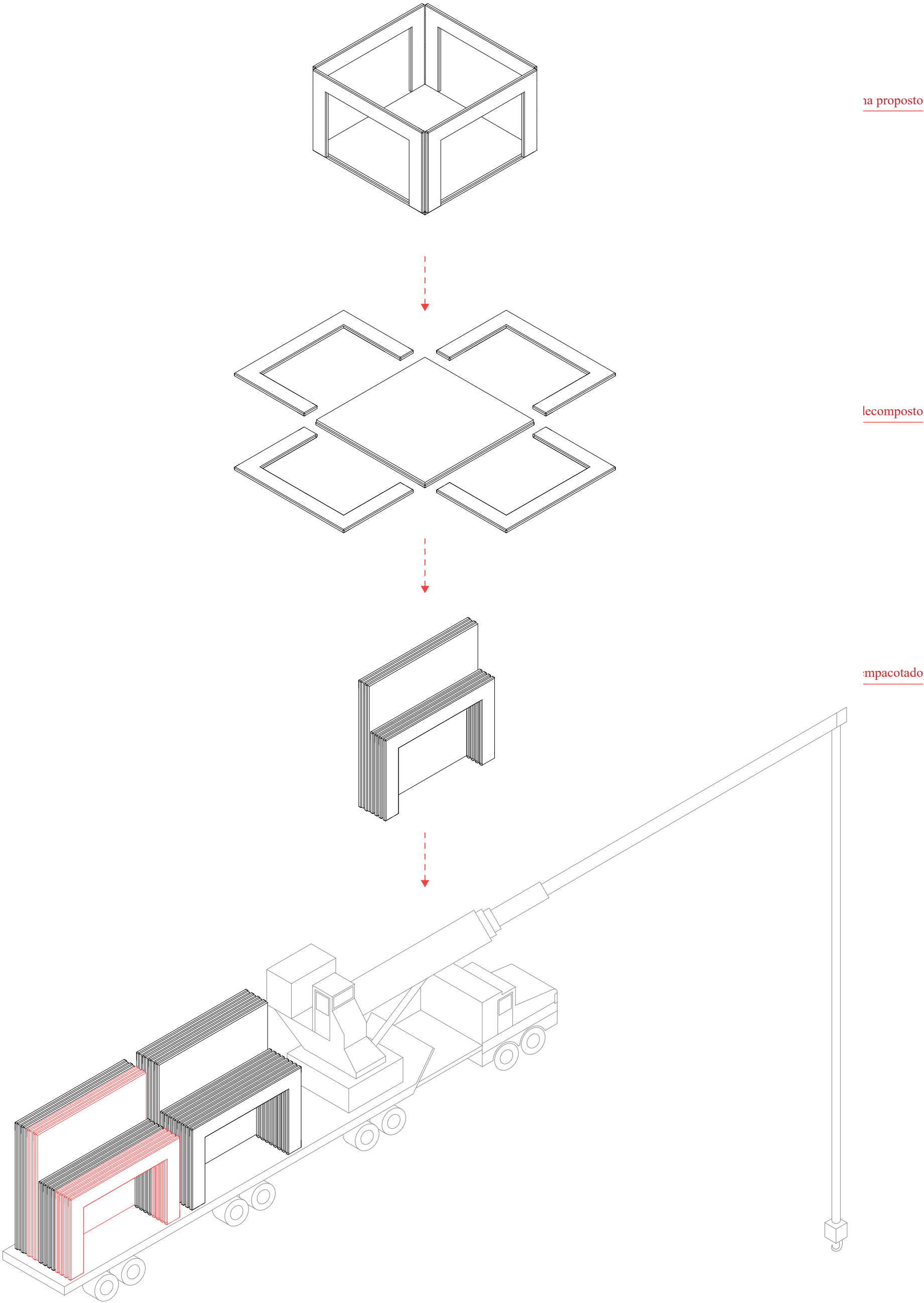
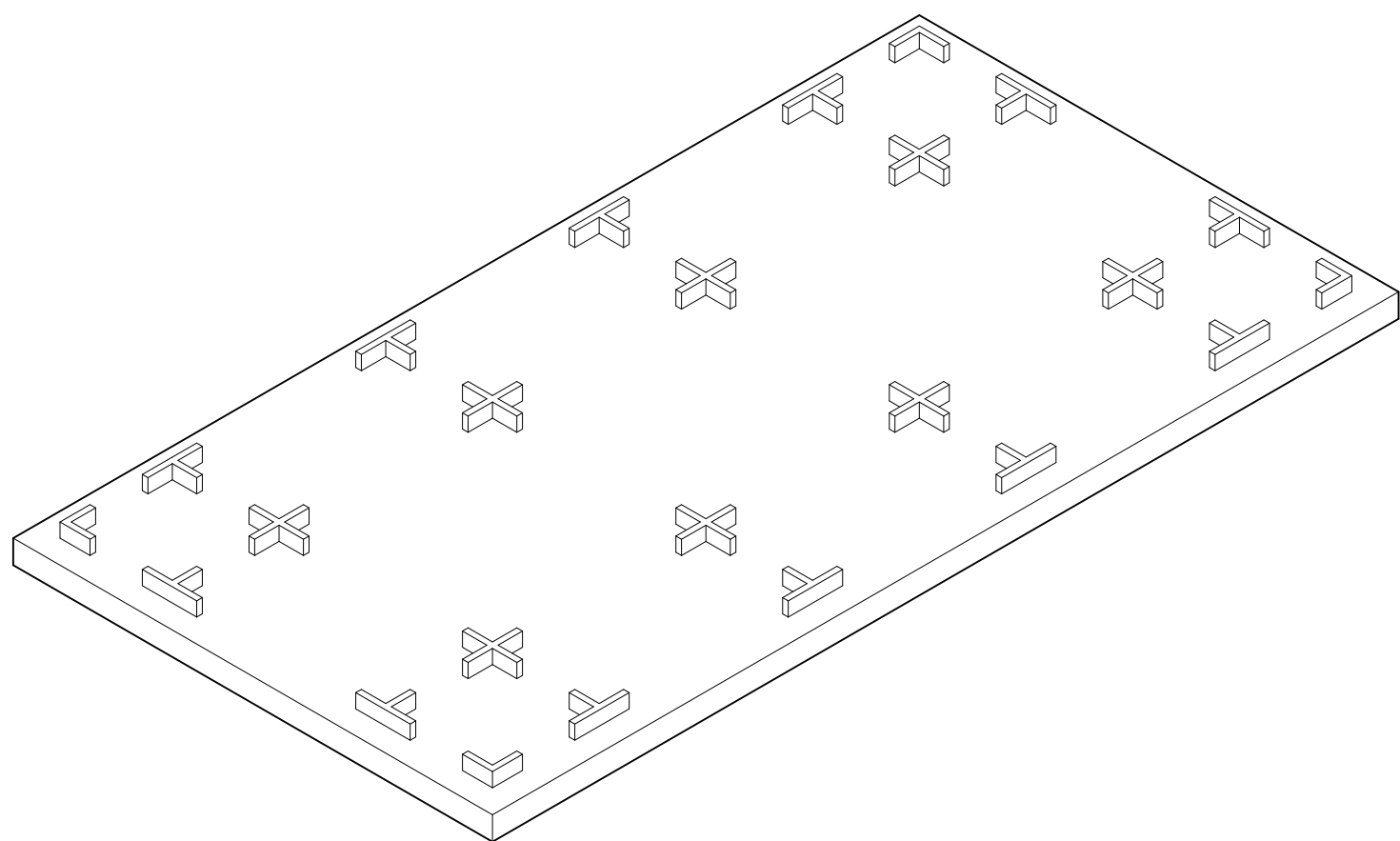
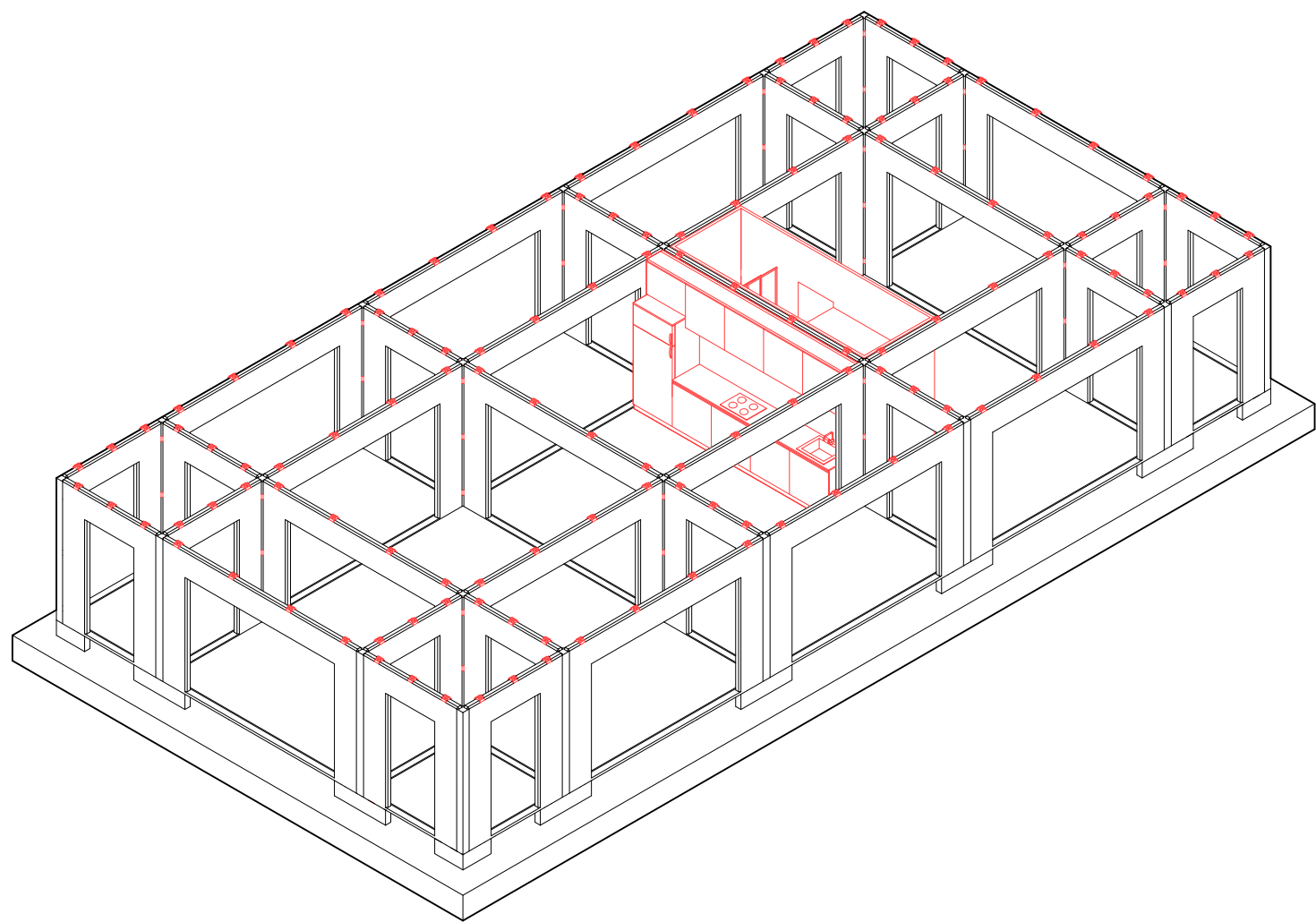


Figura 72 — Transporte de componentes. (1:300)

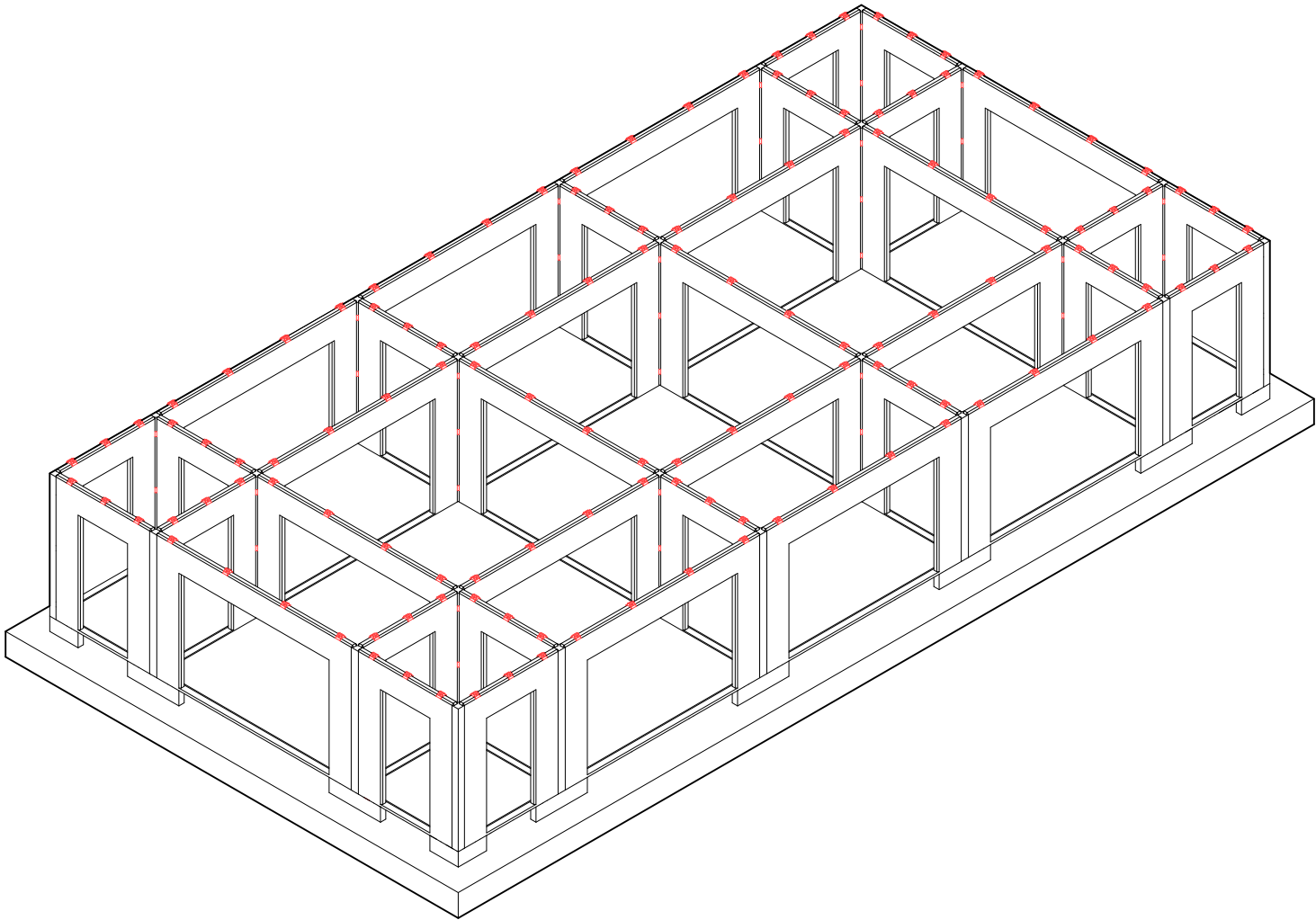
1 Embasamento convencional



3 Montagem dos módulos pré-fabricados



2 Montagem dos painéis



4 Cobertura convencional

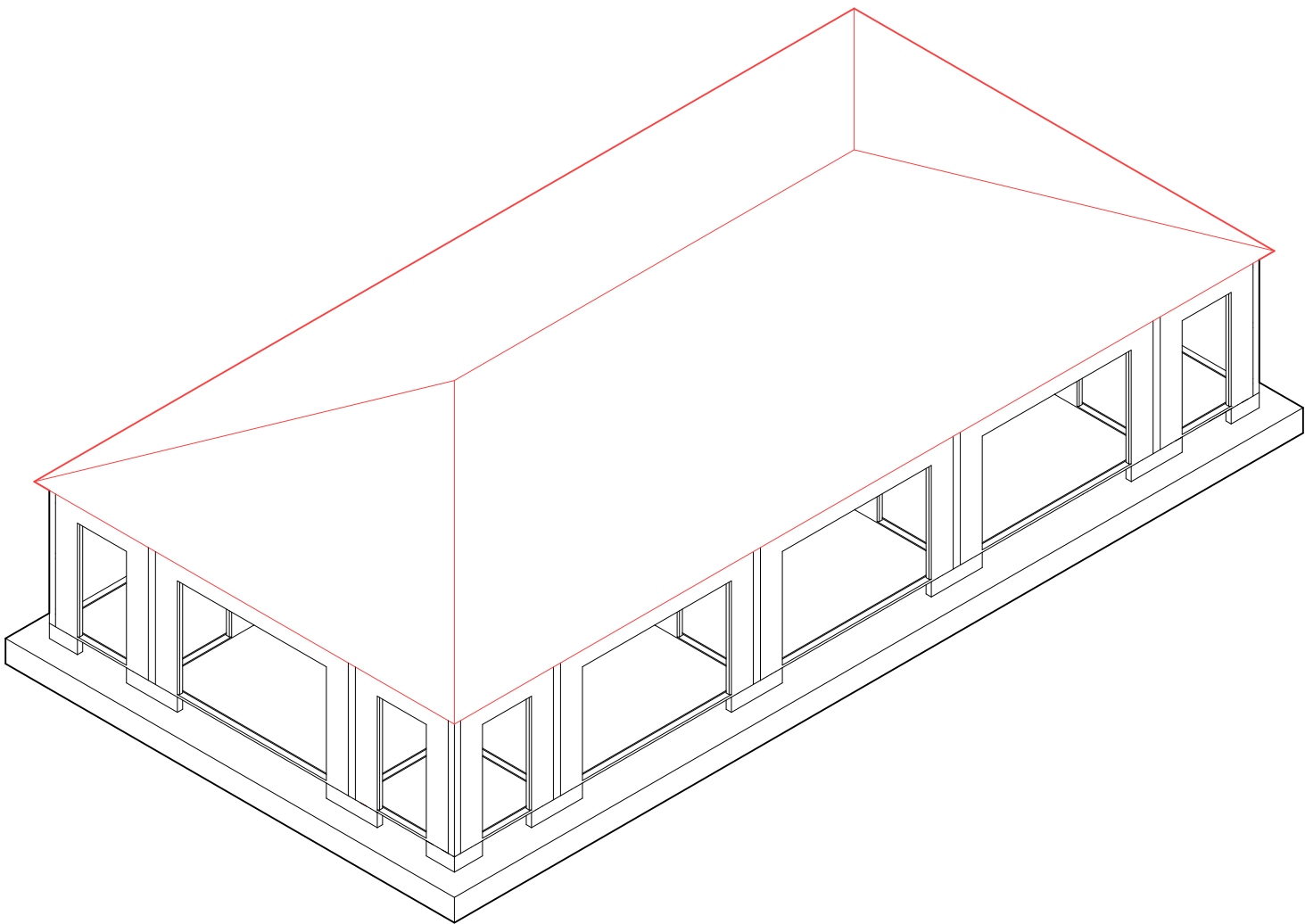
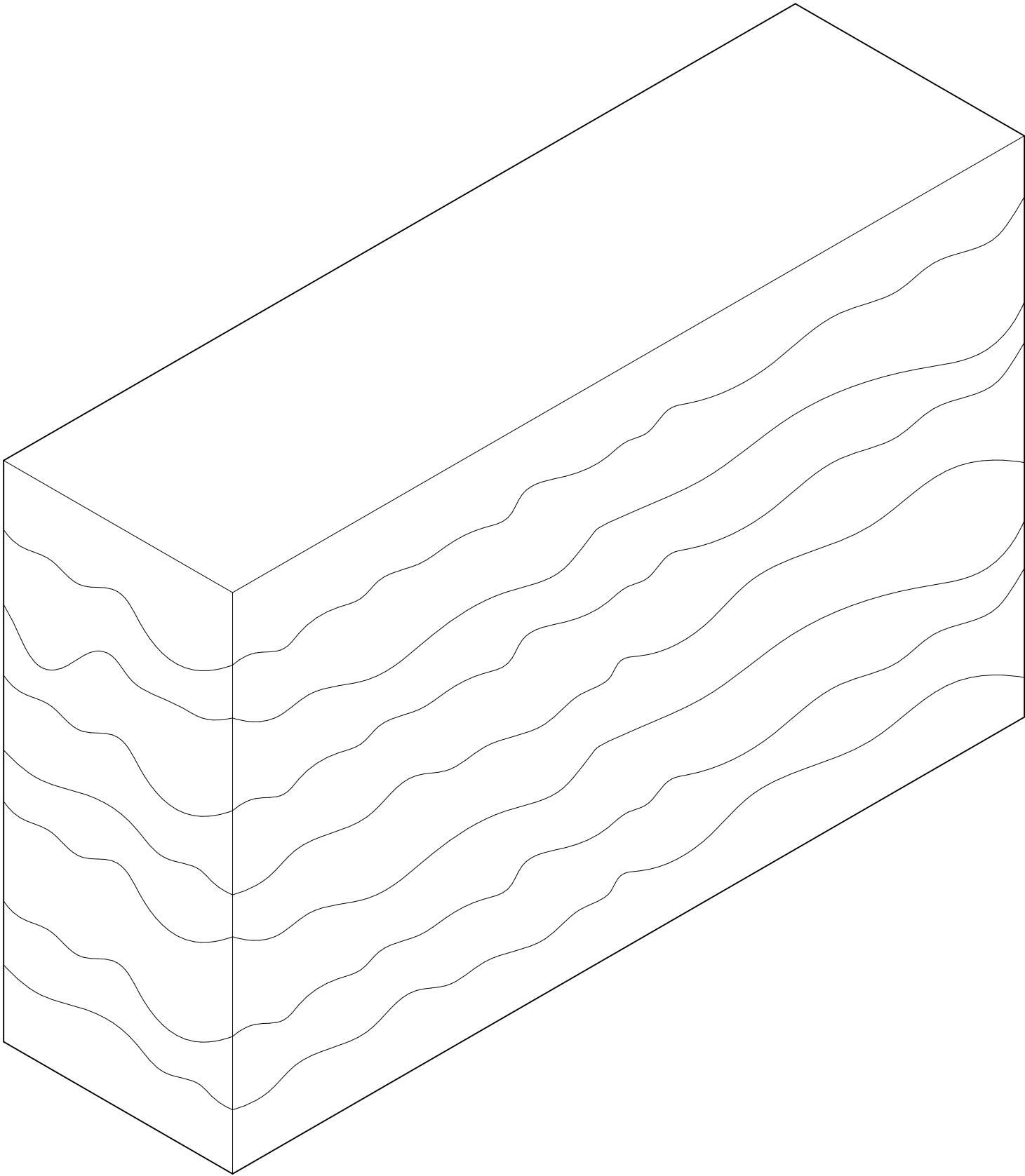


Figura 73 — Método de montagem proposto. (1:150)

V

CIRCULARIDADE

Painel de terra reciclável



Painel reutilizável proposto

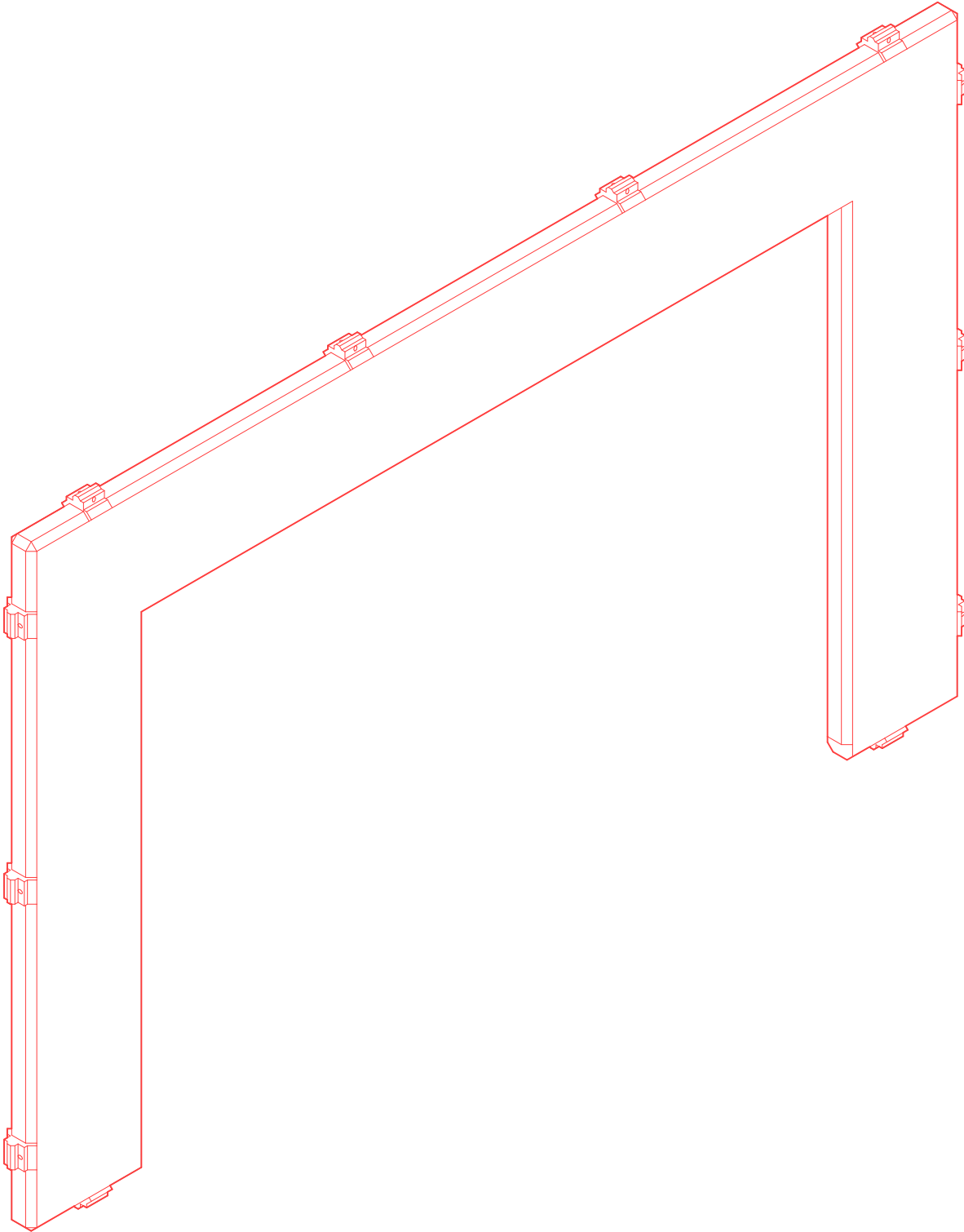


Figura 75 — Painel reutilizável proposto. (1:25)

Rammed Earth

A industrialização enfrenta o desafio de reinventar os processos construtivos diante da urgência da sustentabilidade ambiental. Se no seu surgimento estes sistemas visavam sobretudo aumentar a eficiência e a padronização da construção, hoje impõe-se uma reconfiguração profunda, capaz de integrar preocupações ambientais, sociais e tecnológicas. A transformação das práticas construtivas face às alterações climáticas, à escassez de recursos e à obsolescência programada exige uma industrialização de segunda geração — uma industrialização não apenas produtiva, mas também regenerativa.

Neste novo enquadramento, a capacidade de um sistema evoluir ao longo do tempo, incorporando inovações em materiais e técnicas, torna-se fundamental para a sua permanência e relevância. Sistemas abertos, que permitem adaptações sucessivas, tenderão a ter uma longevidade funcional superior. Já os sistemas fechados, dependentes de materiais únicos ou de tecnologias proprietárias, correm o risco de se tornarem rapidamente obsoletos. A circularidade, entendida como uma lógica operativa que abrange desde o fabrico até à desmontagem e reaproveitamento, torna-se, assim, um princípio estruturante para qualquer sistema construtivo com ambições duradouras.

Os materiais de construção convencionais como o aço e o betão, embora eficazes do ponto de vista estrutural, possuem uma pegada de carbono elevada e requerem processos de fabrico intensivos em energia. O cimento, por exemplo, é responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂. Este dado ilustra bem a urgência de transitar para soluções que articulem desempenho técnico com responsabilidade ambiental. Daí o crescente interesse por materiais naturais, renováveis ou reciclados, bem como por técnicas construtivas de baixo impacto ambiental.

Um caso exemplar desta transição é o trabalho de Martin Rauch, pioneiro na modernização da taipa enquanto sistema industrializado. A terra, material ancestral amplamente disponível e de baixíssimo impacto ambiental, é aqui ressignificada como componente pré-fabricado de alta precisão. Rauch desenvolveu uma forma de adaptar a lógica fabril à produção de painéis de terra compactada, moldados em fábrica para posterior montagem em obra. Esta inovação exigiu a criação de uma fábrica especializada, permitindo garantir a qualidade dos elementos e a repetibilidade do sistema. Os benefícios são inequívocos: a terra possui uma pegada ecológica extremamente baixa, é extraída localmente, moldada sem aditivos químicos nem processos térmicos — anulando o consumo energético e as emissões de gases com efeito de estufa associadas ao fabrico de materiais convencionais. Após a sua vida útil, o material pode ser devolvido ao solo sem gerar resíduos. Além disso, as estruturas em terra oferecem elevada inércia térmica e capacidade higroscópica, promovendo o conforto interior sem necessidade de sistemas mecânicos.

Um exemplo notável desta prática é o edifício *Ricola Kräuterzentrum*, do atelier Herzog & de Meuron, concluído em 2013, que emprega painéis de terra compactada numa lógica de elevada precisão e desempenho ambiental. Este projeto demonstra que é possível unir sustentabilidade e tectónica, tradição e inovação, no seio de um sistema industrial.

Circularidade de *Rammed Earth*

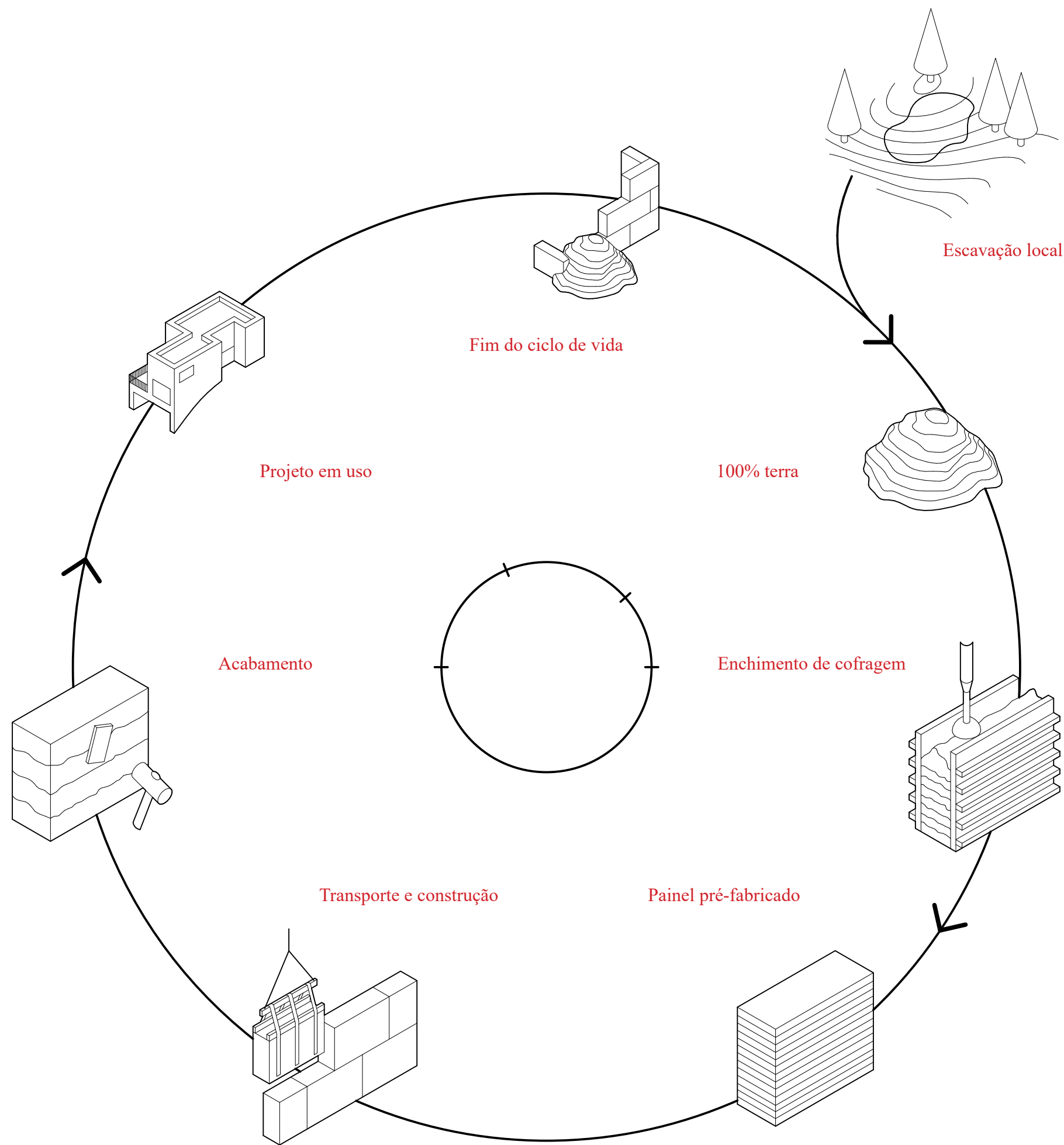


Figura 76 — Circularidade de *Rammed Earth*.



RICOLA HERB CENTER
2010 - 2014

Autor	Herzog & de Meuron
Construtora	<i>Lehm Ton Erde Baukunst GmbH</i>
Programa	Programa recreativo
Sistema	<i>Rammed Earth</i>

Área	3 300 m²
Custo de Obra	—
Tempo de Montagem	16 meses
Numero de Exemplares	1



Figuras 77-81 — *Ricola Herb Center*. Laufen, Suíça, 2010-2014.

Circularidade Proposta

Além da terra compactada, outras inovações materiais e tecnológicas têm ampliado o espectro de possibilidades para sistemas construtivos circulares. A madeira engenheirada, como o CLT (*Cross-Laminated Timber*), é um desses materiais. Por ser de origem renovável e armazenar carbono durante o seu crescimento, o CLT apresenta uma pegada de carbono negativa — tornando-se particularmente vantajoso em edifícios de grande escala. Outro exemplo é o hempcrete, composto de fibras de cânhamo e cal hidráulica, com excelentes propriedades térmicas, leveza e capacidade de absorver CO₂ durante o seu ciclo de vida. Estes materiais, para além de ecológicos, oferecem elevada versatilidade formal e construtiva.

Por outro lado, as tecnologias digitais, como a impressão 3D, representam uma oportunidade decisiva para reconfigurar o modo como os elementos construtivos são desenhados, produzidos e montados. A impressão 3D permite produzir peças com geometrias complexas e grande precisão, utilizando apenas a quantidade exata de material necessário — eliminando o desperdício. Já existem impressoras de grande escala capazes de edificar paredes em betão, terra ou argila, com tempos de execução significativamente reduzidos. Esta produção digital permite ainda a descentralização da indústria: ficheiros de impressão que podem ser enviados eletronicamente e executados localmente, ajustando o sistema às especificidades materiais e logísticas de cada território.

A sustentabilidade na industrialização envolve não só a escolha de materiais ecológicos como também a durabilidade, desmontabilidade, reaproveitamento e capacidade de evolução do sistema ao longo do tempo. O sistema proposto nesta tese incorpora estes princípios na sua génese estrutural e produtiva, oferecendo uma solução circular, adaptativa e tecnologicamente aberta.

Ao contrário de sistemas fechados — dependentes de um número limitado de materiais, técnicas e configurações — a presente proposta sustenta-se numa lógica modular e híbrida, capaz de integrar diferentes materiais estruturais ou de enchimento. Esta abertura confere-lhe uma resiliência particular, permitindo-lhe responder à escassez de recursos, às exigências regulatórias, à transição energética e às variações climáticas, promovendo, em simultâneo, a produção de arquiteturas mais contextuais, sustentáveis e inovadoras.

A produção dos conectores por impressão 3D é, neste quadro, uma estratégia determinante. Esta tecnologia não só permite produzir peças com geometrias complexas sem desperdício, como possibilita a sua customização sem implicar alterações no processo produtivo. O uso de alumínio como matéria-prima é, também, uma escolha estratégica: trata-se de um metal com alta resistência mecânica e durabilidade, 100% reciclável sem perda de qualidade. Isto significa que, no final do ciclo de vida do edifício, os conectores podem ser desmontados, fundidos e reintegrados na cadeia produtiva — numa lógica de economia circular.

A desmontabilidade do sistema foi projetada desde a fase de concepção. Cada elemento estrutural pode ser retirado sem dano, reaproveitado noutra configuração ou devolvido ao ciclo produtivo. O uso de conectores externos, que dispensam colagens ou ligações definitivas, permite montar e desmontar a estrutura repetidamente. Esta reversibilidade técnica é essencial para cumprir os princípios da circularidade: prolonga a vida útil dos recursos, reduz os resíduos de demolição e diminui a extração de matéria-prima virgem.

Circularidade do sistema proposto

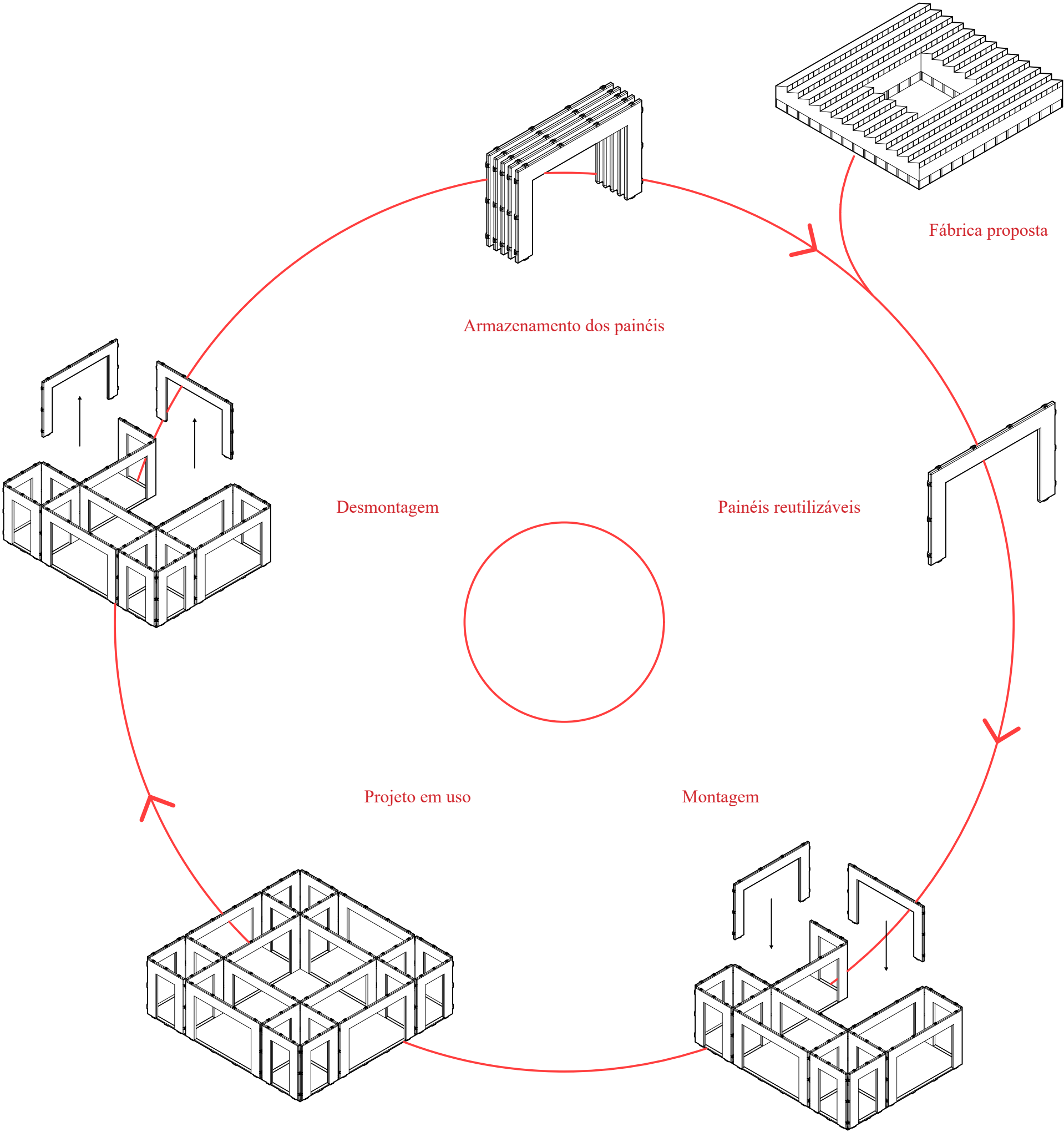
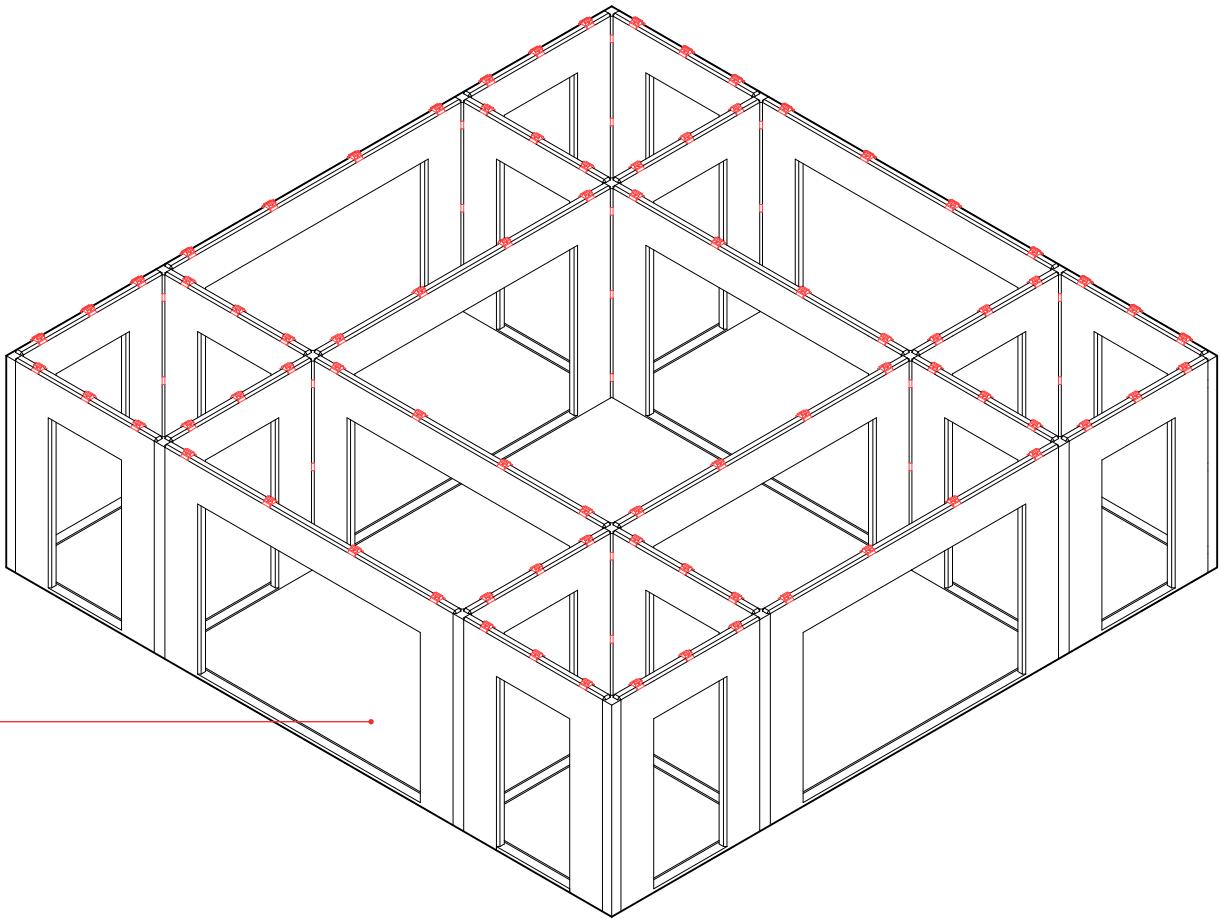


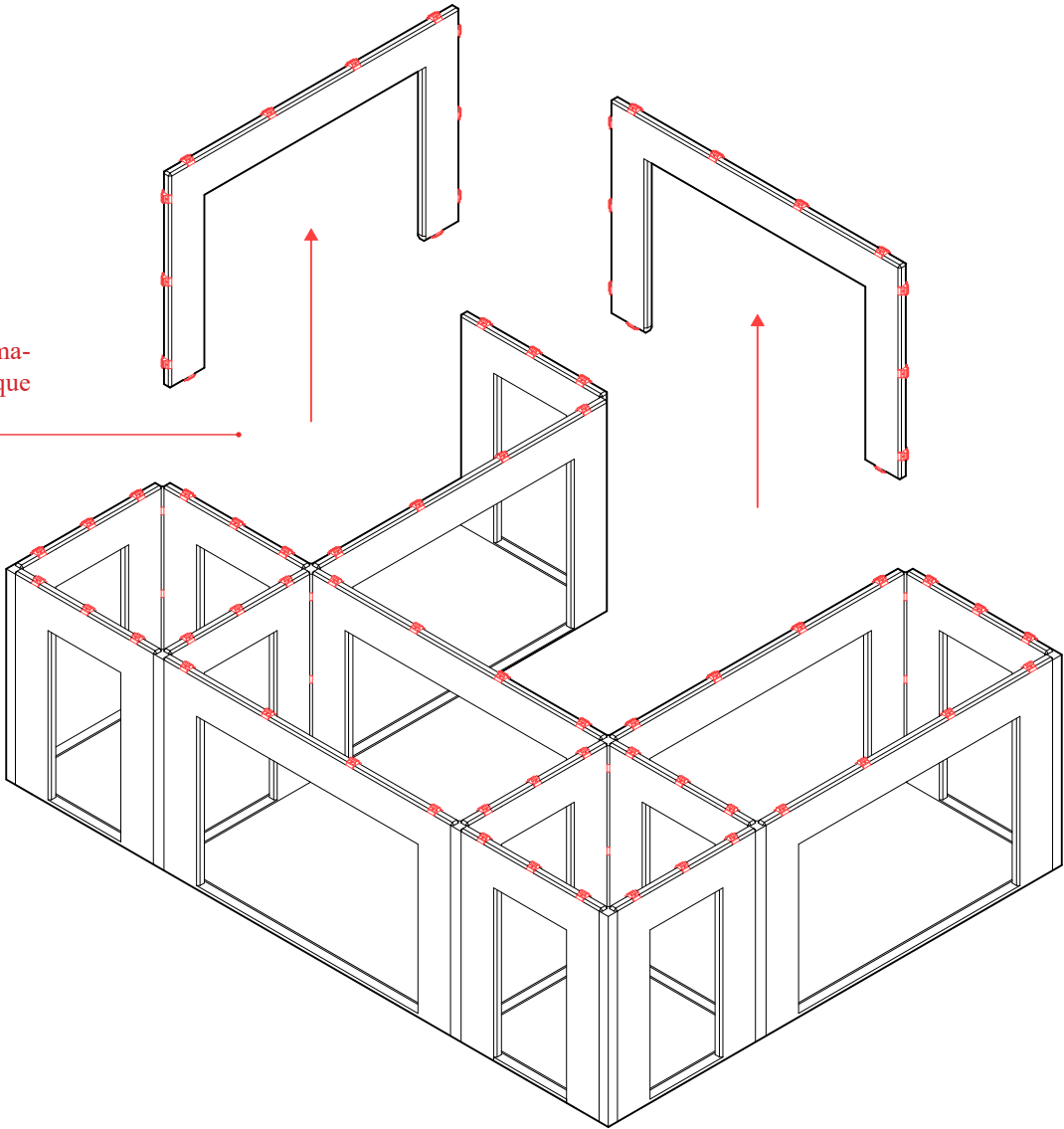
Figura 82 — Circularidade do sistema proposto.

1



Módulo base do sistema 4,4 x 4,4 m

2



Desmontagem dos painéis permite armazenar e reutilizar em outros projetos, o que torna o sistema circular

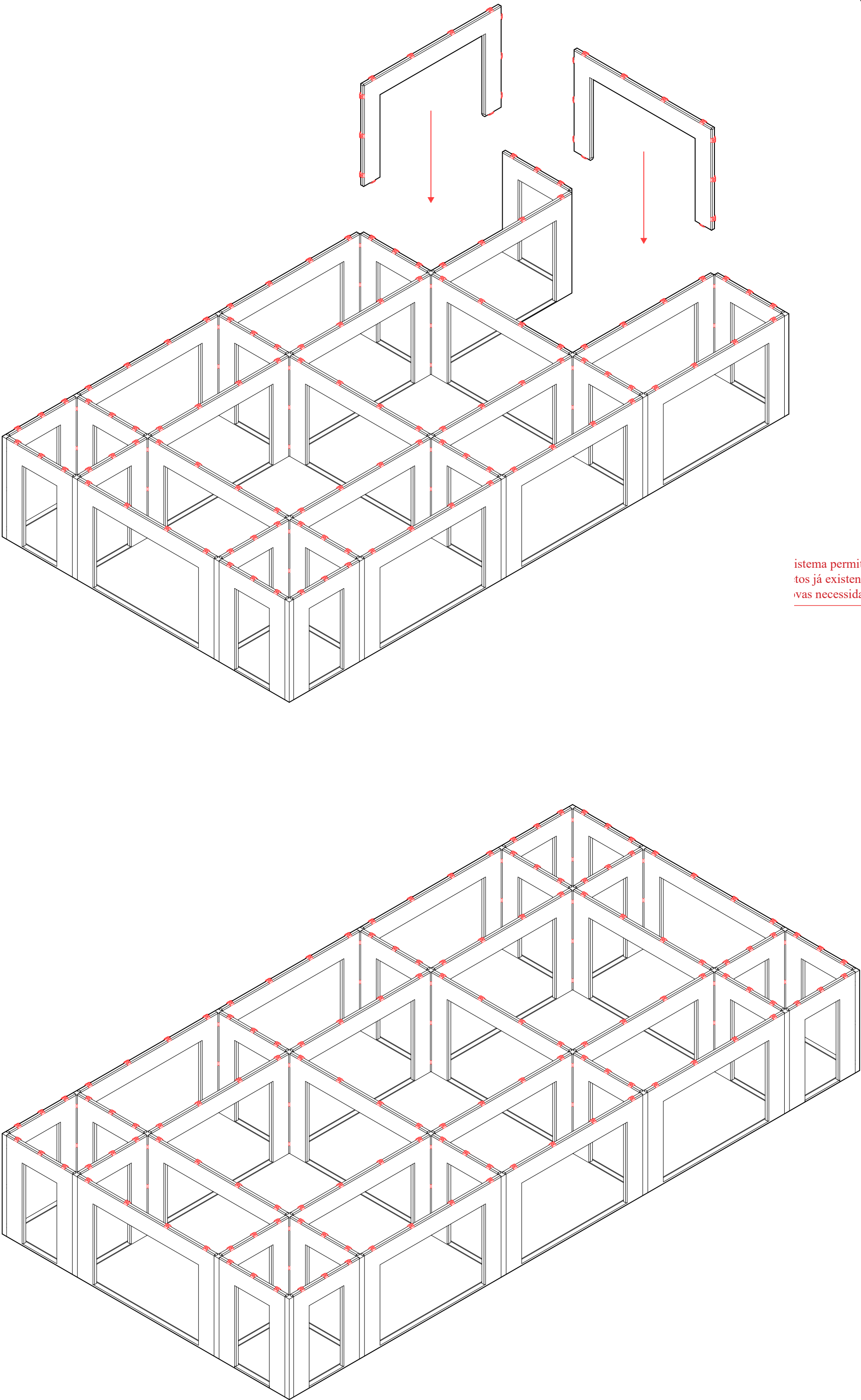
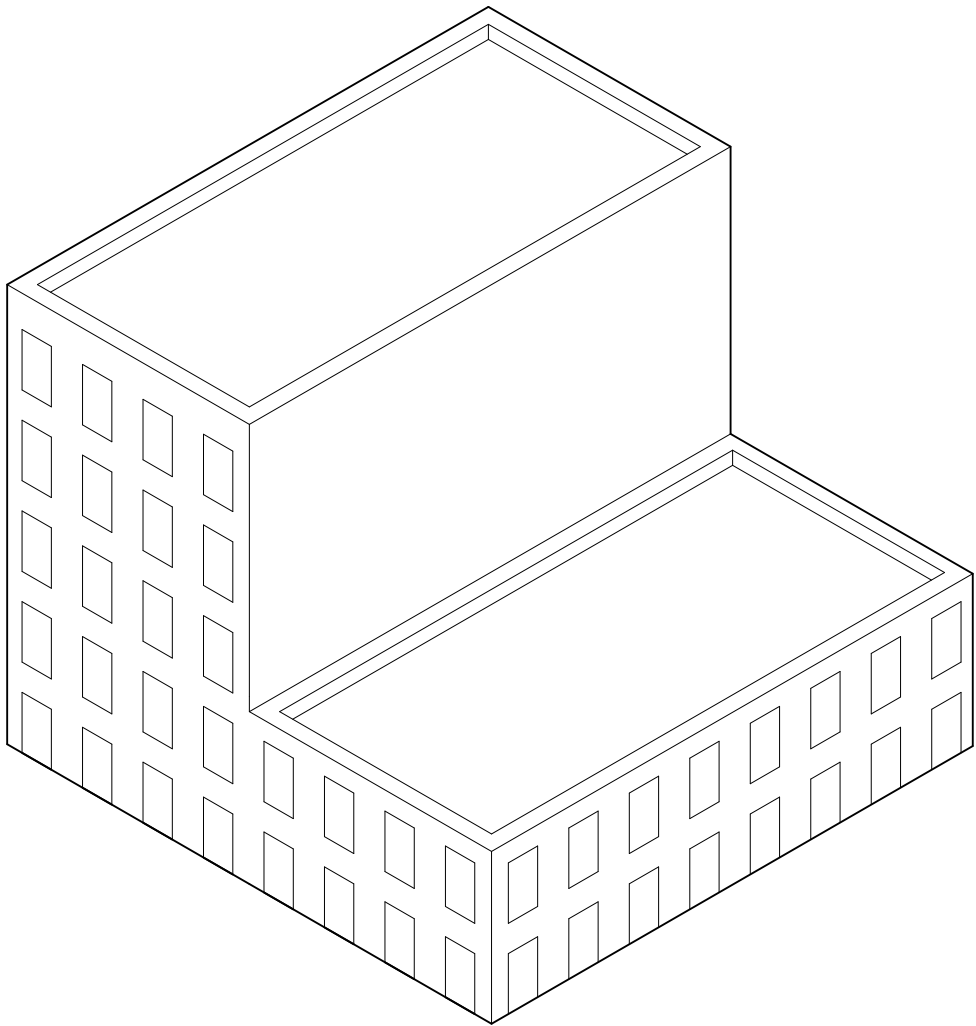
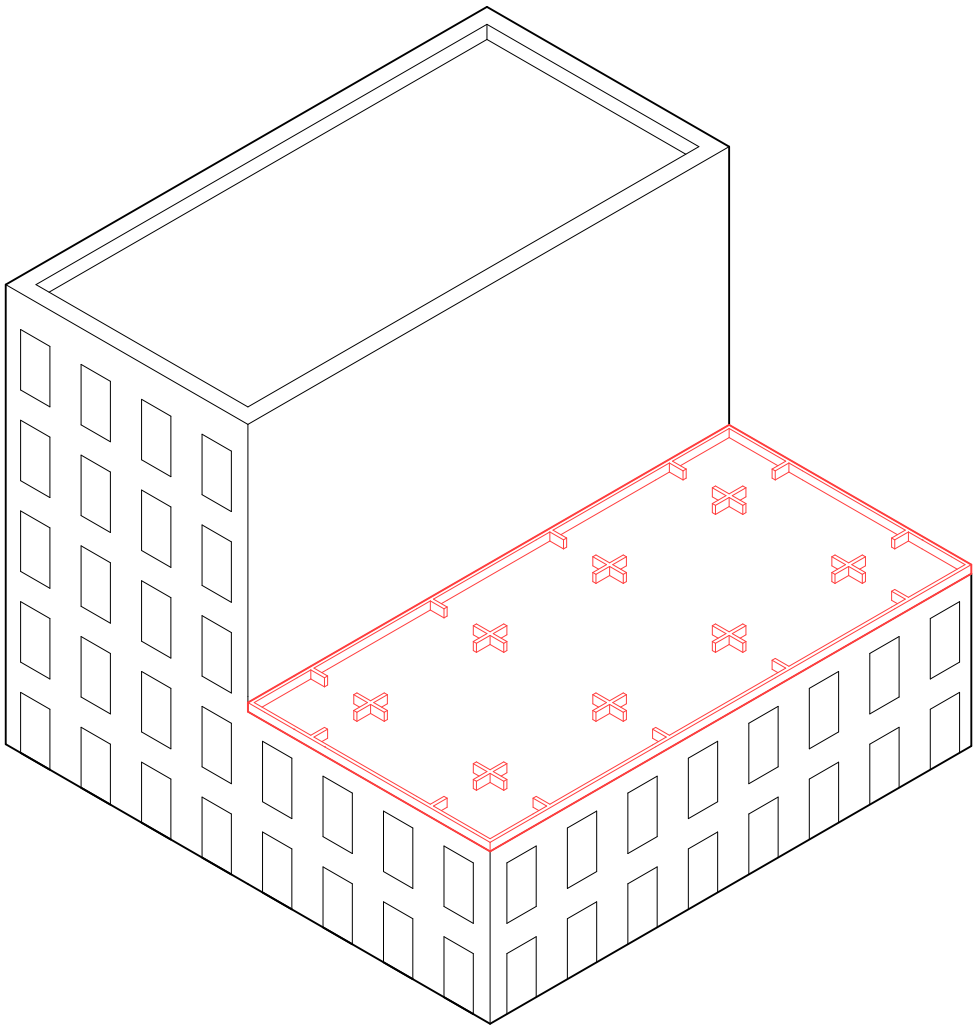


Figura 84 — Sistema de expansão. (1:100)

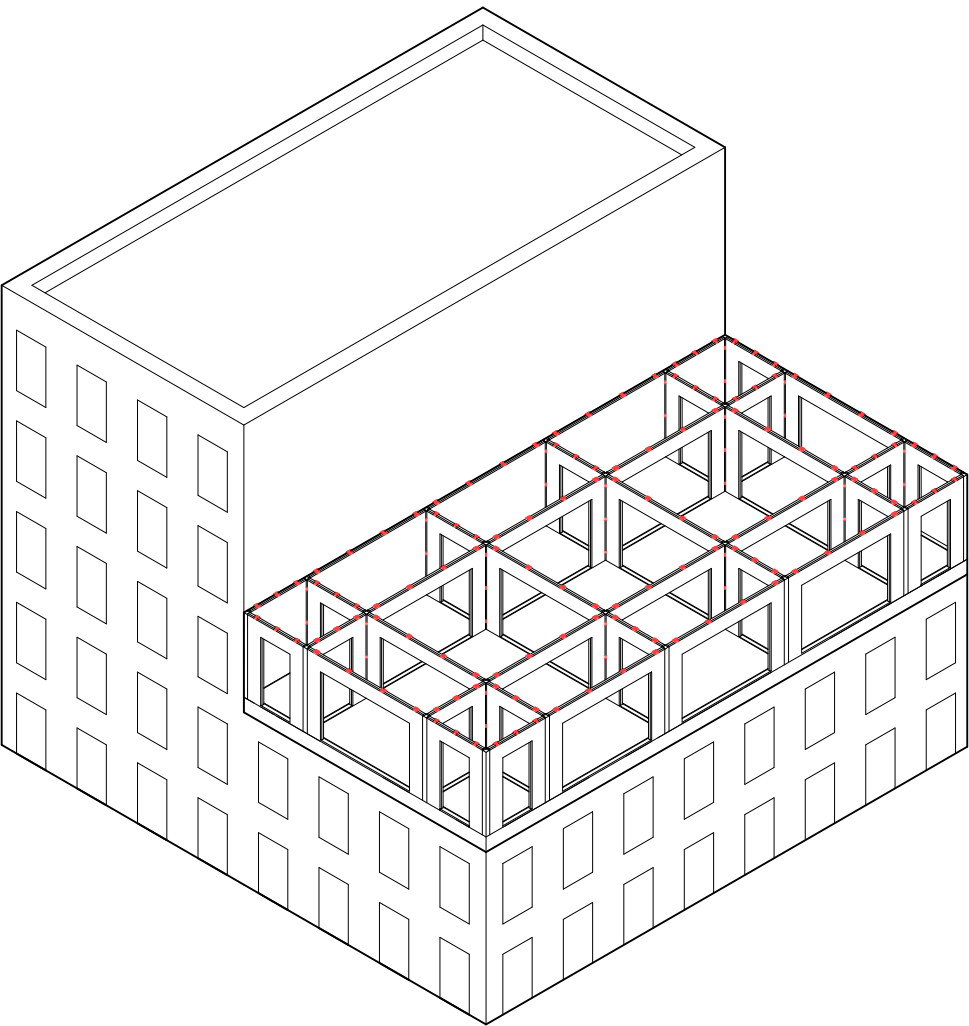
1 Sistema convencional



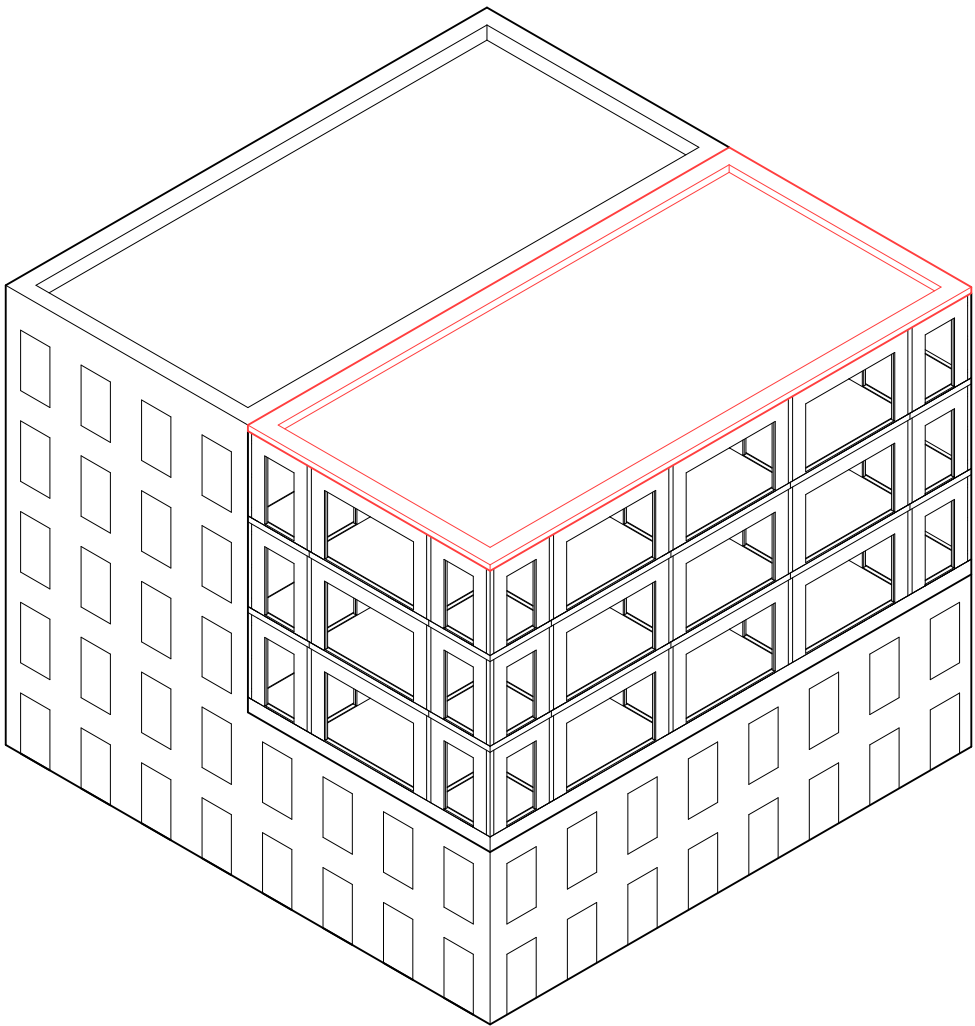
2 Embasamento convencional



3 Sistema proposto



4 Cobertura convencional



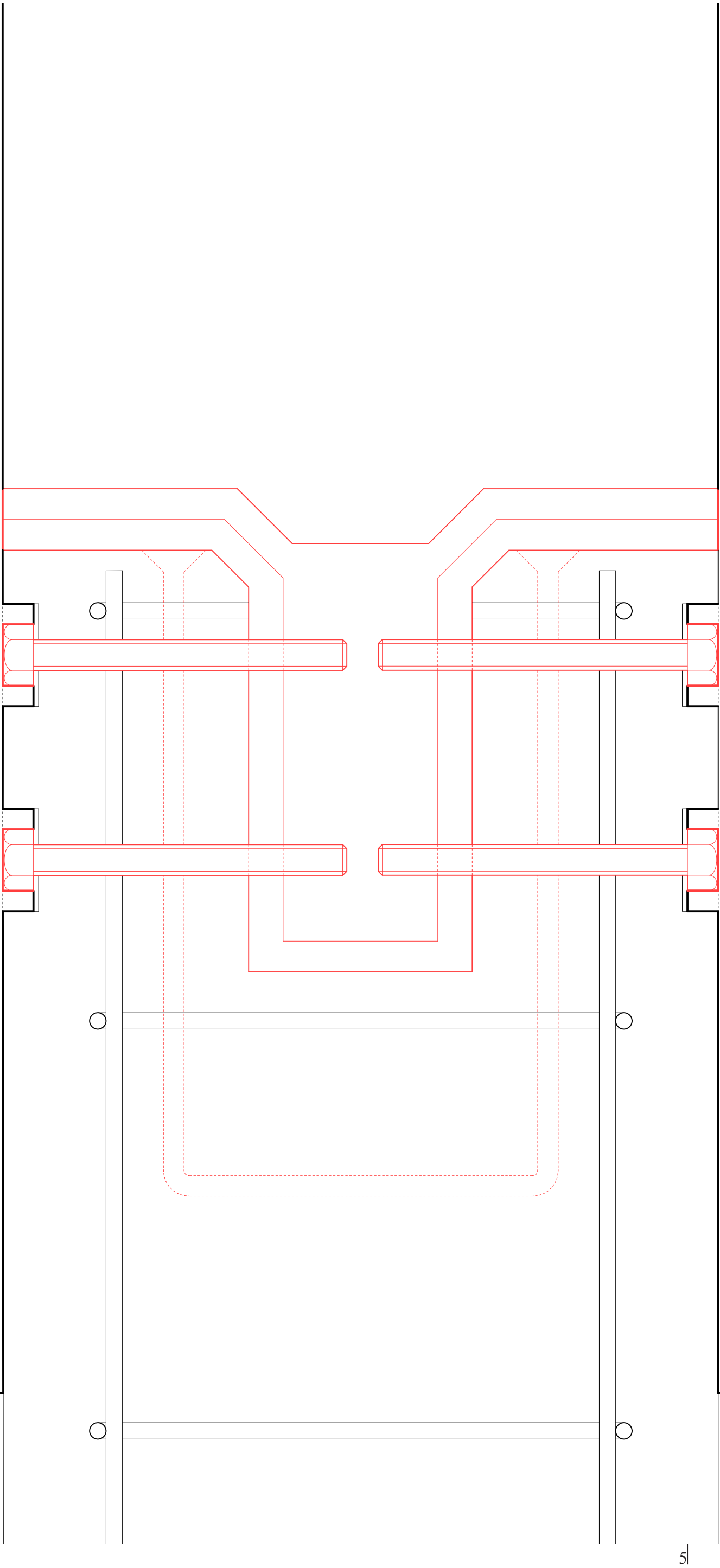


Figura 86 — Detalhe da união a sistemas convencionais. (1:2)

VI

APLICAÇÃO DO SISTEMA

Aplicação do Sistema Proposto

A validação de um sistema construtivo industrializado exige a sua aplicação prática em cenários reais, que testem não apenas a sua robustez estrutural, mas sobretudo a sua adaptabilidade compositiva, a sua eficácia logística e a sua pertinência contextual. Para aferir o desempenho do sistema proposto, foram desenvolvidos dois exercícios projetuais inseridos em contextos geográficos, climáticos, económicos e urbanos contrastantes — Copenhaga e Lisboa — com o objectivo de avaliar o seu comportamento em situações distintas quanto à escala da intervenção, às condições infraestruturais e às exigências ambientais e programáticas.

O projeto desenvolvido para Copenhaga incide sobre uma intervenção de menor escala, destinada à densificação de uma malha urbana consolidada. A escolha desta cidade permite testar o sistema num contexto de clima húmido e frio, caracterizado por invernos prolongados, forte amplitude higrotérmica e elevados padrões de eficiência energética. Simultaneamente, Copenhaga apresenta uma economia altamente desenvolvida e um sector da construção tecnificado, o que facilita a aplicação de soluções industrializadas com recursos locais. Neste enquadramento, o sistema é submetido à exigência de se inserir numa malha preexistente, articulando-se com a envolvente edificada, respeitando regulamentações urbanísticas restritivas, e respondendo às exigências de desempenho térmico e compatibilidade técnica com infraestruturas existentes.

Em contrapartida, o projeto desenvolvido para Lisboa visa explorar a performance do sistema numa intervenção de grande escala, inserida num contexto de expansão da malha urbana periférica. A cidade apresenta um clima mediterrânico, marcado por amplitudes térmicas elevadas entre estações, verões quentes e necessidade de ventilação natural eficiente. Trata-se de um contexto económico menos favorável, com maiores restrições orçamentais e menores níveis de acesso à tecnologia de ponta, o que exige um sistema construtivo robusto, de fácil implementação e economicamente otimizado. Aqui, a aplicação do sistema permite testá-lo como resposta a uma necessidade habitacional em larga escala, colocando à prova a sua capacidade de reprodução modular, de coordenação logística entre frentes de obra e de integração com as infraestruturas urbanas.

Esta dupla aplicação evidencia a versatilidade do sistema, não apenas na sua capacidade técnica de resposta a contextos distintos, mas sobretudo na sua adaptabilidade conceptual a diferentes realidades culturais, económicas e ambientais. O sistema demonstra assim não ser uma solução universal rígida, mas sim uma plataforma técnica aberta, capaz de integrar variações formais, construtivas e programáticas, mantendo a consistência estrutural e a racionalidade produtiva. Em última instância, estas aplicações confirmam a aptidão do sistema para atuar como instrumento operativo de transformação urbana, propondo um novo paradigma construtivo.



Figura 87 — Ortofoto do projeto de Copenhaga. (1:1000)

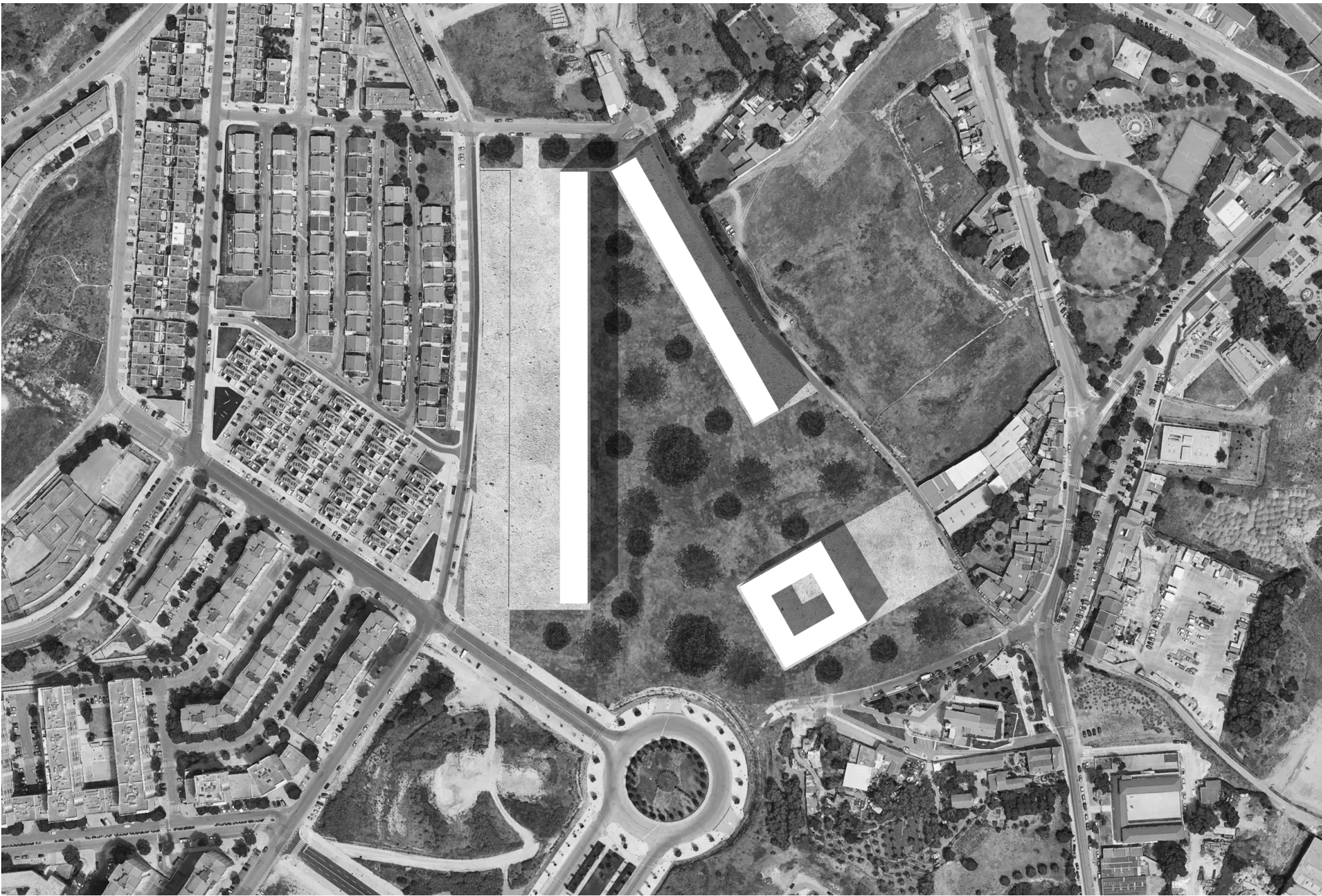


Figura 88 — Ortofoto do projeto de Lisboa. (1:2500)



Copenhaga

O caso de Copenhaga constitui o primeiro ensaio experimental do sistema construtivo proposto, testando a sua aplicabilidade num contexto urbano consolidado, sujeito a fortes condicionantes espaciais e climáticas. Não se trata, neste sentido, de um simples exercício projetual, mas de um verdadeiro laboratório onde se exploram as potencialidades e limites do sistema. A cidade de Copenhaga, capital da Dinamarca, caracteriza-se pelo clima húmido e frio durante grande parte do ano, exigindo soluções construtivas com elevado desempenho térmico e rigor na montagem. Para além disso, a cidade possui uma malha urbana densa e regulamentada, onde os espaços disponíveis para novas construções são escassos e geralmente inseridos em logradouros interiores com acessos limitados.

O local de implantação situa-se num logradouro interior no centro histórico da cidade, acessível apenas por corredores estreitos, rodeado por edifícios antigos com algumas fachadas cegas voltadas para o vazio central. Este vazio, totalmente plano, anteriormente fragmentado e subutilizado, apresentava-se como um espaço expectante, com valor latente enquanto campo de experimentação urbano. A intervenção inicia-se com a remoção de uma construção obsoleta que separava o logradouro em duas metades estanques. Esta demolição, ao libertar o espaço, não visa apenas uma operação de limpeza morfológica, mas a reconfiguração funcional e ecológica do interior do quarteirão, permitindo a sua unificação enquanto sistema autónomo e integrado.

Neste sentido são criados dois eixos principais de organização do quarteirão implantados num jardim contínuo, desenhado não apenas como espaço verde, mas como infraestrutura ecológica ativa. A composição do jardim incorpora um sistema de drenagem pluvial que recolhe a água da chuva, conduzindo-a para um reservatório implantado no eixo central. Este reservatório alimenta uma linha de água que percorre todo o logradouro, funcionando como espinha dorsal do espaço comum. Este sistema, de baixo custo e manutenção mínima, garante a autossuficiência hídrica do jardim durante os meses secos, reduzindo o consumo de água potável e promovendo ciclos fechados no uso de recursos — uma estratégia que se encontra em acordo com os princípios da circularidade propostos pelo sistema construtivo, enquanto que os acessos do quarteirão criam um eixo transversal de travessia e acesso ao logradouro.

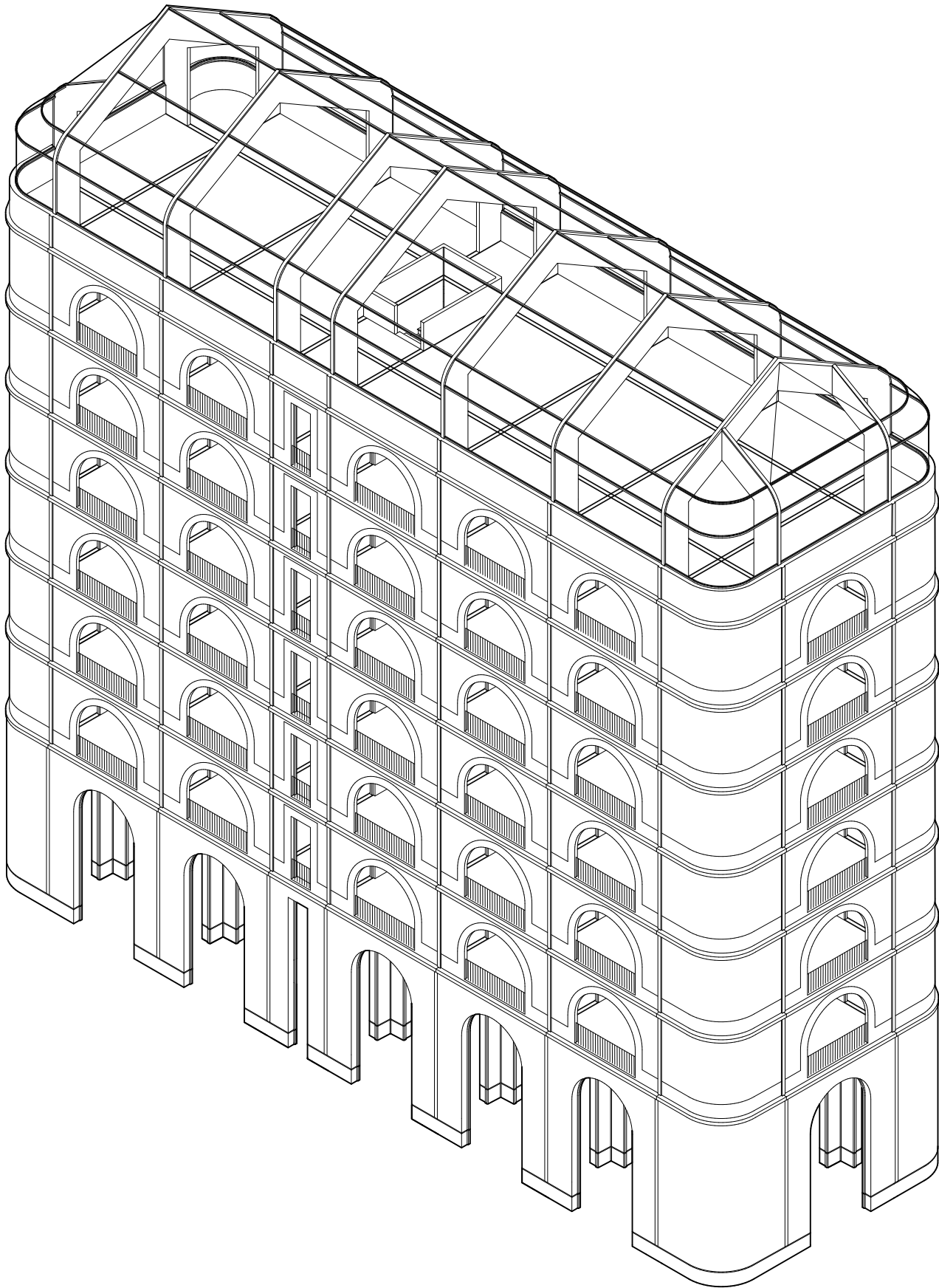
Em articulação com estes eixos, e aproveitando as empenas dos edifícios existentes como elemento de ancoragem, são implantadas três unidades habitacionais construídas exclusivamente com o sistema proposto. Estes volumes de pequena escala, colocados no interior do logradouro, não se afirmam como objetos arquitetónicos isolados, mas como partes de um organismo urbano experimental. No rés-do-chão de cada unidade são integrados espaços comuns de uso partilhado — lavandarias, arrecadações, salas de convívio e estacionamento para bicicletas — reforçando a dimensão comunitária do conjunto e testando o potencial do sistema para incorporar programas híbridos e infraestruturas partilhadas.

A organização interna das unidades habitacionais segue uma lógica de reversibilidade funcional. As zonas principais — quartos e salas — ocupam o núcleo da planta, enquanto os espaços técnicos — cozinhas, casas de banho, escritórios — envolvem os espaços centrais, funcionando como zonas de mediação térmica. Esta disposição permite testar o comportamento dos painéis estruturais em diferentes condições térmicas, criando um sistema de duplo perímetro que contribui para o conforto passivo. As zonas intermédias, semelhantes a varandas fechadas, atuam como filtros climáticos, absorvendo as oscilações térmicas do exterior e reduzindo a carga sobre os sistemas ativos. Este modelo permite verificar o desempenho térmico e energético do sistema em condições climatéricas reais, ao longo de todo o ciclo sazonal.

No plano construtivo, este laboratório é particularmente pertinente para testar a modularidade, a leveza e a racionalidade logística do sistema. O acesso estreito ao interior do quarteirão inviabiliza a entrada de grandes camiões, gruas ou módulos tridimensionais. Esta limitação, comum em muitos contextos urbanos europeus consolidados, valida a escolha de um sistema baseado em painéis bidimensionais autoportantes, transportáveis em veículos ligeiros e manuseáveis por equipas reduzidas.

A impossibilidade de montar uma unidade fabril no local, devido à escassez de espaço de armazenamento e montagem, obriga à produção dos painéis e conectores noutro local, sendo posteriormente transportados e montados em obra. Esta limitação permite testar a robustez do sistema numa cadeia produtiva mais fragmentada, com transporte intercalar, validando a sua eficiência mesmo em condições de produção descentralizada.

O transporte e armazenamento dos painéis foi otimizado através da sua empilhagem em paletes compactas, o que permitiu reduzir o número de viagens ao estaleiro, diminuindo a pegada de carbono associada à logística do processo. Este dado é particularmente relevante num contexto como o de Copenhaga, onde os padrões ambientais são particularmente exigentes e onde a avaliação do ciclo de vida (LCA – *Life Cycle Assessment*) é um critério central nas políticas públicas de construção.



Autor	Renato Sobral
Construtora	—
Programa	Habitação coletiva
Sistema	Novo sistema proposto

Área	290 m ²
Custo de Obra	—
Tempo de Montagem	—
Numero de Exemplares	3

Figura 89 — Isometria do projeto de Copenhaga. (1:200)





Figura 90 — Ortofoto do projeto de Copenhaga. (1:1000)

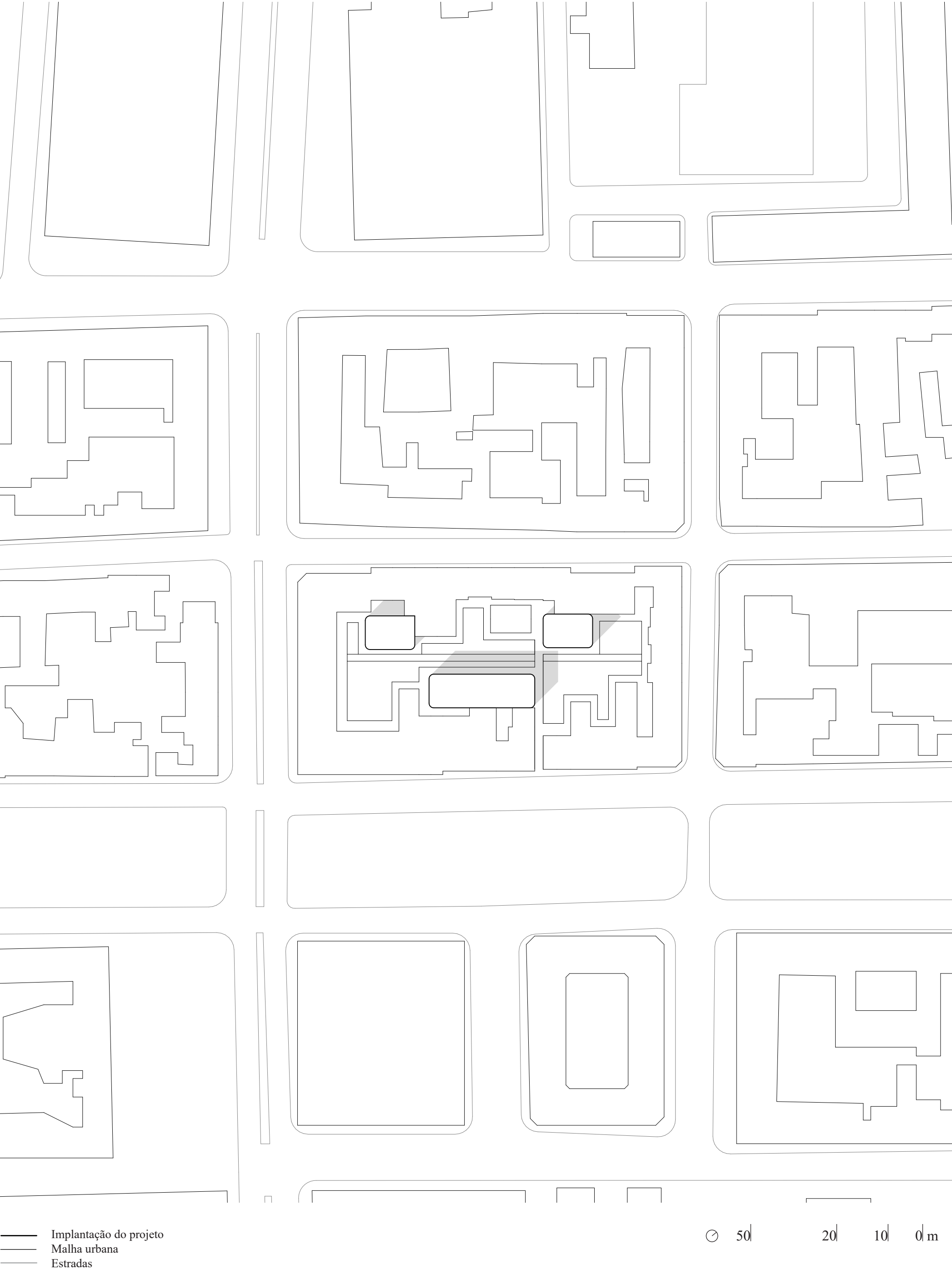
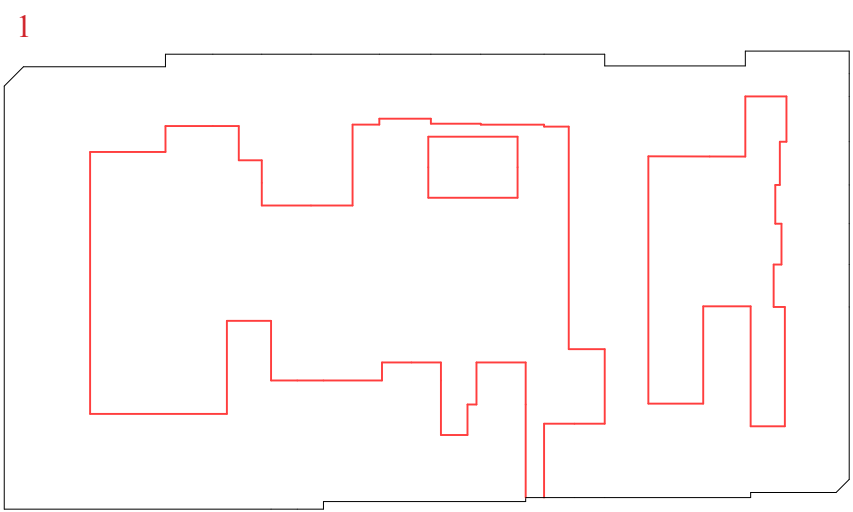
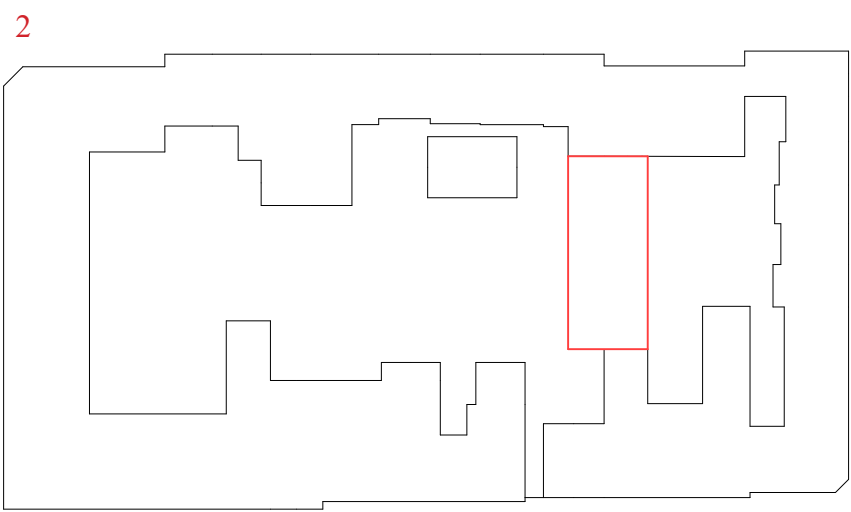


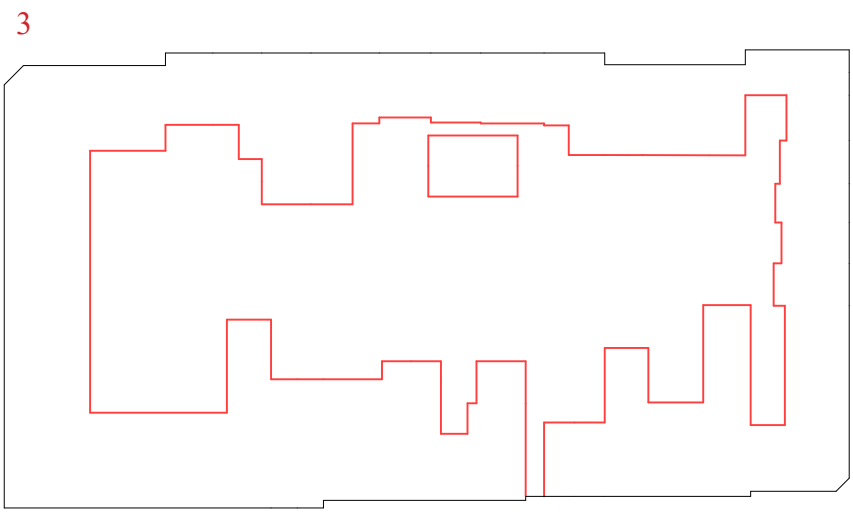
Figura 91 — Planta de implantação. (1:1000)



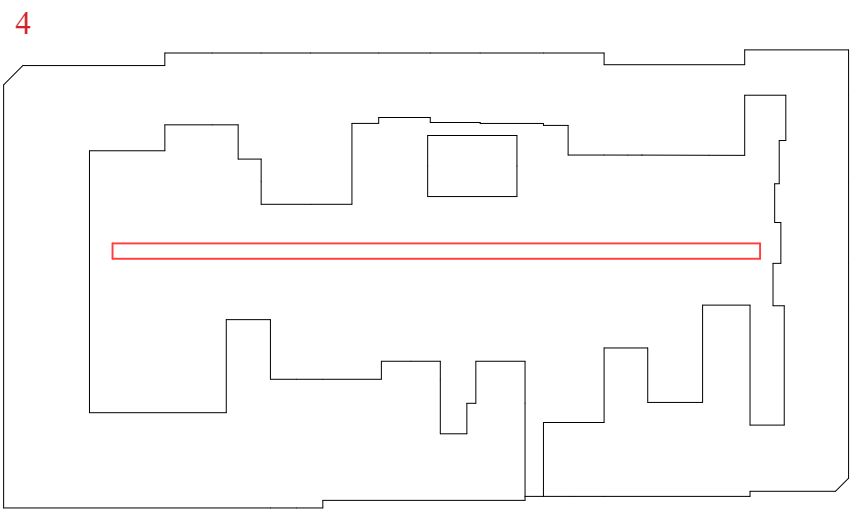
Definição dos logradouros



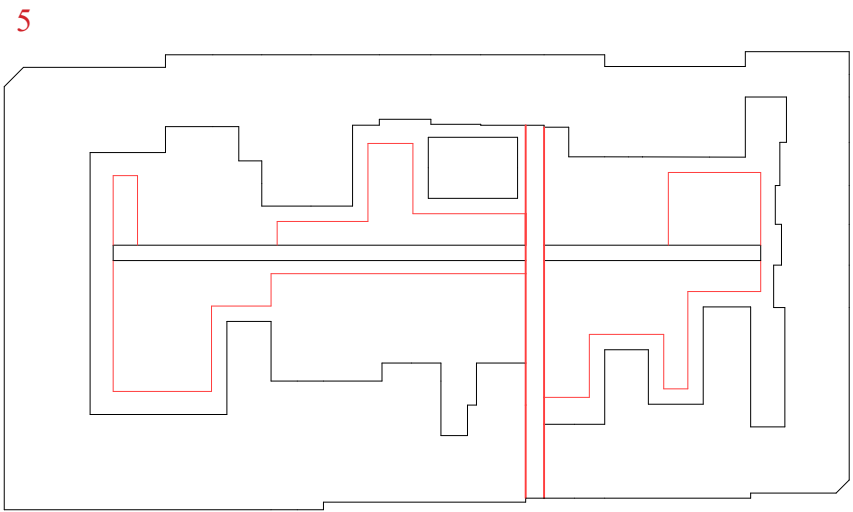
Demolição do edifício existente



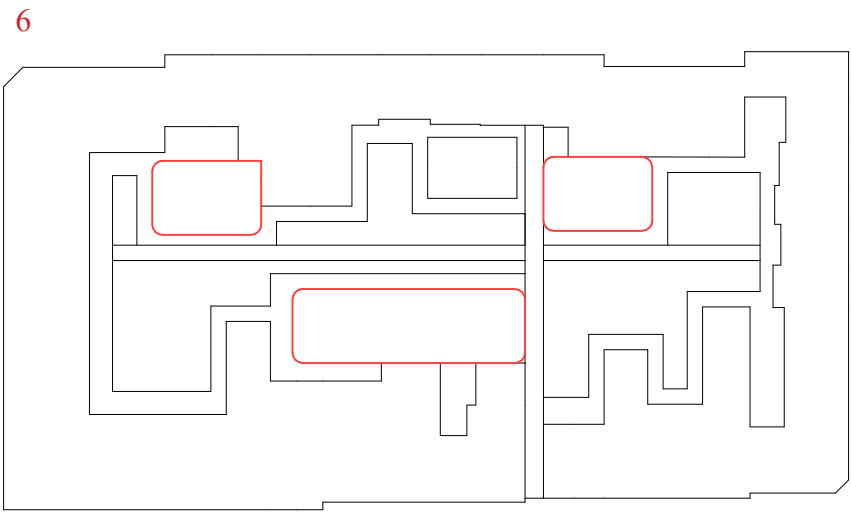
União dos logradouros



Definição da linha de água



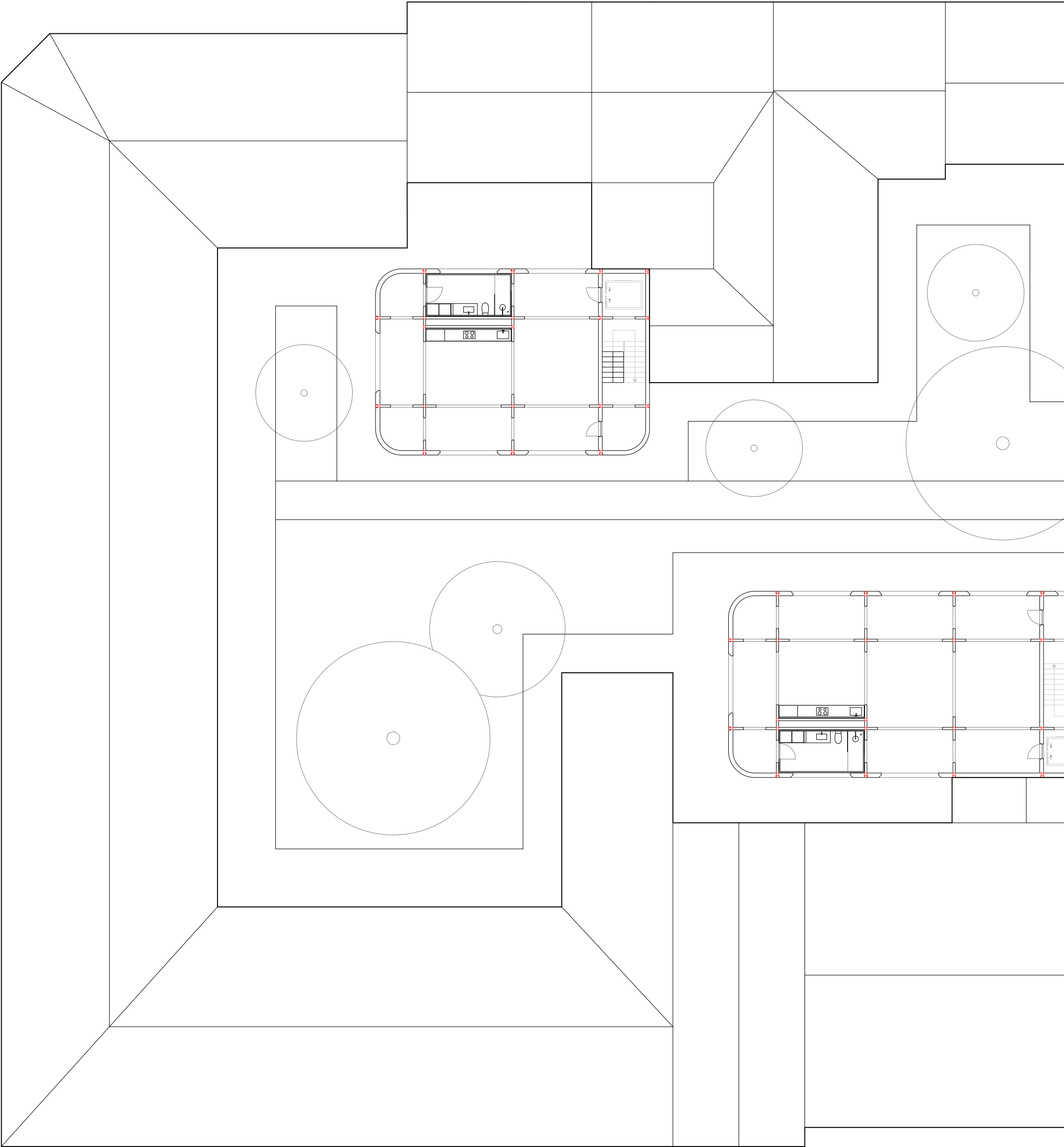
Definição da travessia e jardim



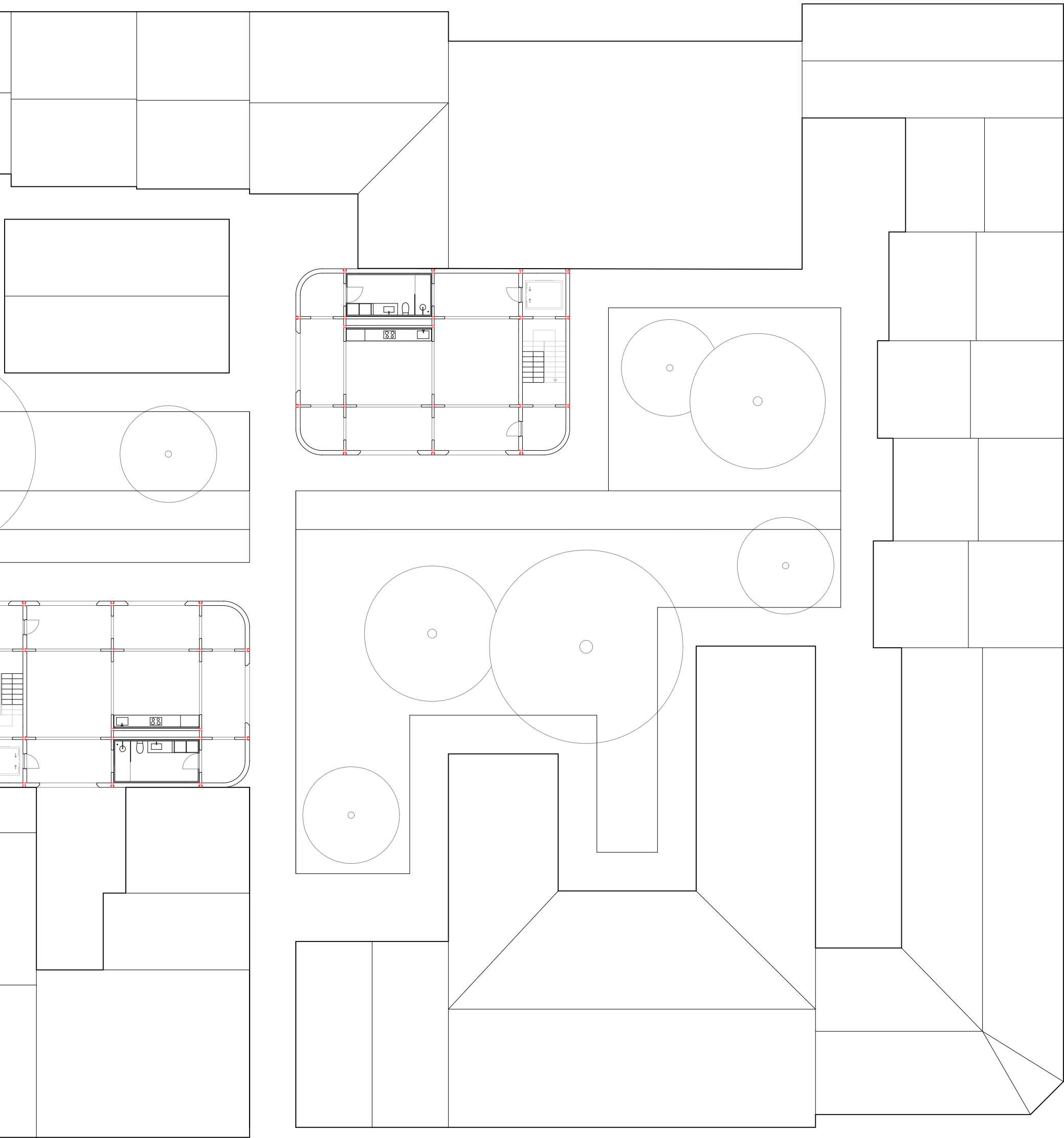
Construção de novas habitações

Figura 92 — Estratégia de implantação do projeto.

Planta do logradouro

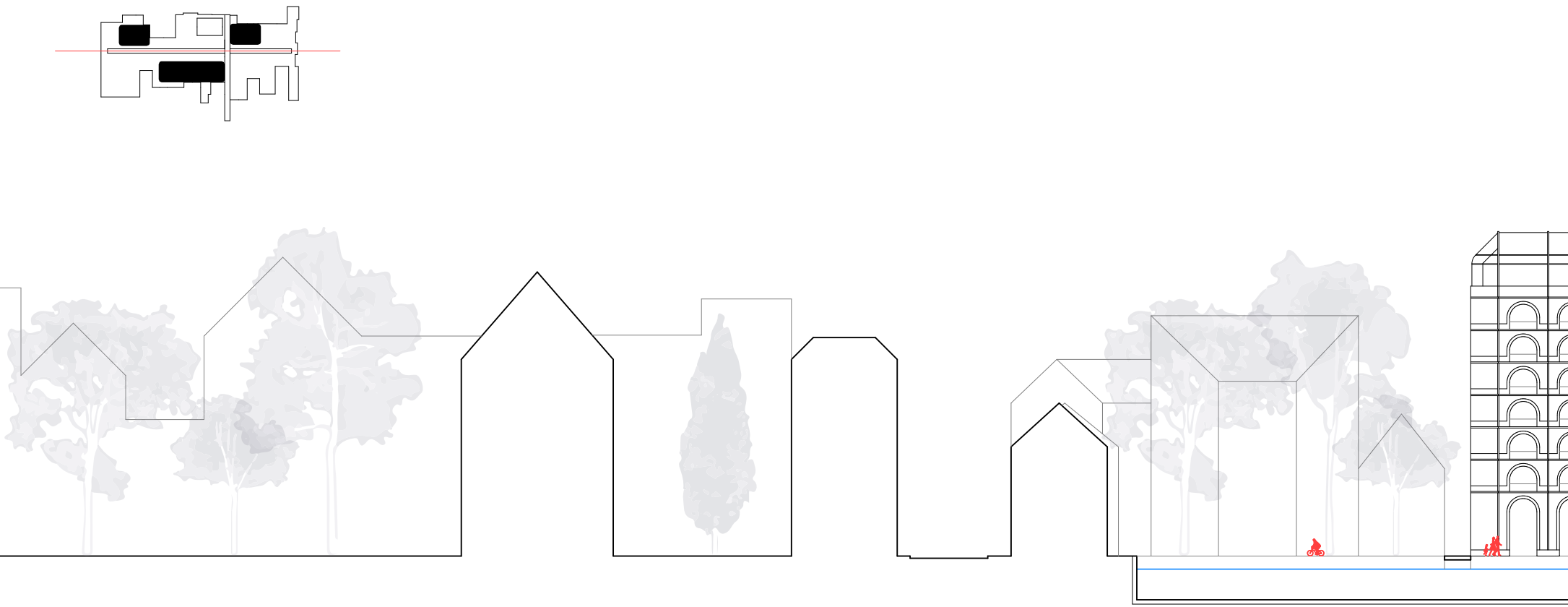


- Logradouro
- Projeto
- Árvores



10 4 2 0 m

Figura 93 — Planta do logradouro. (1:200)



- Linha de corte
- Projeto
- Envolvente
- Canais de água

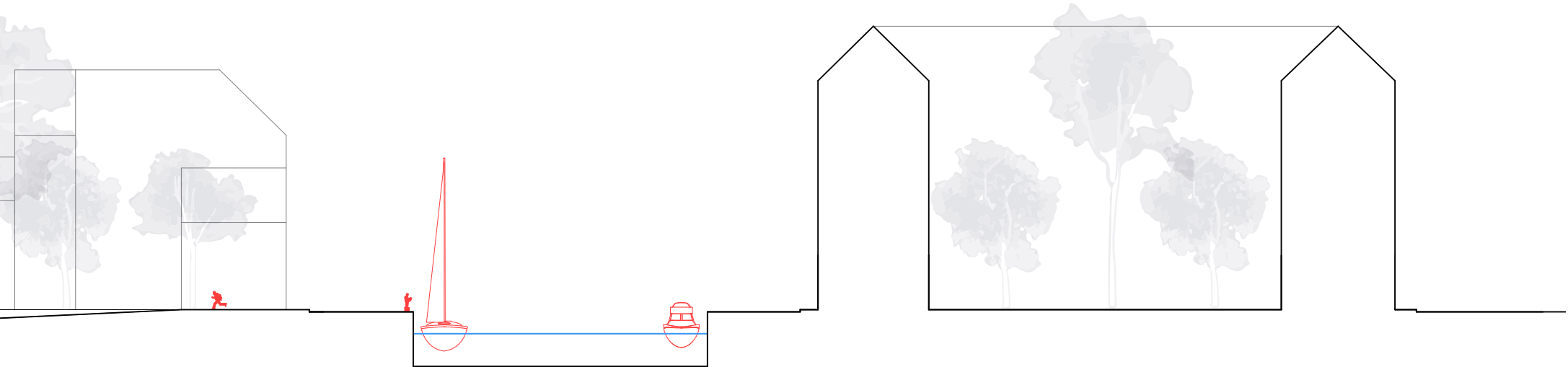
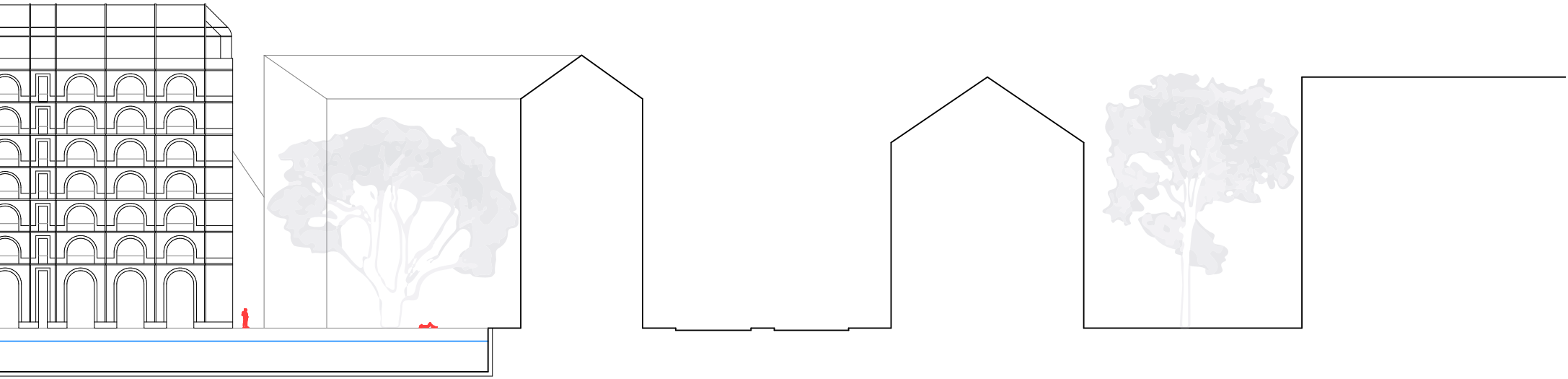
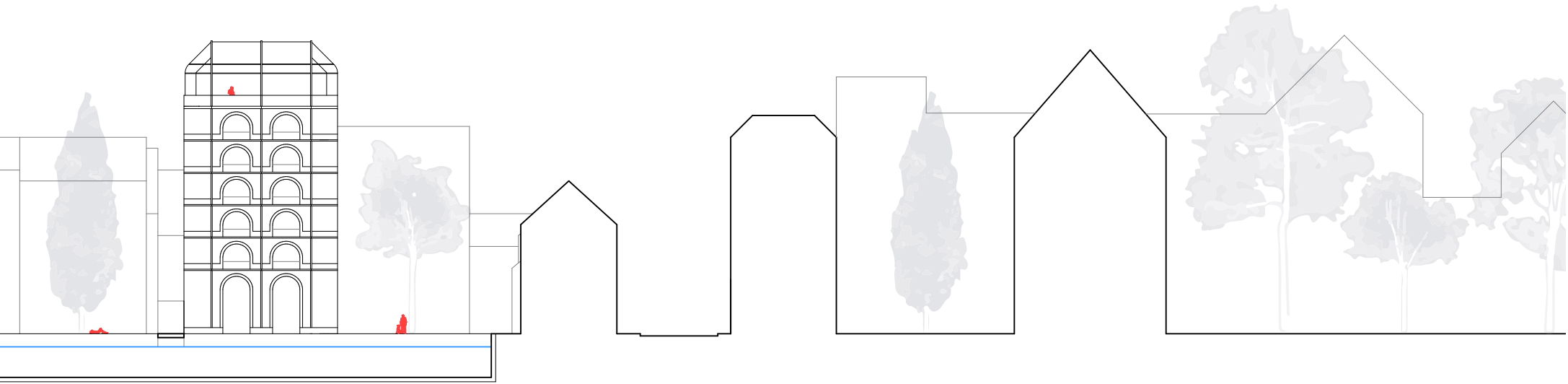


Figura 94 — Cortes transversais pelo logradouro. (1:500)

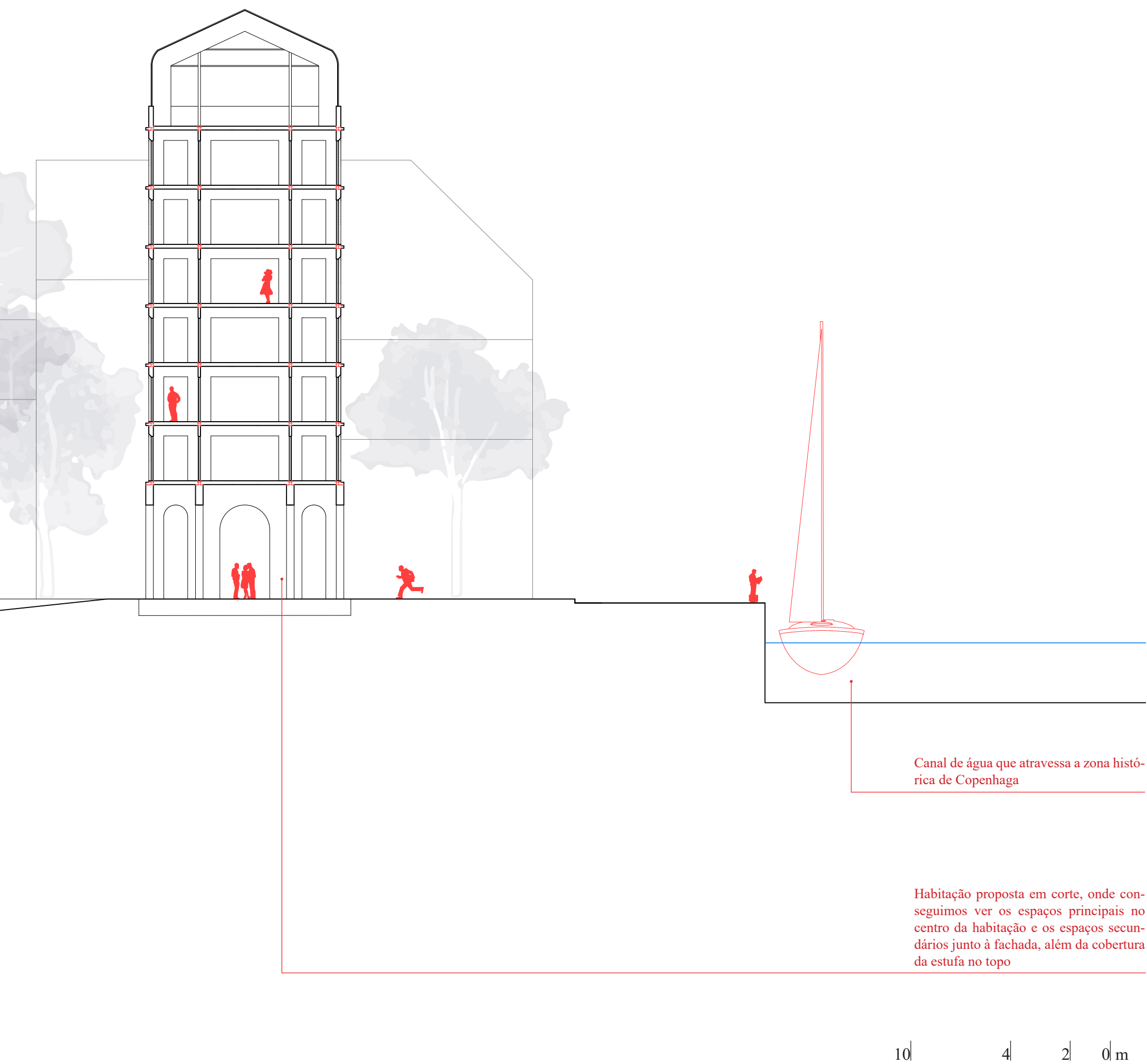
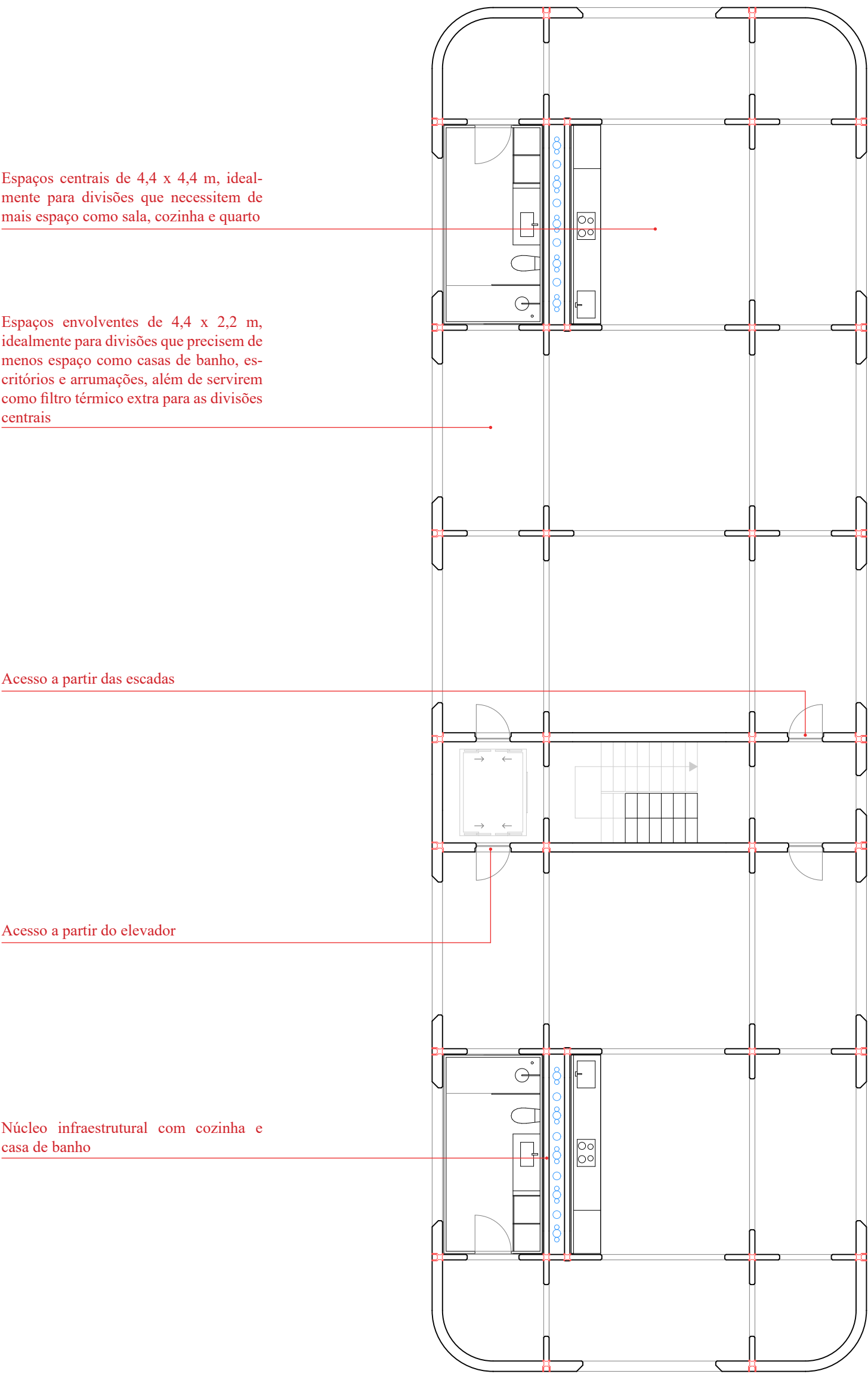


Figura 95 — Corte transversal. (1:200)

Planta da tipologia proposta



Divisão matérica da tipologia proposta

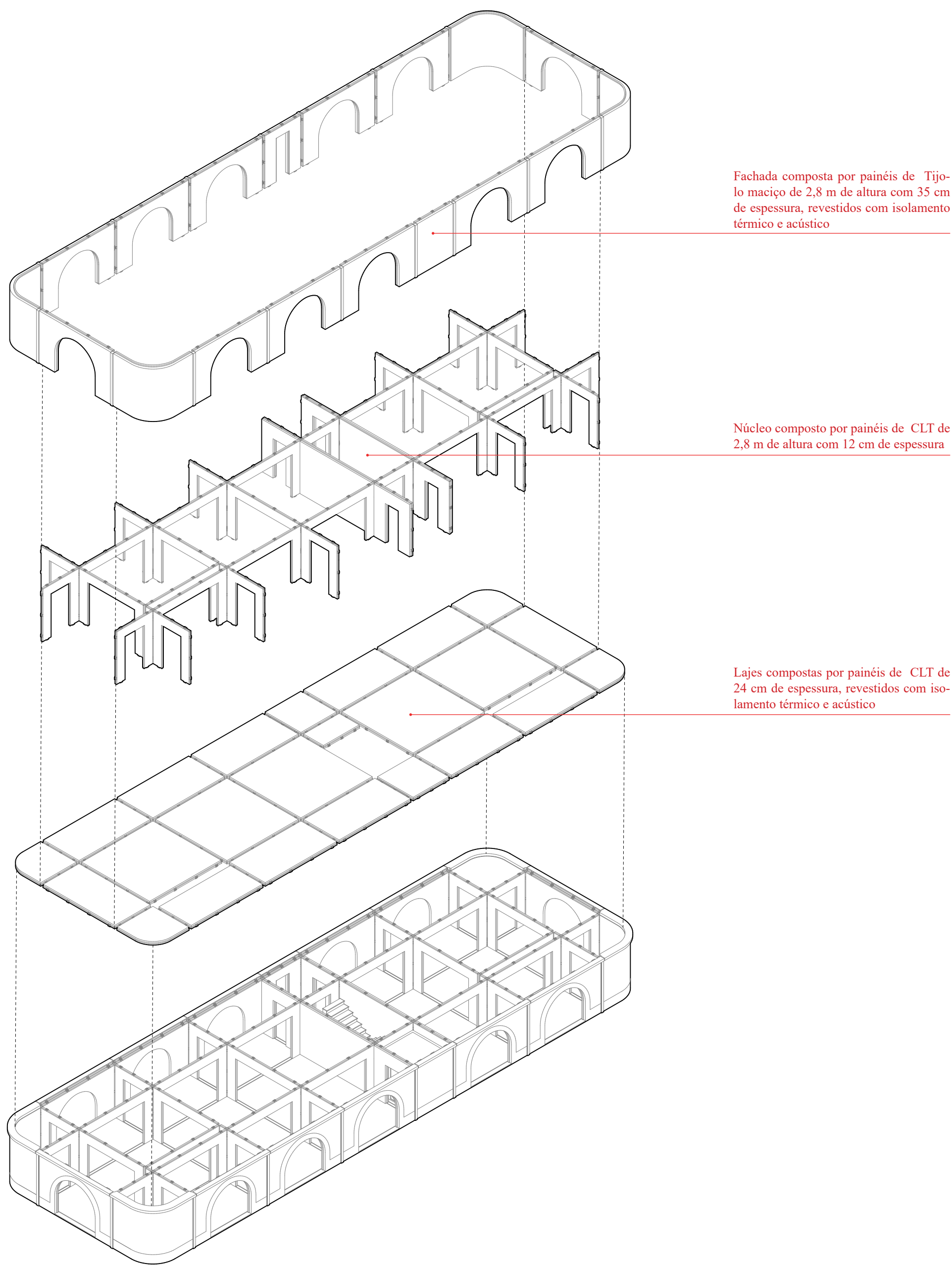


Figura 97 — Isometria explodida da tipologia. (1:200)

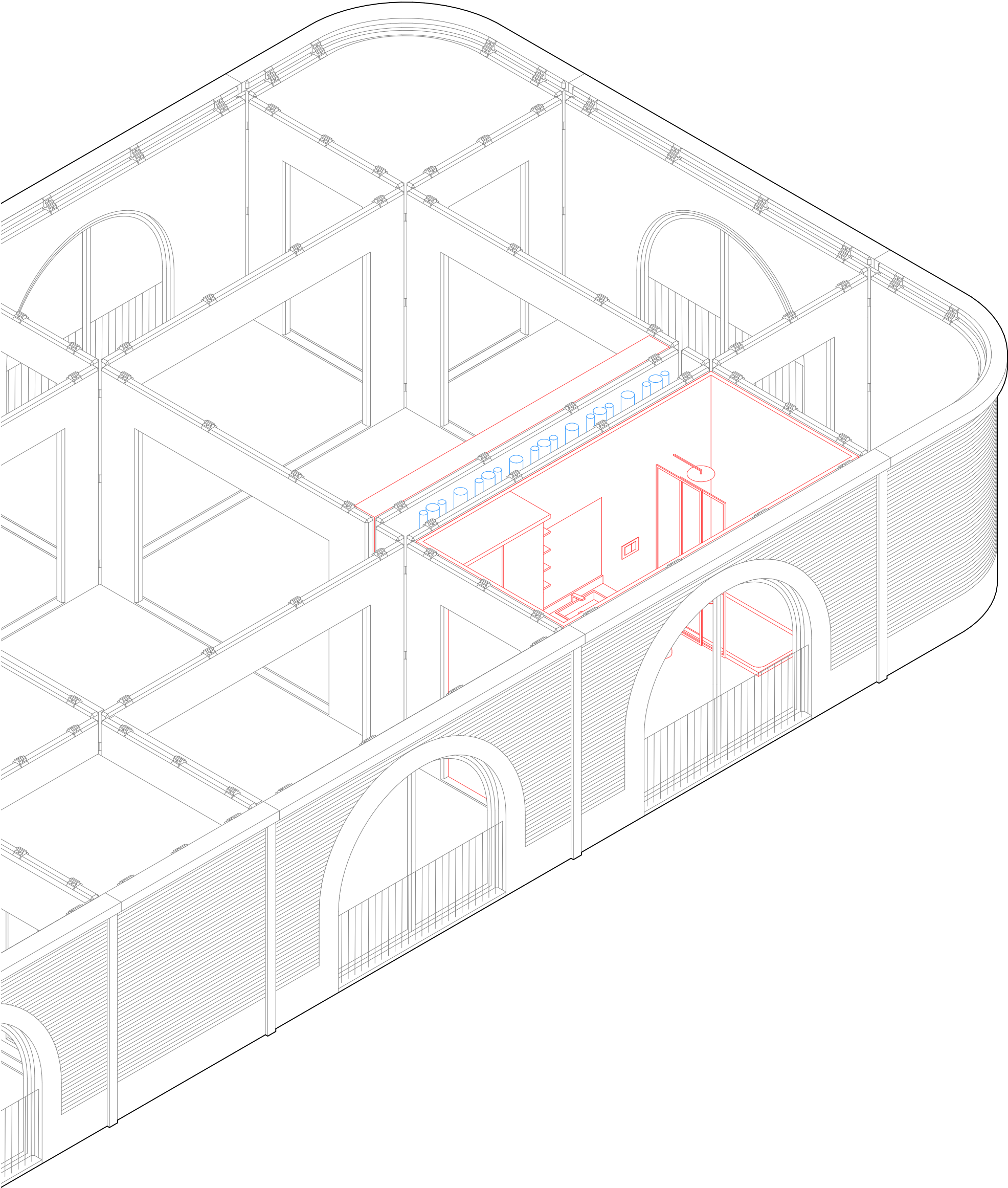


Figura 98 — Isometria da infraestrutura. (1:50)

Tubo de esgoto 90 mm, destinado a águas sanitárias

Tubo de esgoto 40 mm, destinado a águas residuais

Tubo de água quente ou fria 20 mm, destinado a água potável

Tubo de água do contador 25 mm, destinado a água potável

Saguão infraestruturais com 30 cm de largura, onde passam todas as tubagens necessárias para os módulos

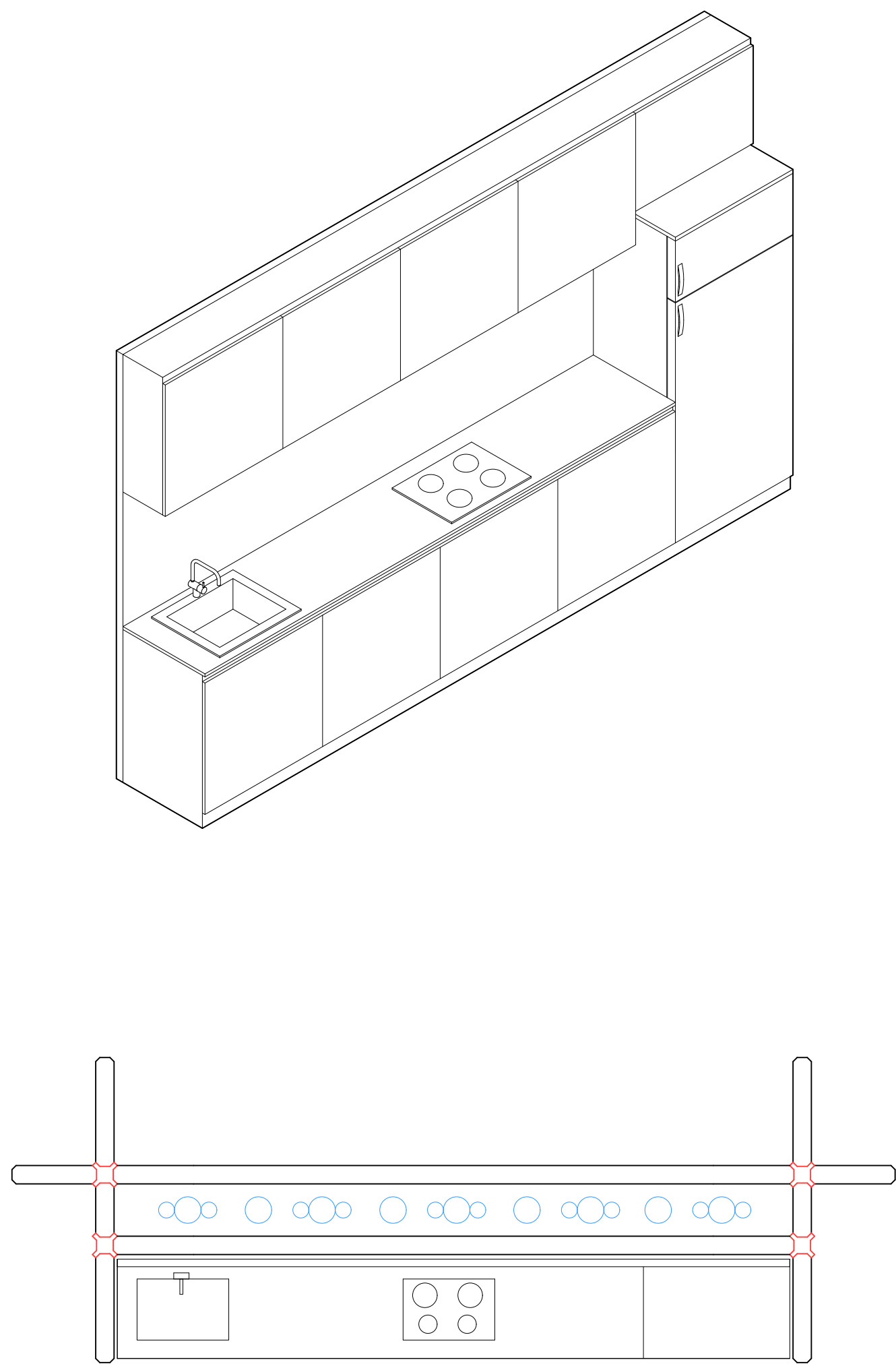
Módulo de cozinha pré-fabricado de 4,4 x 0,65 m, com pré-instalação de tubagem pronta a ser conectada ao painel infraestrutural

Furos pré-feitos para facilitar a montagem e a ligação das tubagens entre o painel e os módulos

Módulo de casa de banho pré-fabricado de 4,4 x 1,6 m, com pré-instalação de tubagem pronta a ser conectada ao painel infraestrutural

Figura 99 — Isometria do saguão e dos módulos. (1:50)

Módulo de cozinha



Módulo de casa de banho

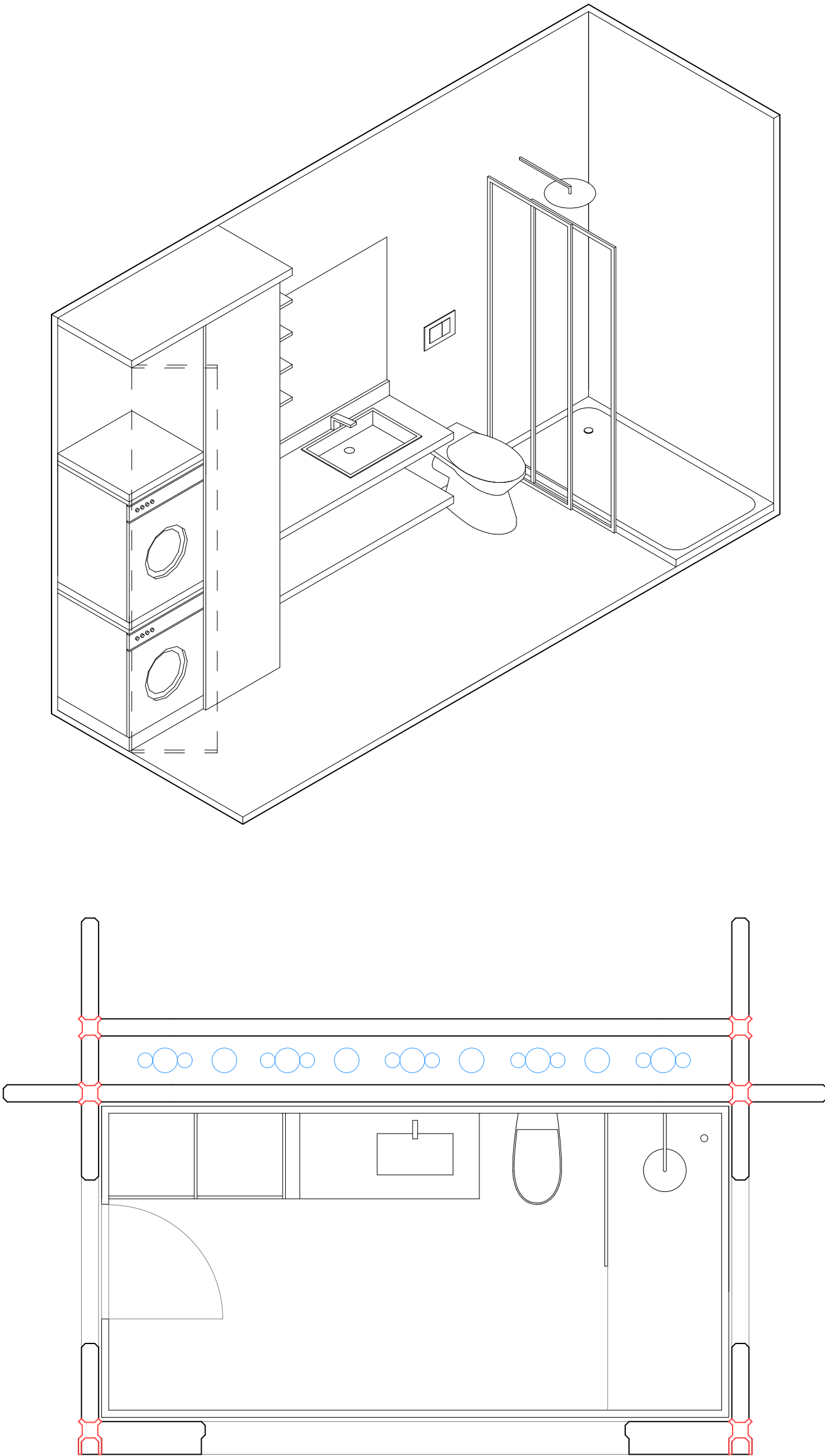
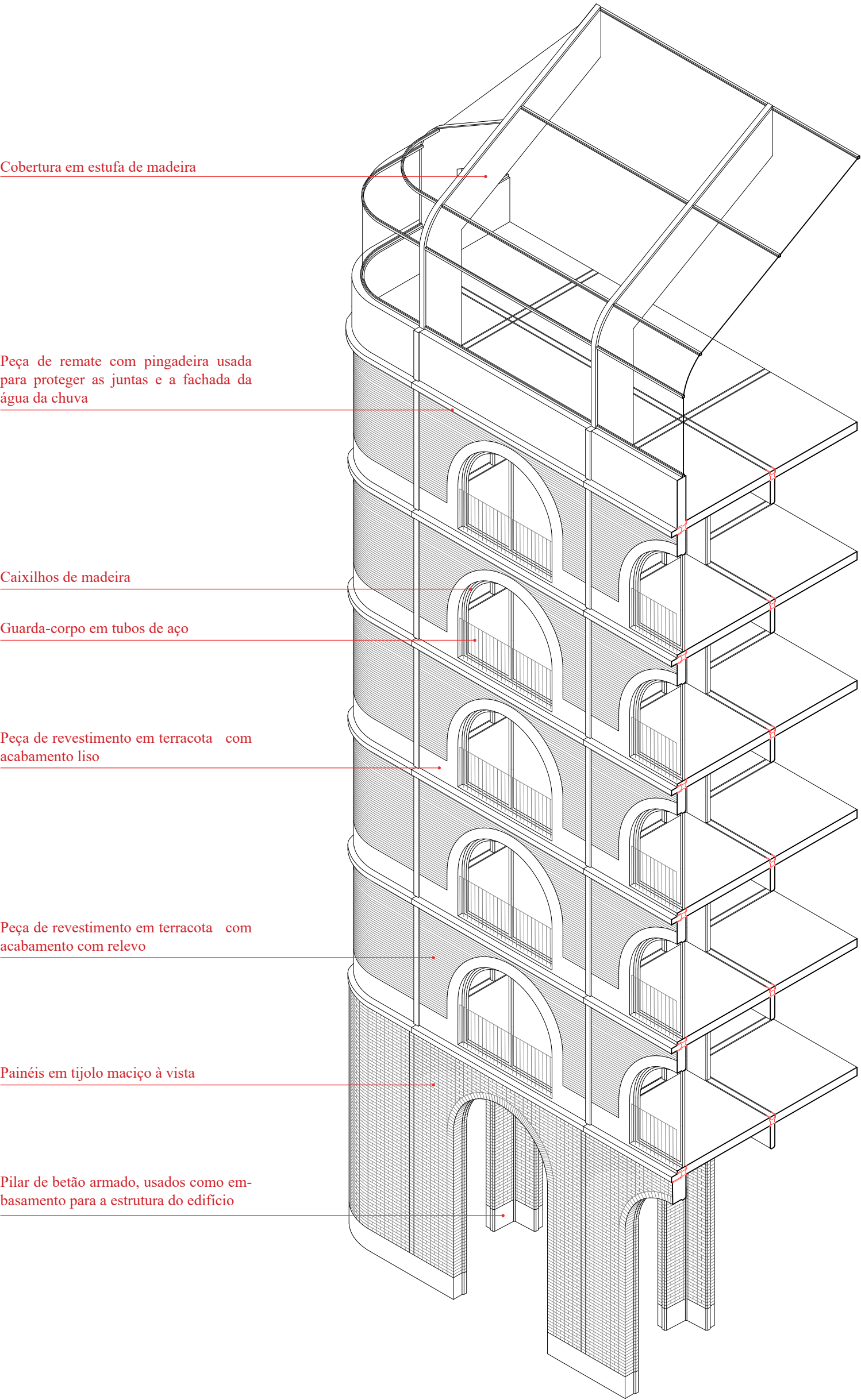


Figura 101 — Módulos pré-fabricados de casa de banho. (1:30)



Cobertura em estufa de madeira

Peça de remate de fachada com pinga-deira

Peça de revestimento em terracota com acabamento liso

Janela de batente com caixilho de madeira e vidro triplo

Isolamento térmico e acústico com 10cm de espessura, protegido pelo revestimento em terracota

Painel de tijolo maciço na fachada

Painel de laje em CLT com isolamento térmico e acústico

Painel de tijolo maciço no piso inferior

Peça de união entre painel e pilar de embasamento

Embasamento convencional em betão armado

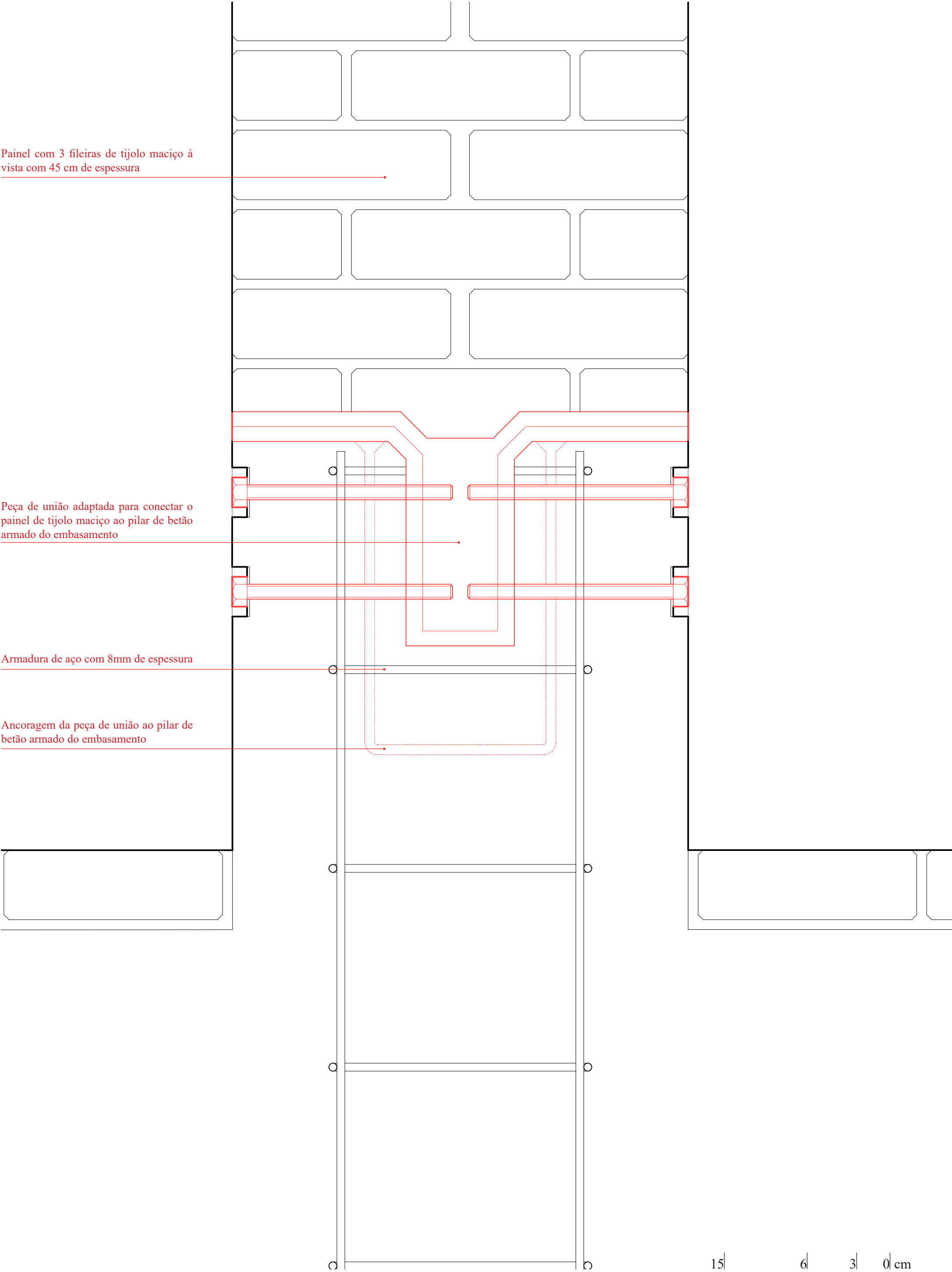


Figura 104 — Detalhe construtivo do embasamento. (1:3)

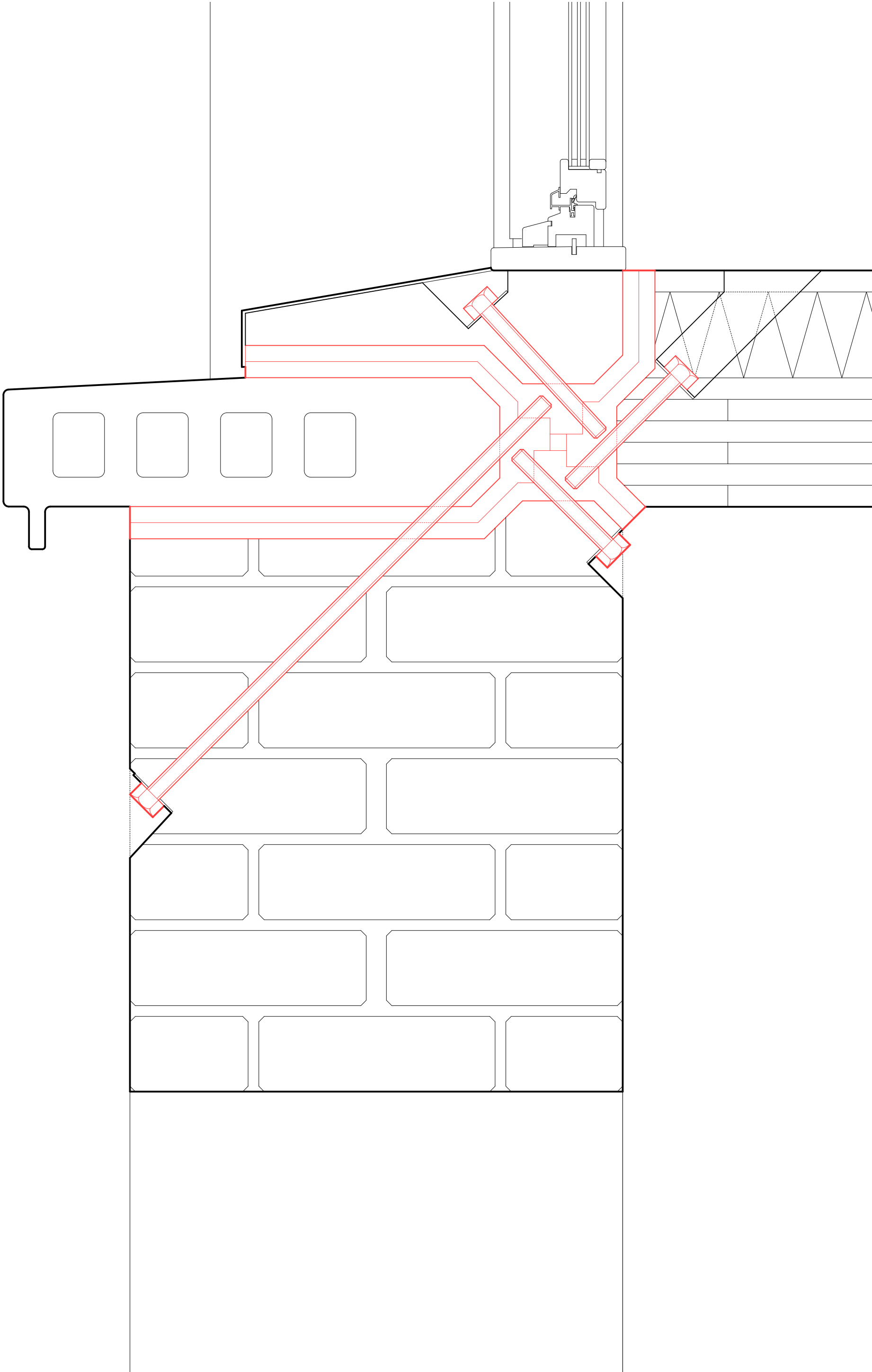
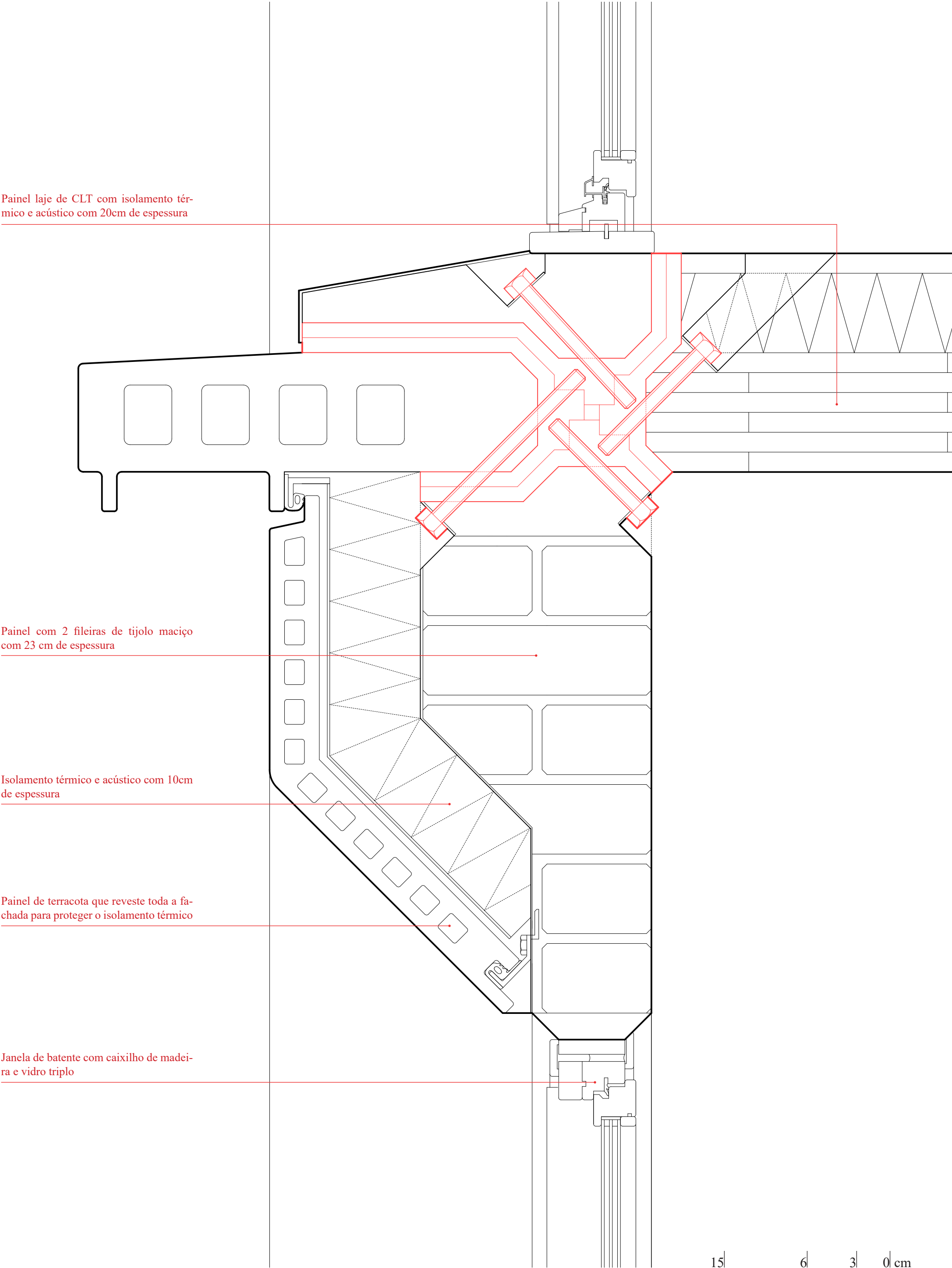


Figura 105 — Detalhe construtivo do corpo. (1:3)



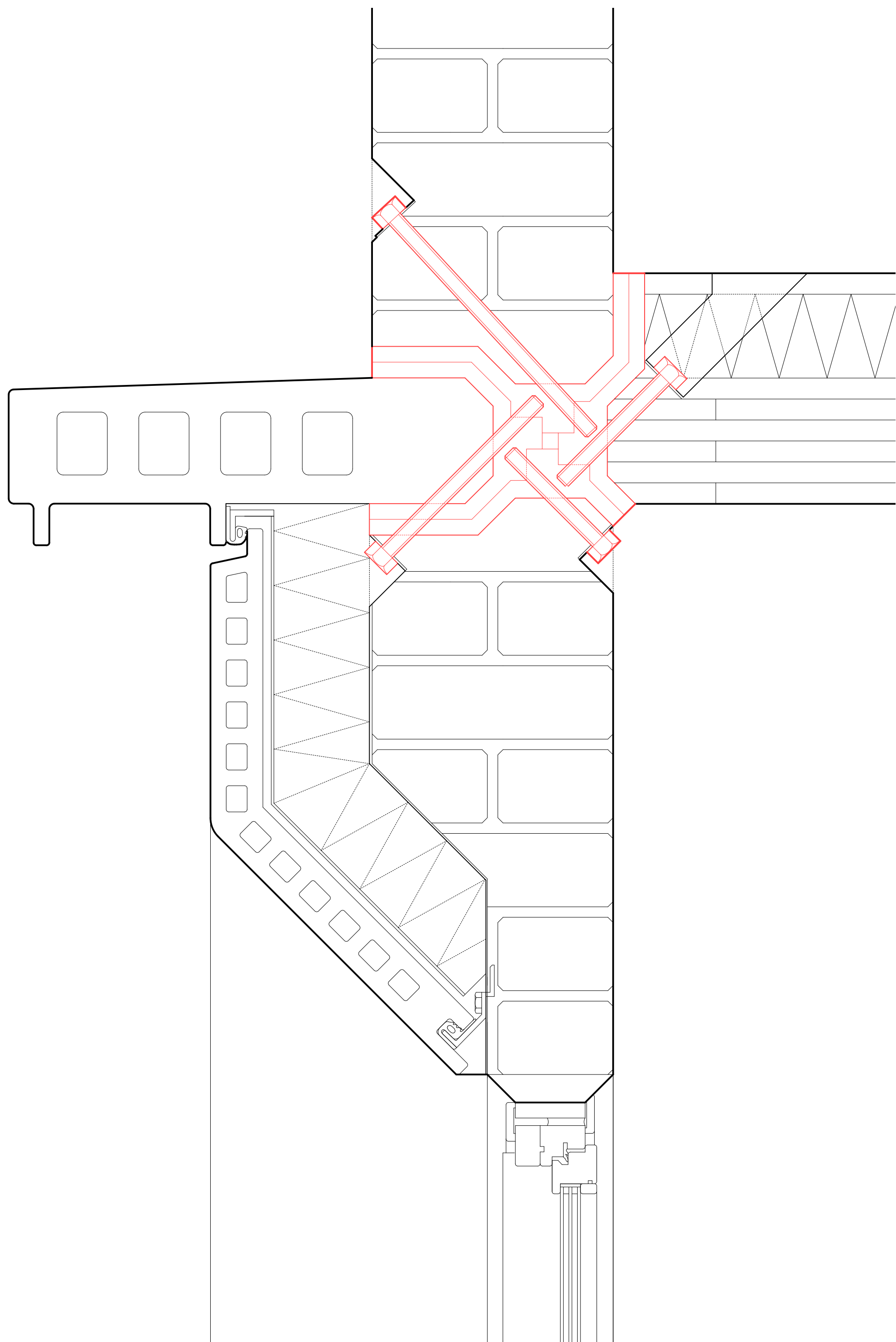
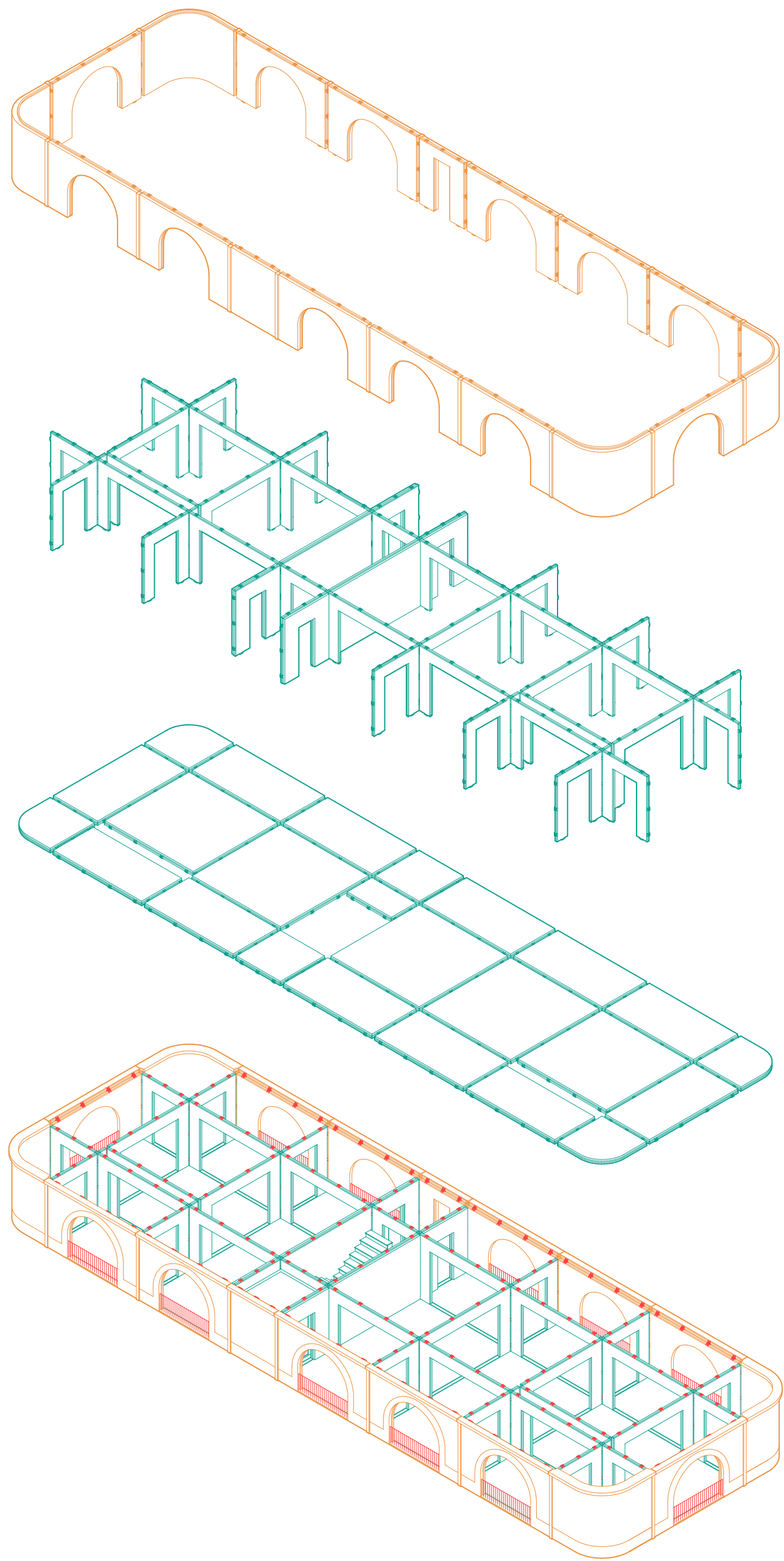


Figura 107 — Detalhe construtivo da cobertura. (1:3)



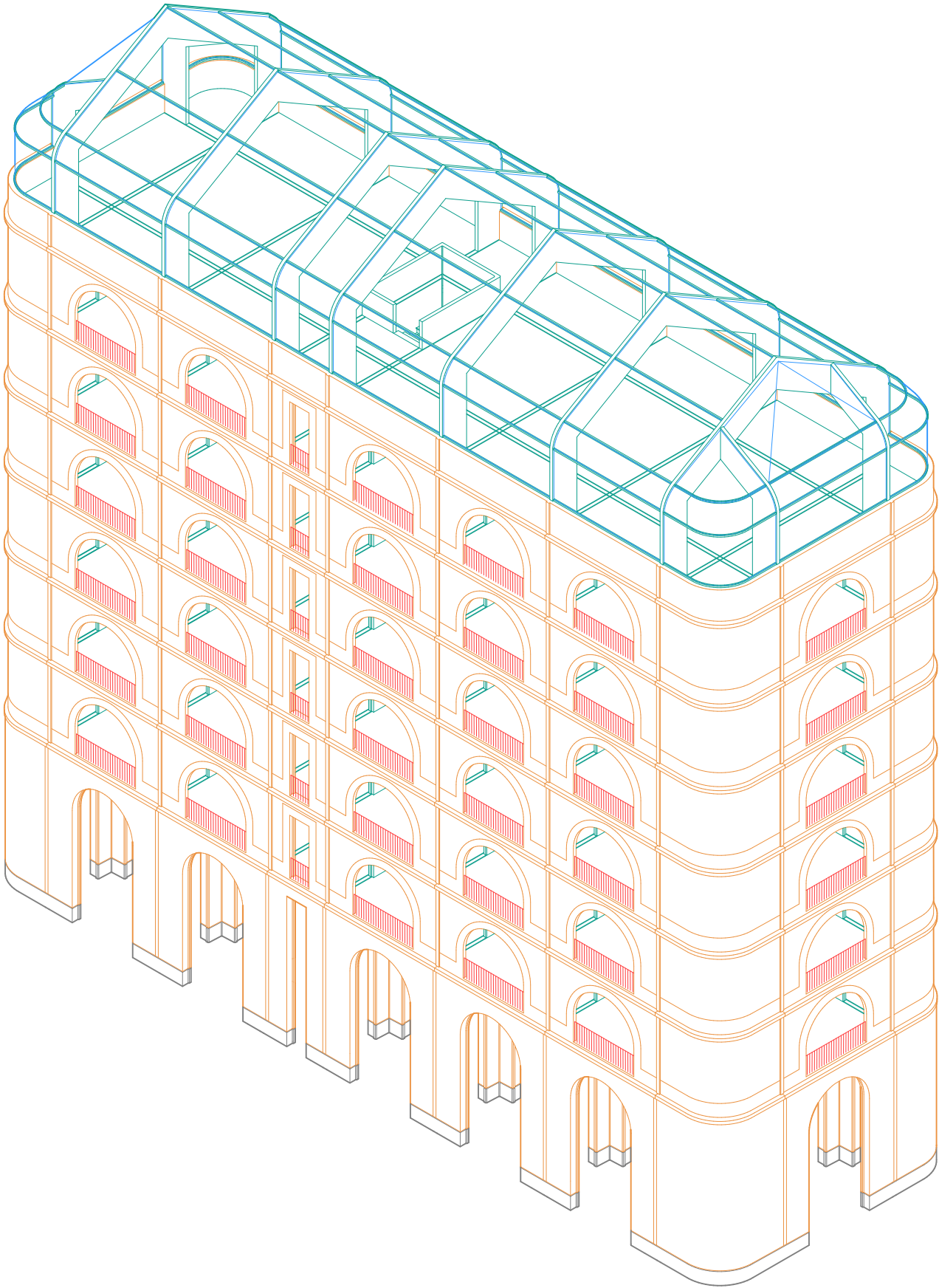
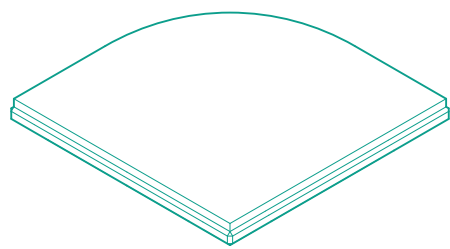
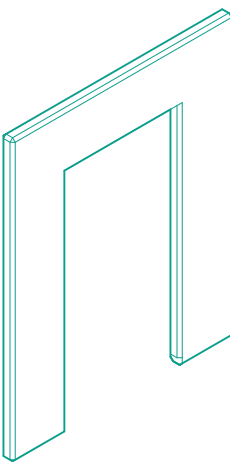


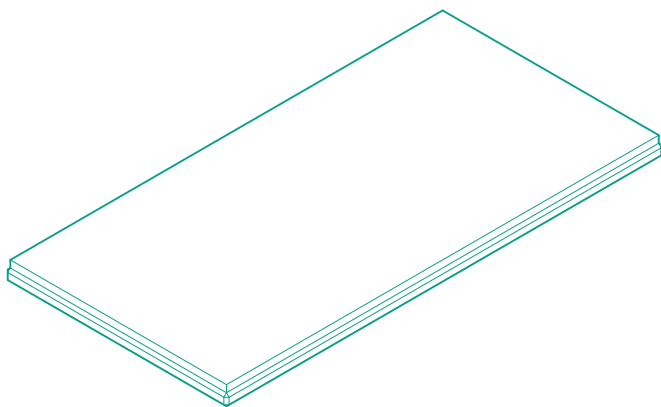
Figura 109 — Isometria da habitação. (1:200)



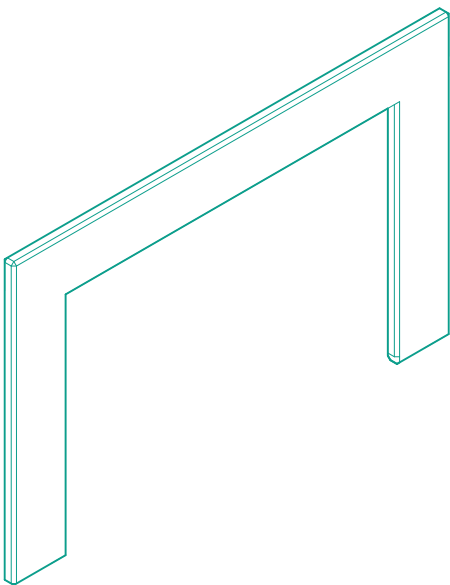
Dimensões	2,2 x 2,2 x 0,2 m
Massa	422 kg
Emissão de CO ₂	110 kg CO ₂
Quantidade	76 u



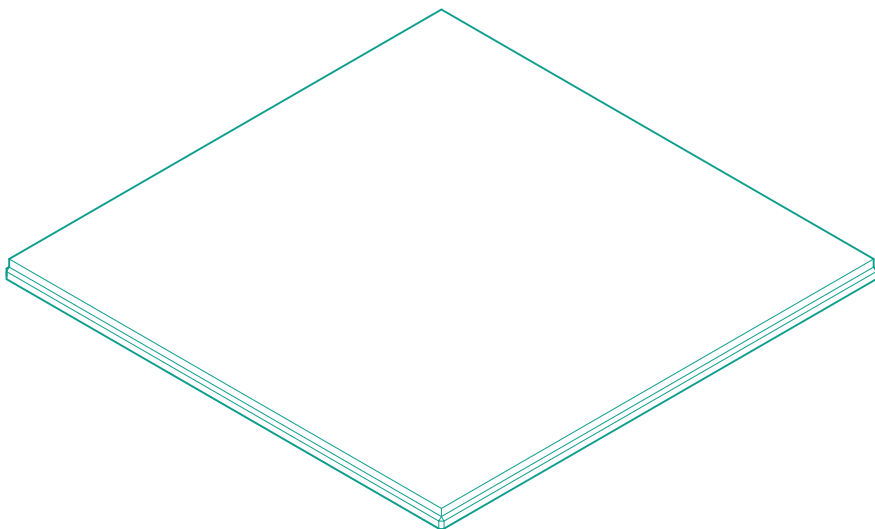
Dimensões	0,12 x 2,2 x 2,8 m
Massa	211 kg
Emissão de CO ₂	55 kg CO ₂
Quantidade	164 u



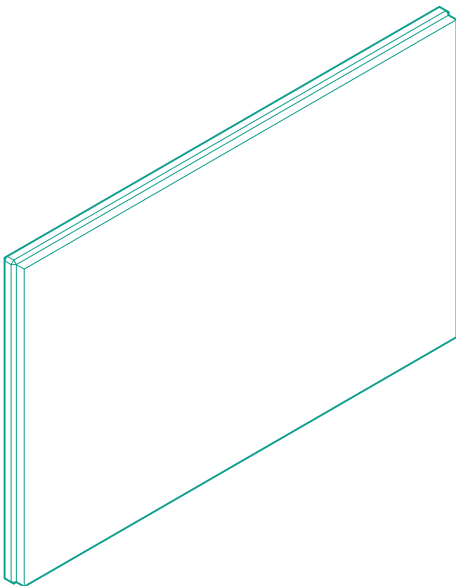
Dimensões	2,2 x 4,4 x 0,2 m
Massa	931 kg
Emissão de CO ₂	243 kg CO ₂
Quantidade	144 u



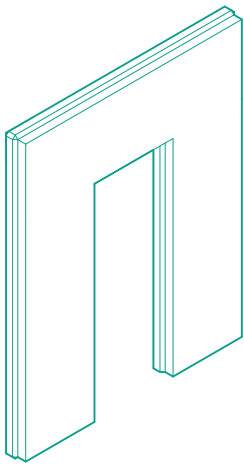
Dimensões	0,12 x 4,4 x 2,8 m
Massa	259 kg
Emissão de CO ₂	67,5 kg CO ₂
Quantidade	128 u



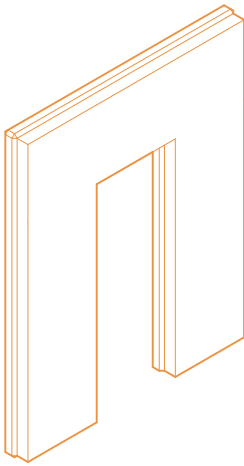
Dimensões	4,4 x 4,4 x 0,2 m
Massa	1 872 kg
Emissão de CO ₂	488 kg CO ₂
Quantidade	59 u



Dimensões	0,2 x 4,4 x 2,8 m
Massa	1 176 kg
Emissão de CO ₂	306 kg CO ₂
Quantidade	34 u



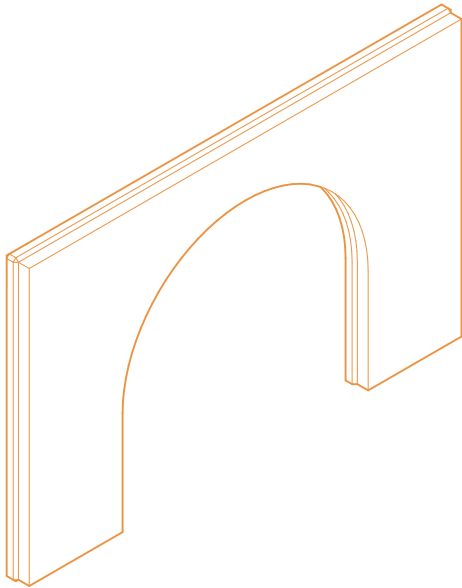
Dimensões	0,2 x 2,2 x 2,8 m
Massa	528 kg
Emissão de CO ₂	138 kg CO ₂
Quantidade	44 u



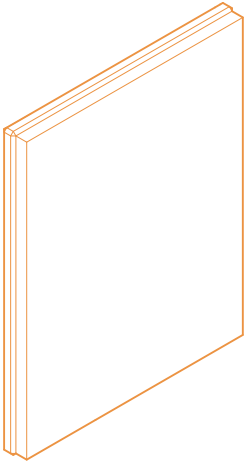
Dimensões	0,23 x 2,2 x 2,8 m
Massa	2 166 kg
Emissão de CO ₂	251 kg CO ₂
Quantidade	6 u



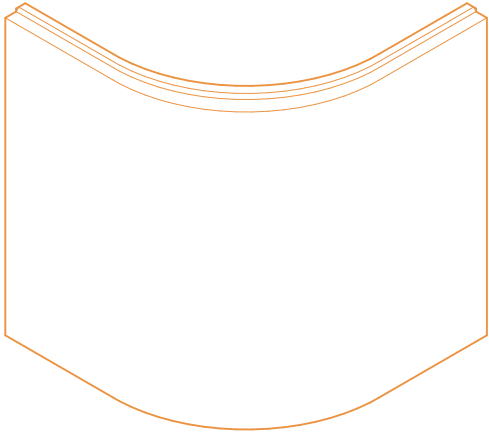
Dimensões	0,12 x 0,3 x 2,8 m
Massa	48 kg
Emissão de CO ₂	12,5 kg CO ₂
Quantidade	44 u



Dimensões	0,23 x 4,4 x 2,8 m
Massa	2 337 kg
Emissão de CO ₂	271 kg CO ₂
Quantidade	110 u

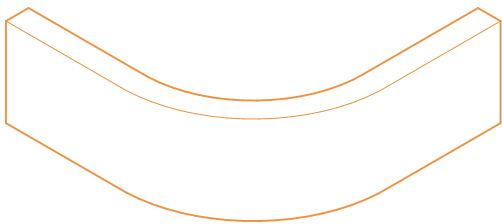


Dimensões	0,23 x 2,2 x 2,8 m
Massa	2 660 kg
Emissão de CO ₂	308 kg CO ₂
Quantidade	16 u

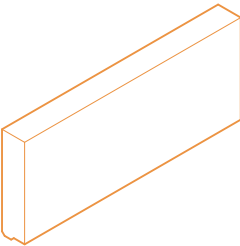


Dimensões	2,2 x 2,2 x 2,8 m
Massa	5 092 kg
Emissão de CO ₂	590 kg CO ₂
Quantidade	76 u

Figura 110 — Catálogo de peças usadas. (1:50)



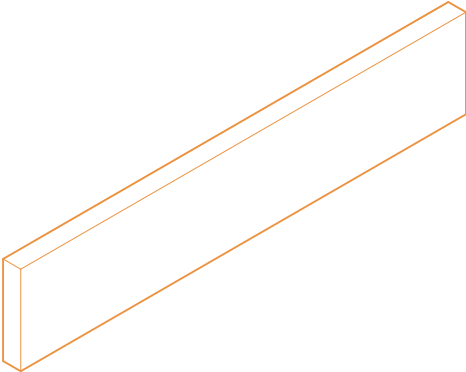
Dimensões	2,2 x 2,2 x 0,9 m
Massa	1 672 kg
Emissão de CO ₂	194 kg CO ₂
Quantidade	10 u



Dimensões	0,23 x 2,2 x 0,9 m
Massa	855 kg
Emissão de CO ₂	99 kg CO ₂
Quantidade	2 u



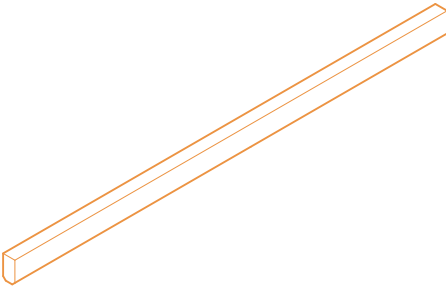
Dimensões	2,2 x 2,2 x 0,12 m
Massa	228 kg
Emissão de CO ₂	26 kg CO ₂
Quantidade	76 u



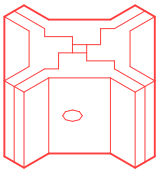
Dimensões	0,23 x 4,4 x 0,9 m
Massa	1 710 kg
Emissão de CO ₂	198 kg CO ₂
Quantidade	24 u



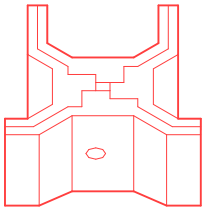
Dimensões	0,15 x 0,12 x 2,8 m
Massa	95 kg
Emissão de CO ₂	11 kg CO ₂
Quantidade	208 u



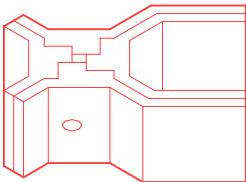
Dimensões	0,23 x 4,4 x 0,12 m
Massa	228 kg
Emissão de CO ₂	26 kg CO ₂
Quantidade	110 u



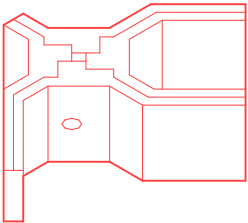
Dimensões	0,16 x 0,16 x 0,1 m
Massa	4,32 kg
Emissão de CO ₂	2,2 kg CO ₂
Quantidade	576 u



Dimensões	0,45 x 0,25 x 0,1 m
Massa	8,1 kg
Emissão de CO ₂	4,1 kg CO ₂
Quantidade	152 u



Dimensões	0,16 x 0,25 x 0,1 m
Massa	5,4 kg
Emissão de CO ₂	2,7 kg CO ₂
Quantidade	720 u



Dimensões	0,22 x 0,25 x 0,1 m
Massa	5,7 kg
Emissão de CO ₂	2,8 kg CO ₂
Quantidade	54 u

Lisboa

O segundo laboratório de experimentação do sistema construtivo proposto é implantado em Lisboa — uma cidade marcada por uma morfologia urbana densa, um clima mediterrânico caracterizado por verões quentes e secos e invernos suaves, e por assimetrias socioeconómicas particularmente evidentes nas franjas da malha consolidada. A zona escolhida situa-se na coroa norte da cidade, num tecido urbano fragmentado, parcialmente descaracterizado, onde subsistem pequenas indústrias artesanais e habitações precárias, muitas delas fora do quadro regulamentar formal. Este contexto oferece condições especialmente desafiantes para a experimentação do sistema proposto, pela complexidade funcional e social do lugar, bem como pela oportunidade de intervir num território em transição.

Ao contrário do laboratório de Copenhaga, onde o foco recai sobre a adaptação do sistema a uma malha histórica consolidada, aqui o objectivo é validar a capacidade do modelo construtivo em promover a regeneração urbana através da industrialização local. Para tal, a primeira operação é a instalação de uma unidade fabril, ocupando o sector ainda livre da malha. Esta fábrica, concebida com o mesmo sistema construtivo que irá produzir, é pensada como estrutura reversível e desmontável, funcionando simultaneamente como elemento produtivo e como protótipo funcional.

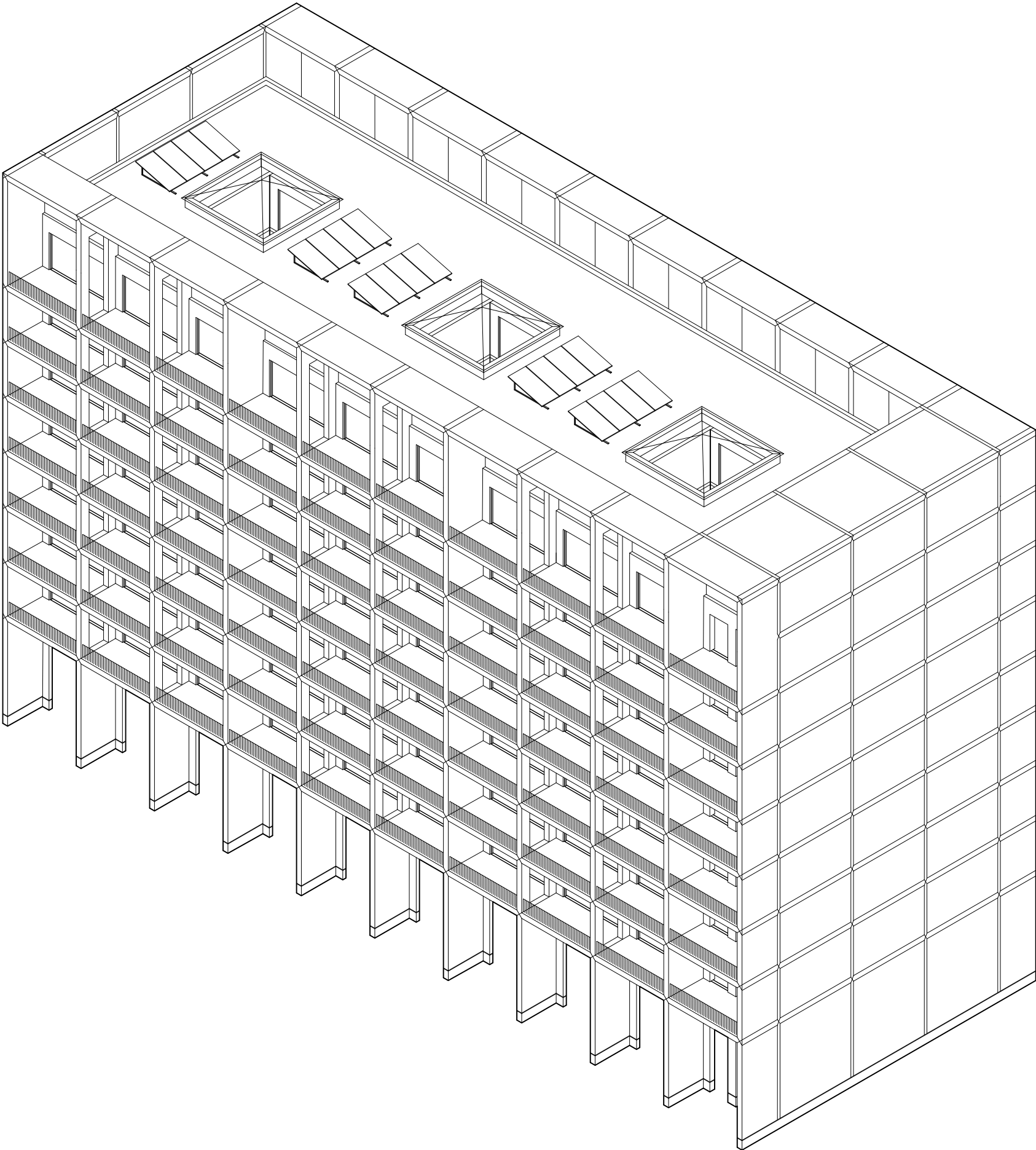
A instalação desta unidade fabril serve como motor para a articulação com as pequenas indústrias locais existentes, que passam a ser integradas numa rede produtiva mais qualificada. Em vez de erradicar o tecido industrial pré-existente, a proposta procura capacitá-lo, oferecendo infraestruturas e *know-how* para transitar de práticas informais e obsoletas para processos industriais mais eficientes, controlados e sustentáveis. Este processo inclui formação de trabalhadores, adaptação de oficinas e reconfiguração das lógicas de produção, colocando o sistema proposto ao serviço de uma estratégia de desenvolvimento territorial.

Paralelamente à implantação da unidade fabril, desenvolve-se uma nova zona de indústrias qualificadas, composta por edifícios híbridos que integram, nas suas coberturas, habitação e espaço público acessível. Esta configuração permite testar a capacidade do sistema se adaptar a usos mistos, articulando diferentes programas funcionais num mesmo corpo arquitetónico, sem comprometer a coerência estrutural. A sobreposição entre funções produtivas e habitacionais, só é possível devido à diferença de cotas topográficas que permitem criar um jardim contínuo que se estende por cima das indústrias, isto constitui um teste fundamental ao comportamento acústico, térmico e estrutural dos painéis, bem como à sua capacidade de responder a diferentes exigências normativas dentro de uma mesma unidade compositiva.

Com o avanço da operação, inicia-se o processo de desativação progressiva das estruturas industriais e habitacionais precárias existentes. Este realojamento, feito com base em fases coordenadas, liberta o solo para a criação de um novo espaço público de grande escala — um campo aberto, infraestruturado, equipado, e que serve simultaneamente como catalisador da regeneração urbana e como espaço de teste da integração entre o sistema construtivo proposto e os dispositivos urbanos não edificados. A criação deste espaço público é uma etapa crítica de validação da capacidade do sistema em produzir uma cidade por camadas, onde se cruzam funções, escalas e temporalidades diversas. Além disso, por ser um espaço de conclusão de uma avenida, que futuramente poderá ser uma das vias principais da região, este espaço ganha uma importância de remate dos espaços públicos que possam vir a surgir ao longo da mesma.

A vocação da fábrica, uma vez concluída a intervenção, é deliberadamente indefinida. A sua estrutura, baseada nos princípios de desmontabilidade e reversibilidade, permite duas trajetórias possíveis: pode ser desmantelada e transferida para um novo contexto, reiniciando o ciclo produtivo noutra área carenciada, ou pode ser permanentemente reprogramada para novos usos de carácter colectivo — biblioteca, mercado, ginásio, centro comunitário — assumindo-se como legado funcional e simbólico do processo de requalificação. Esta indefinição programática é, na verdade, uma oportunidade para testar a versatilidade e a resiliência do sistema em ciclos de vida distintos: o produtivo, o habitacional e o cívico.

O laboratório de Lisboa, mais do que demonstrar a eficiência técnica do sistema, permite avaliar a sua eficácia estratégica: a capacidade de operar como agente de transformação urbana e social, de gerar emprego local qualificado, de promover práticas sustentáveis em territórios marginais e de propor uma nova abordagem à industrialização da arquitetura — não centrada na homogeneidade formal, mas na adaptabilidade territorial, na modularidade operativa e na inteligência ambiental.



Autor	Renato Sobral
Construtora	—
Programa	Habitação Coletiva
Sistema	Novo sistema

Área	840 m ²
Custo de Obra	—
Tempo de Montagem	—
Numero de Exemplares	13

Figura 112 — Imagem do projeto de Lisboa. (1:250)





Figura 113 — Ortofoto do projeto de Lisboa. (1:2500)



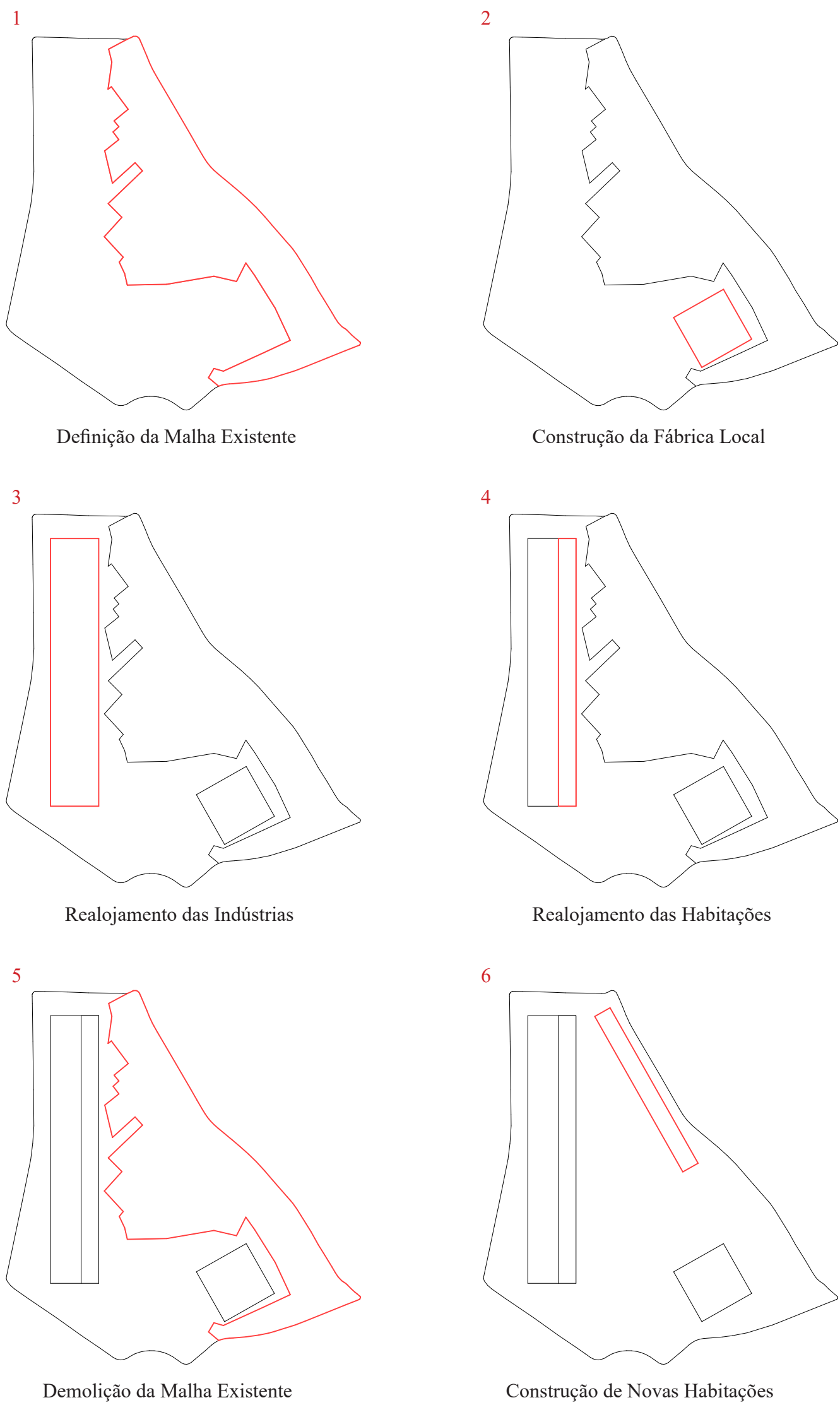
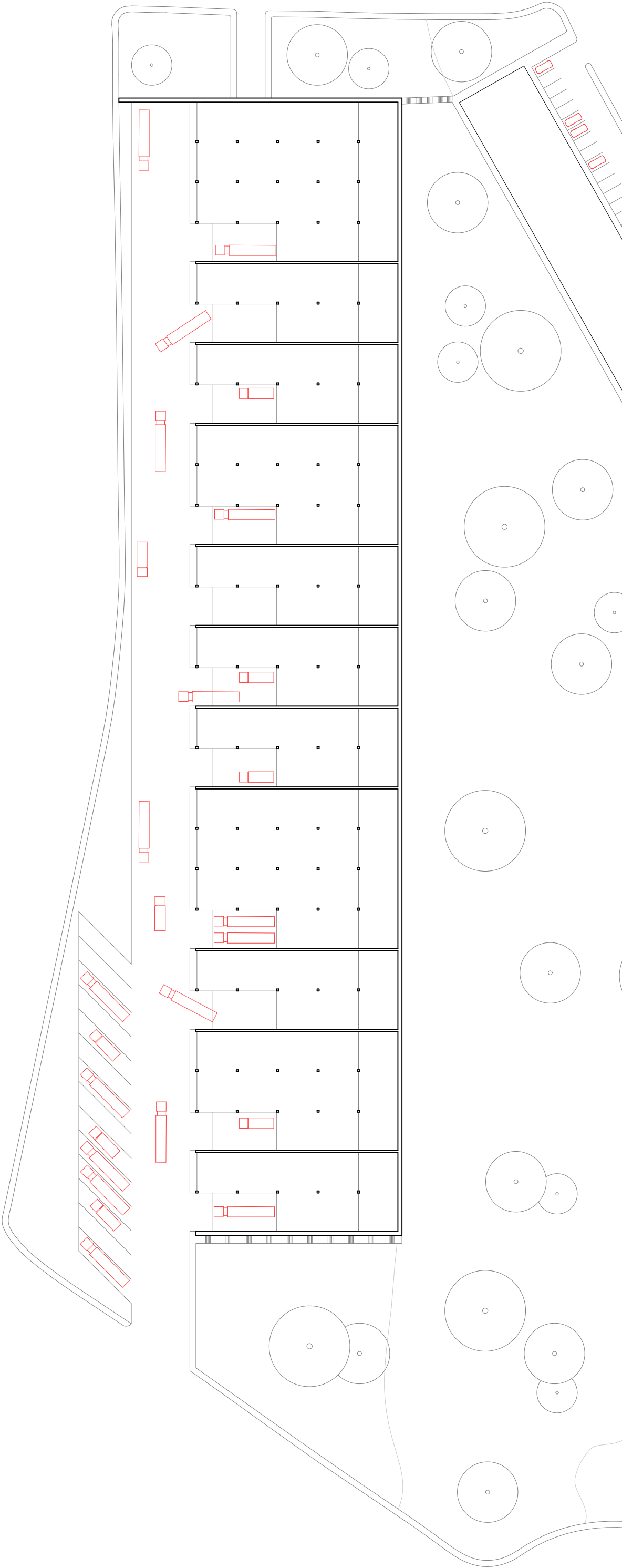


Figura 115 — Estratégia de implantação do projeto.

- Projeto
- Malha urbana
- Estradas



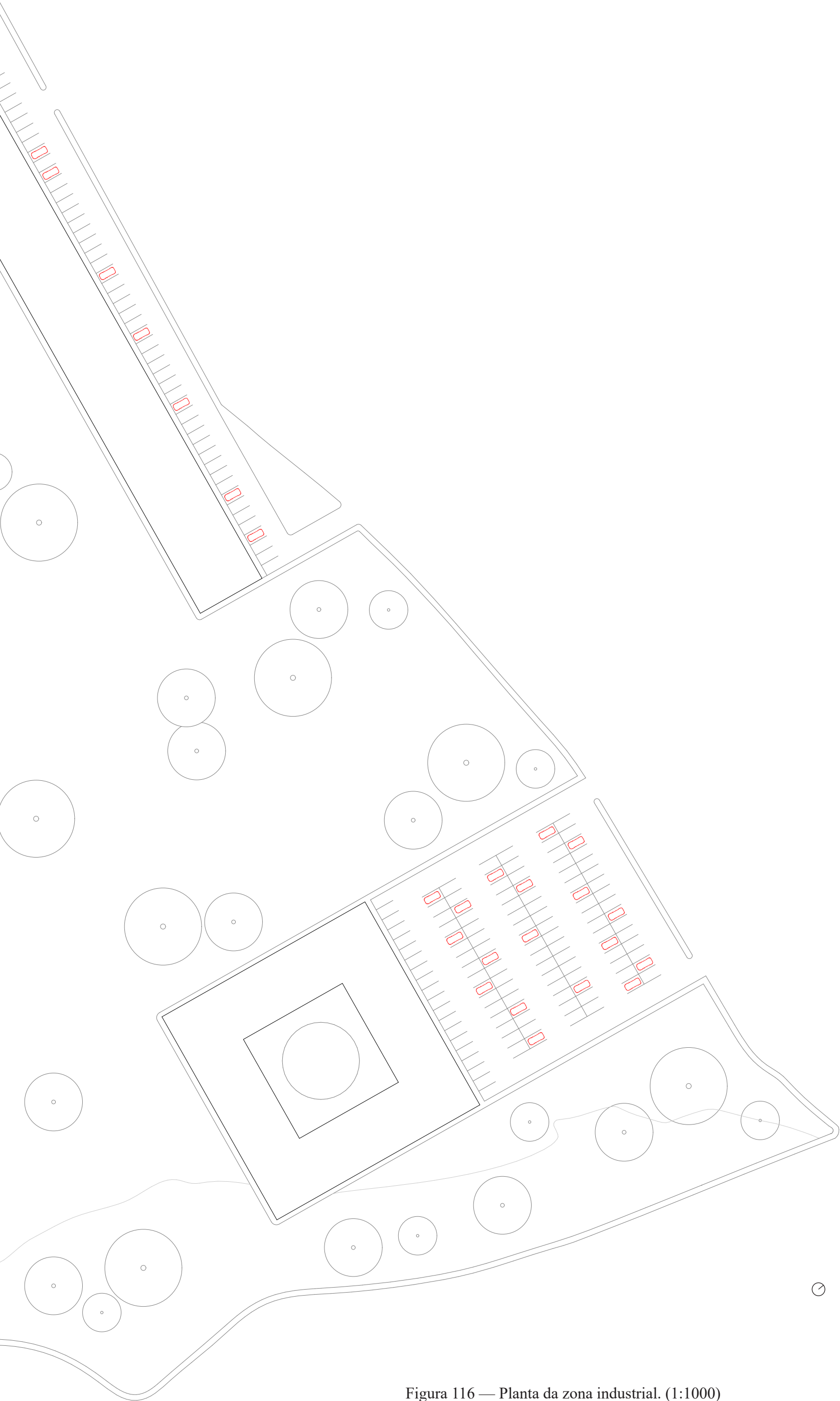
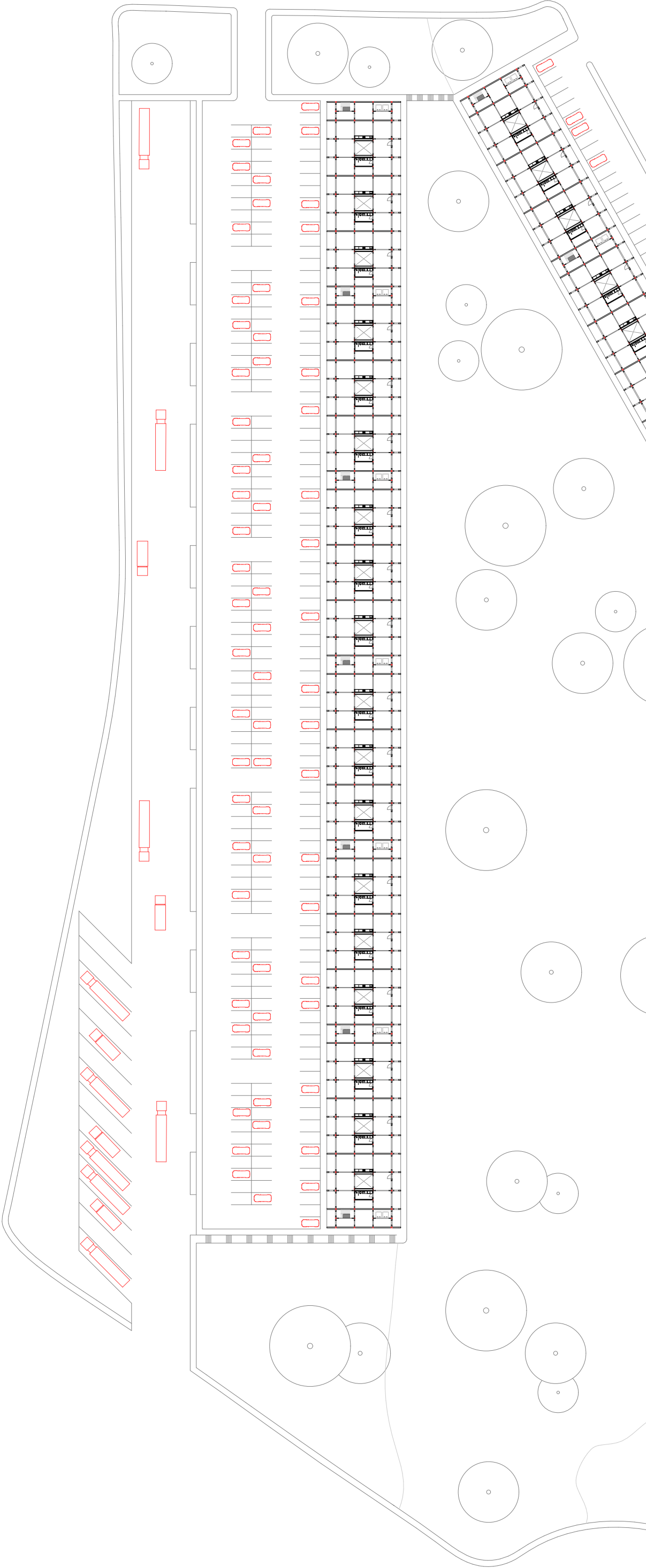
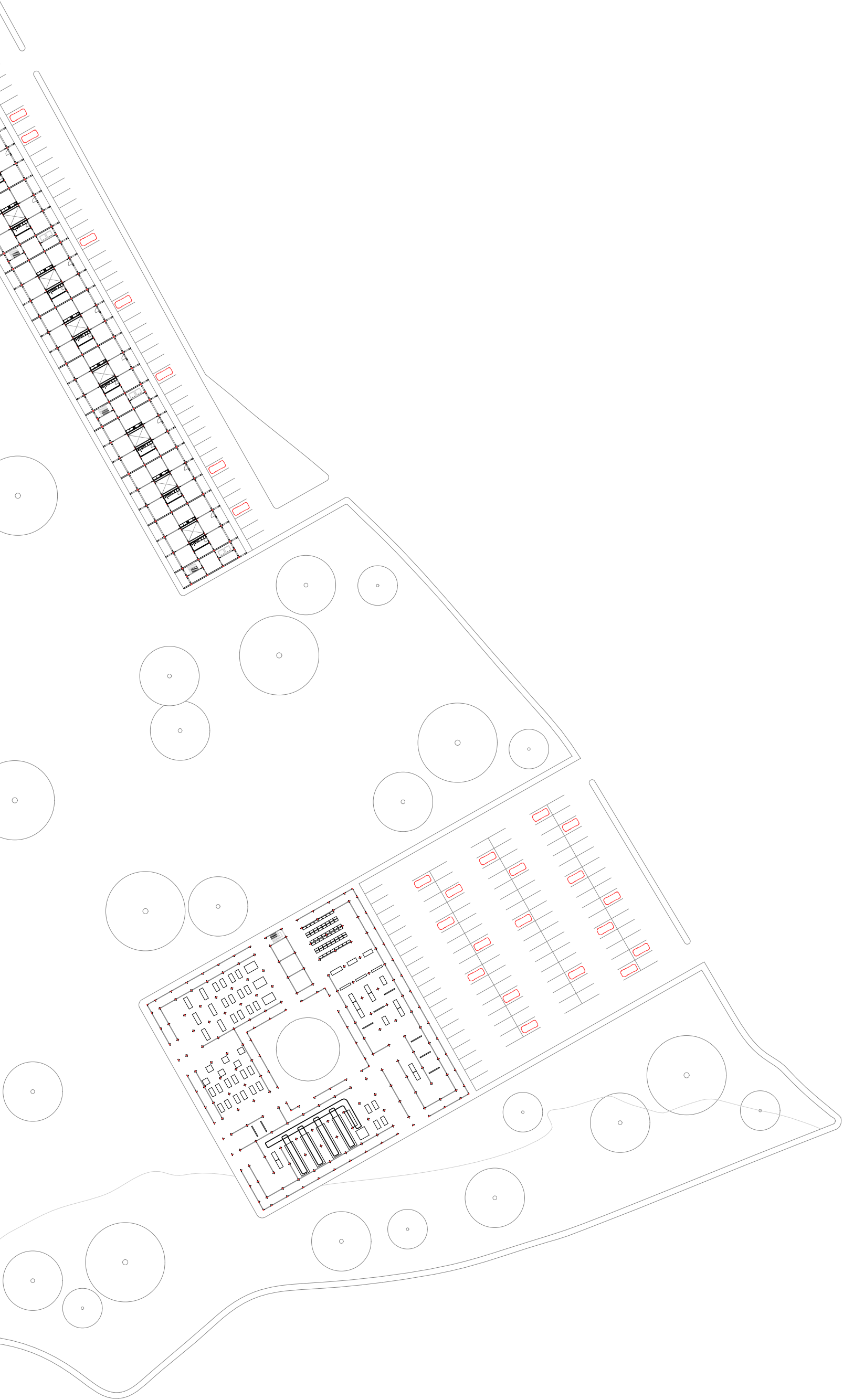


Figura 116 — Planta da zona industrial. (1:1000)

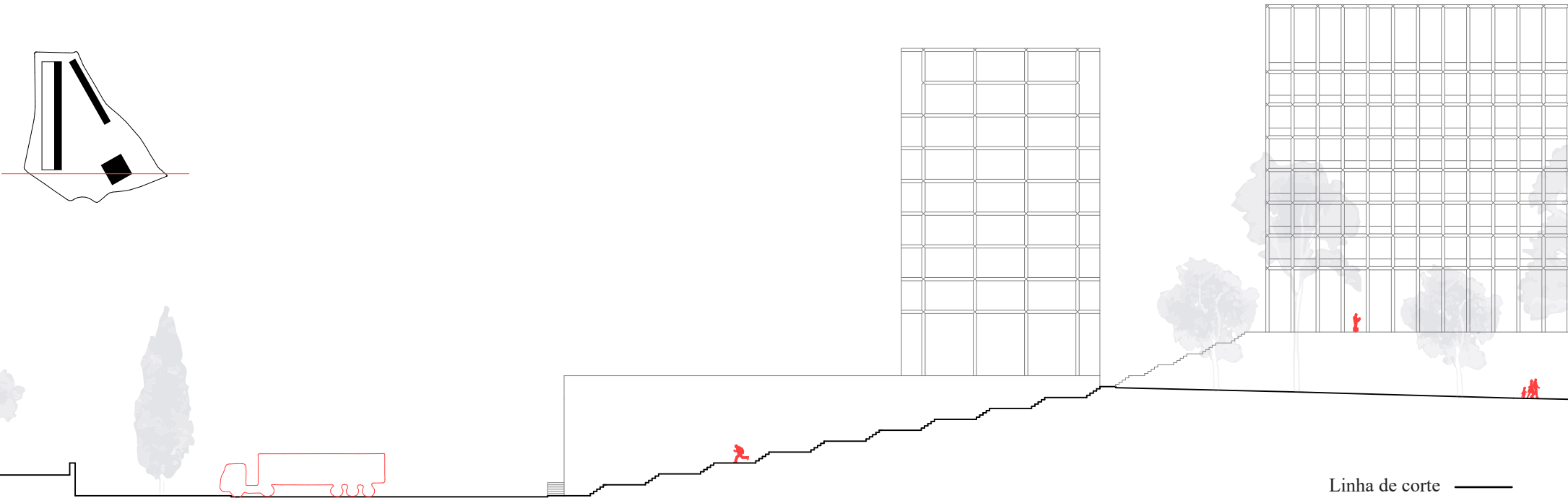
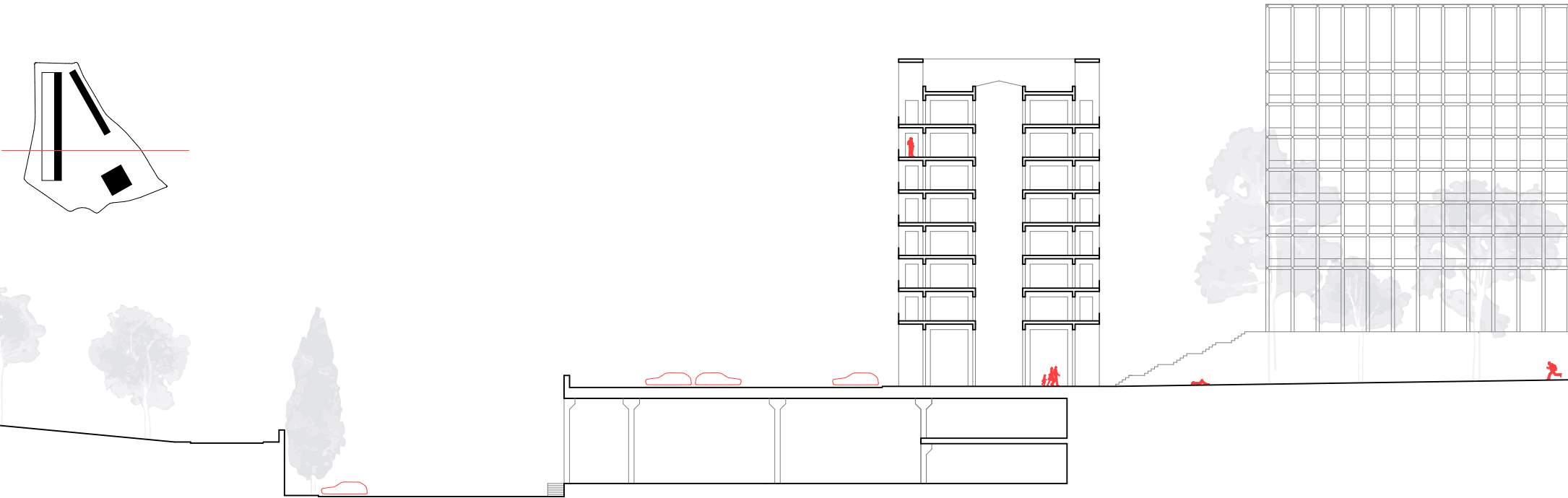
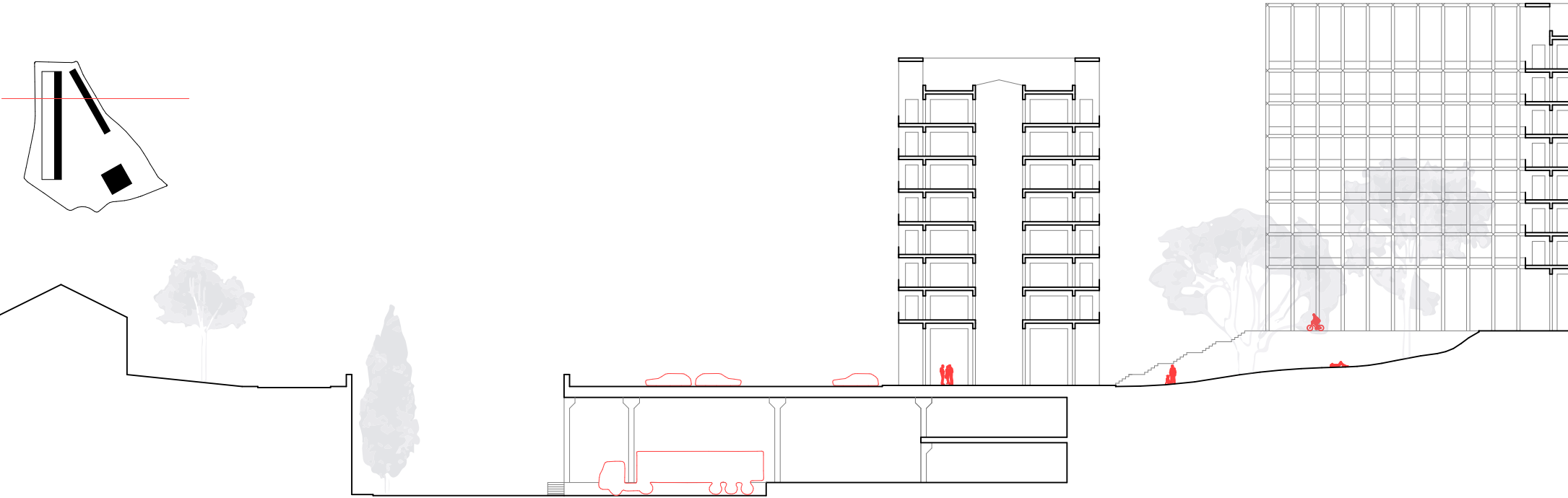
- Projeto
- Malha urbana
- Estradas





50 20 10 0 m

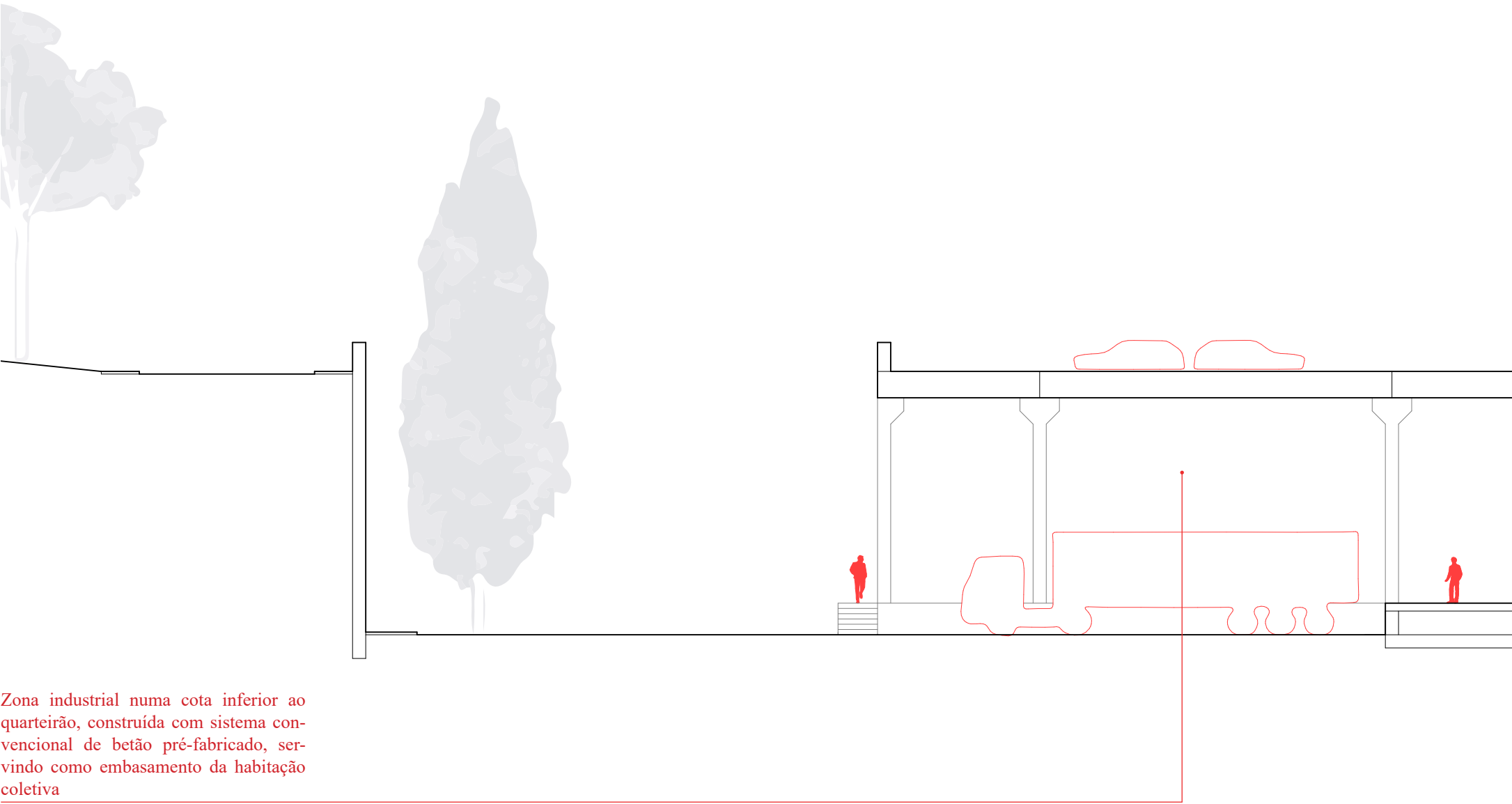
Figura 117 — Planta da zona habitacional. (1:1000)



Linha de corte —
Projeto —
Envolvente —
Reservatório de água —



Figura 118 — Cortes transversais pelo quarteirão. (1:1000)



- Linha de corte
- Projeto
- Envolvente

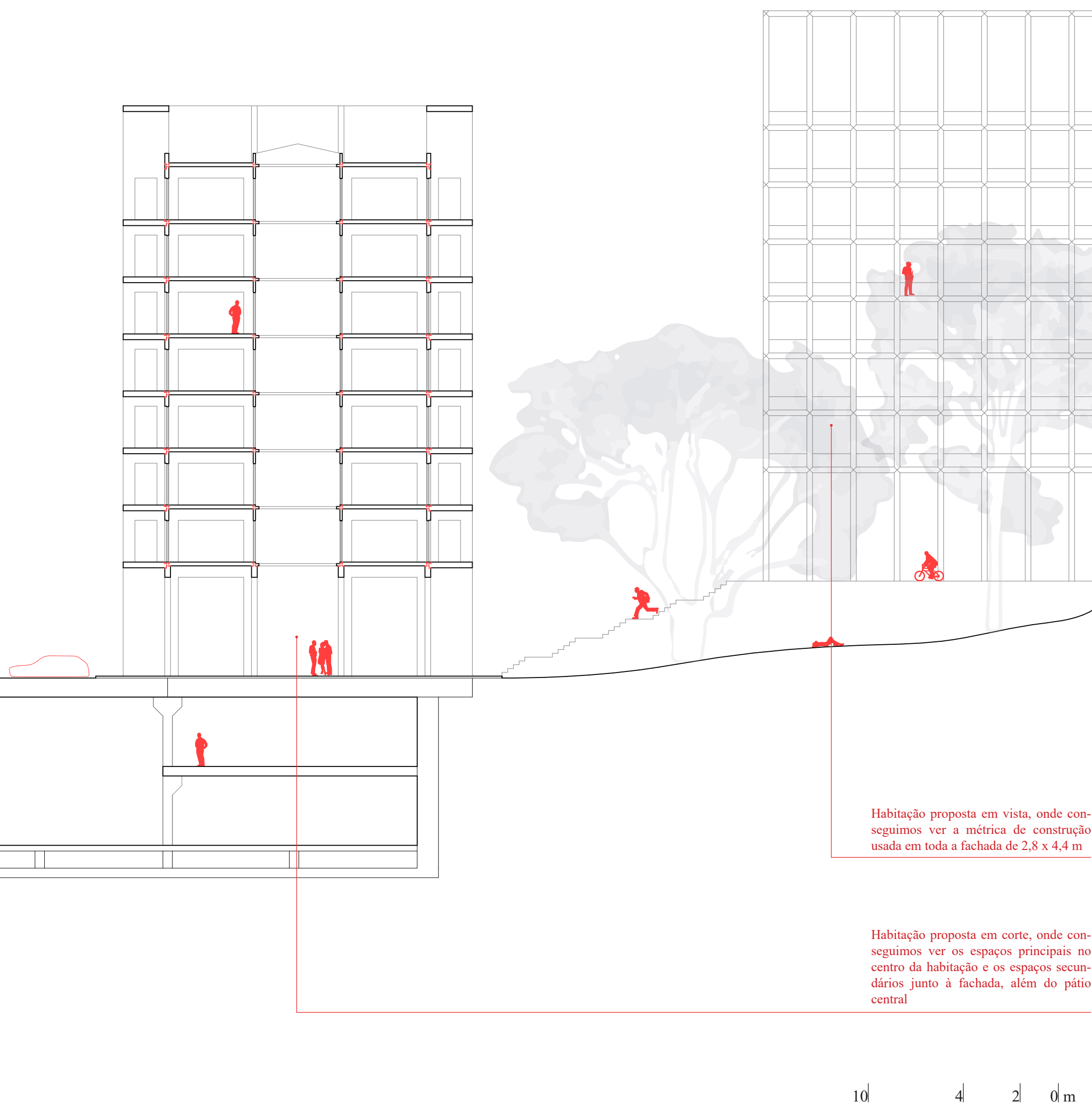


Figura 119 — Corte transversal. (1:200)

Espaços centrais de 4,4 x 4,4 m, idealmente para divisões que necessitem de mais espaço como sala, cozinha e quarto

Espaços envolventes de 4,4 x 2,2 m, usados como varandas privadas

Saguão infraestrutural de apoio à cozinha e casa de banho

Acesso a partir das escadas

Acesso a partir do elevador

- Estrutura
- Módulos
- Pórtico
- Conectores
- Infraestrutura

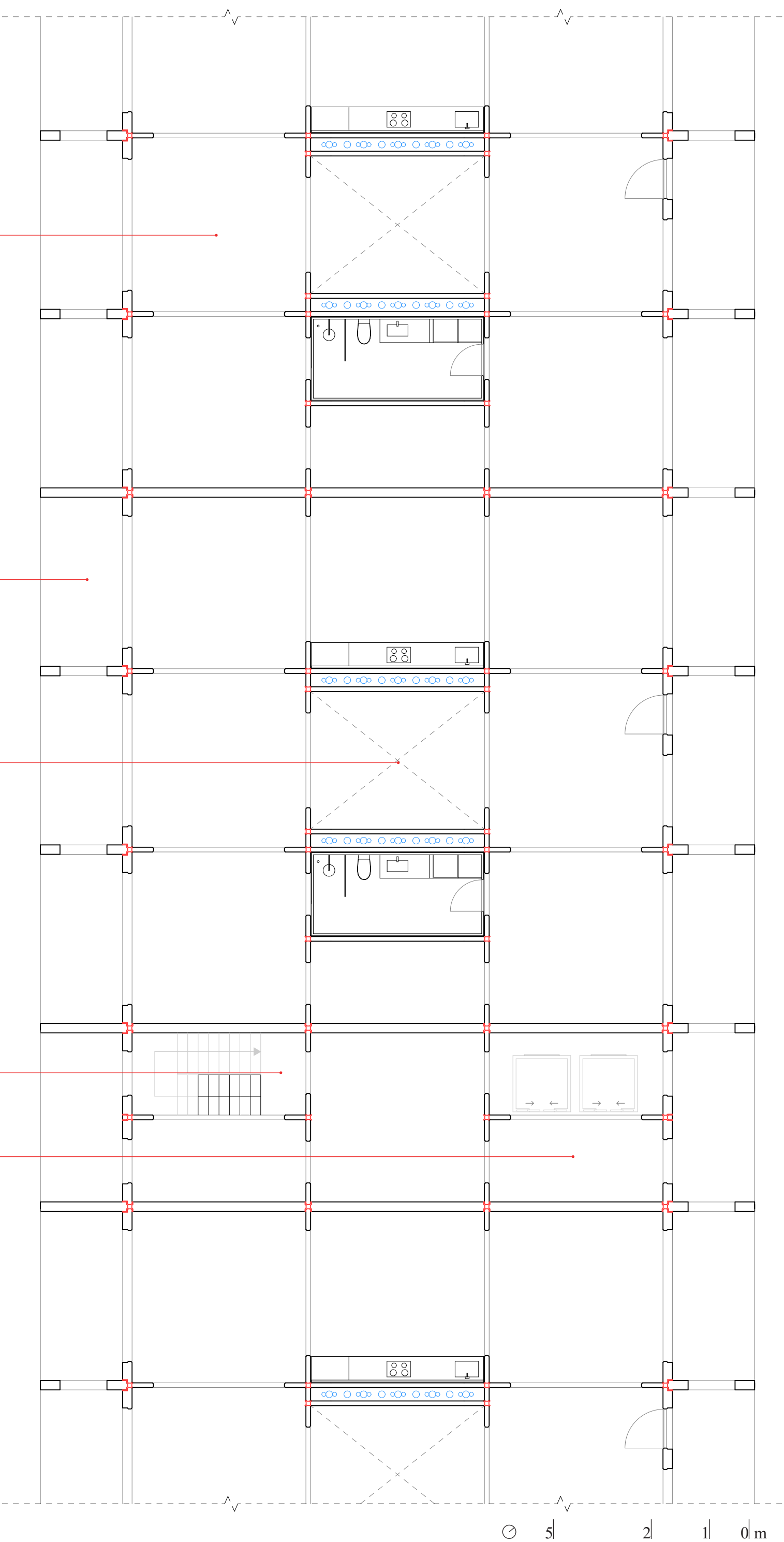


Figura 120 — Planta das tipologias. (1:100)

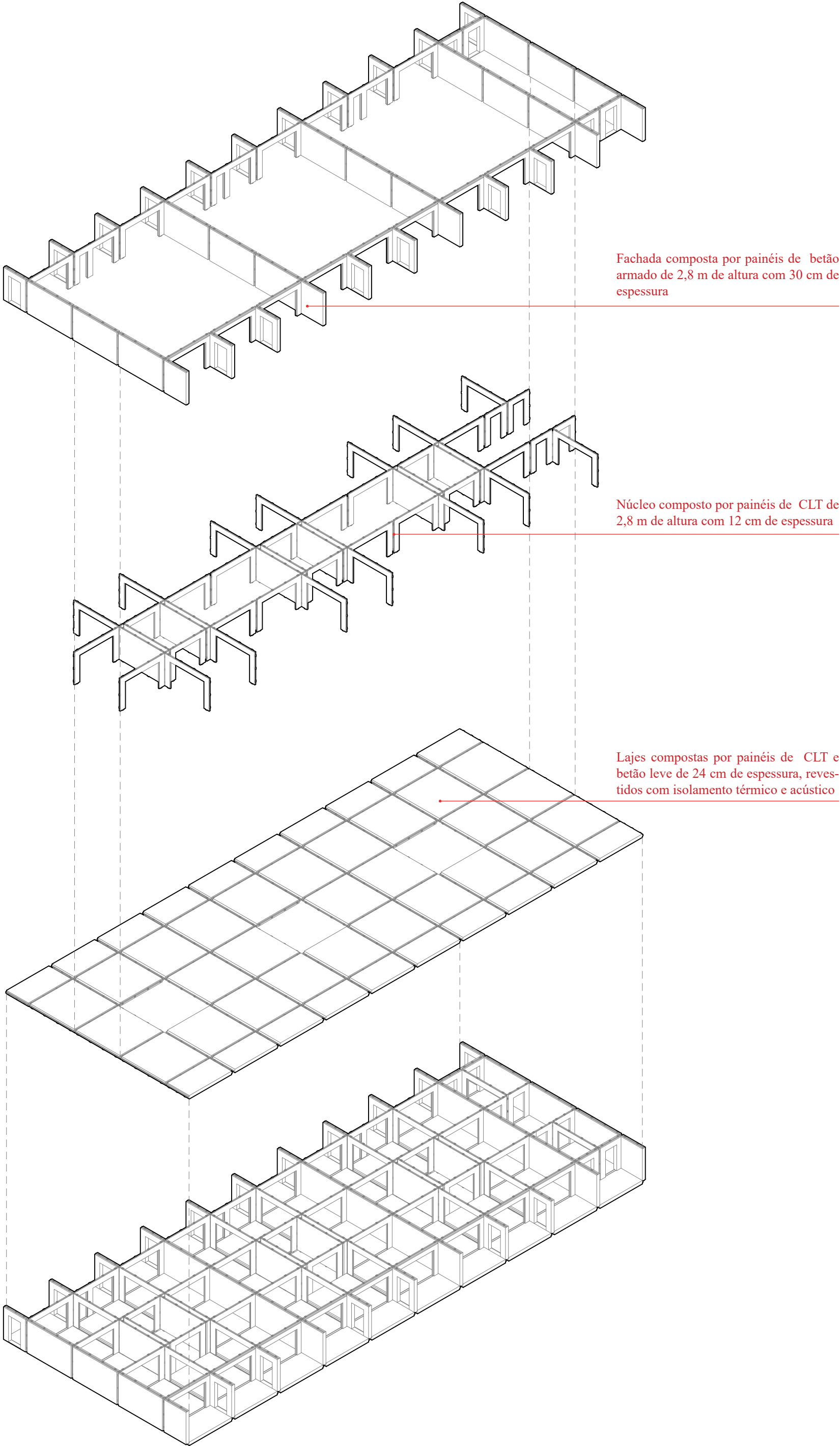
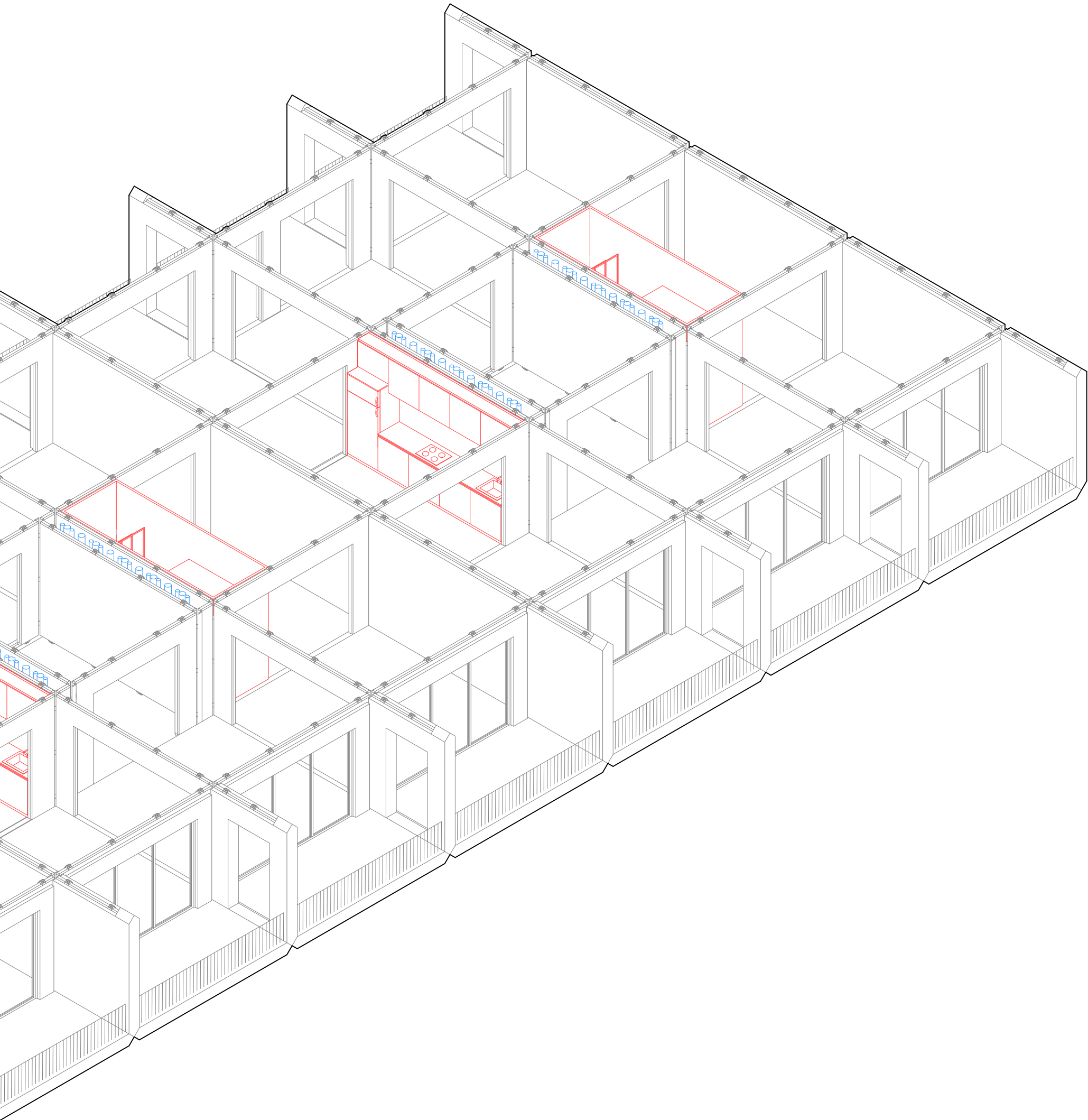


Figura 121 — Isometria explodida das tipologias. (1:300)



Tubo de esgoto 90 mm, destinado a águas sanitárias

Tubo de esgoto 40 mm, destinado a águas residuais

Tubo de água quente ou fria 20 mm, destinado a água potável

Tubo de água do contador 25 mm, destinado a água potável

Saguão infraestruturais com 30 cm de largura, onde passam todas as tubagens necessárias para os módulos

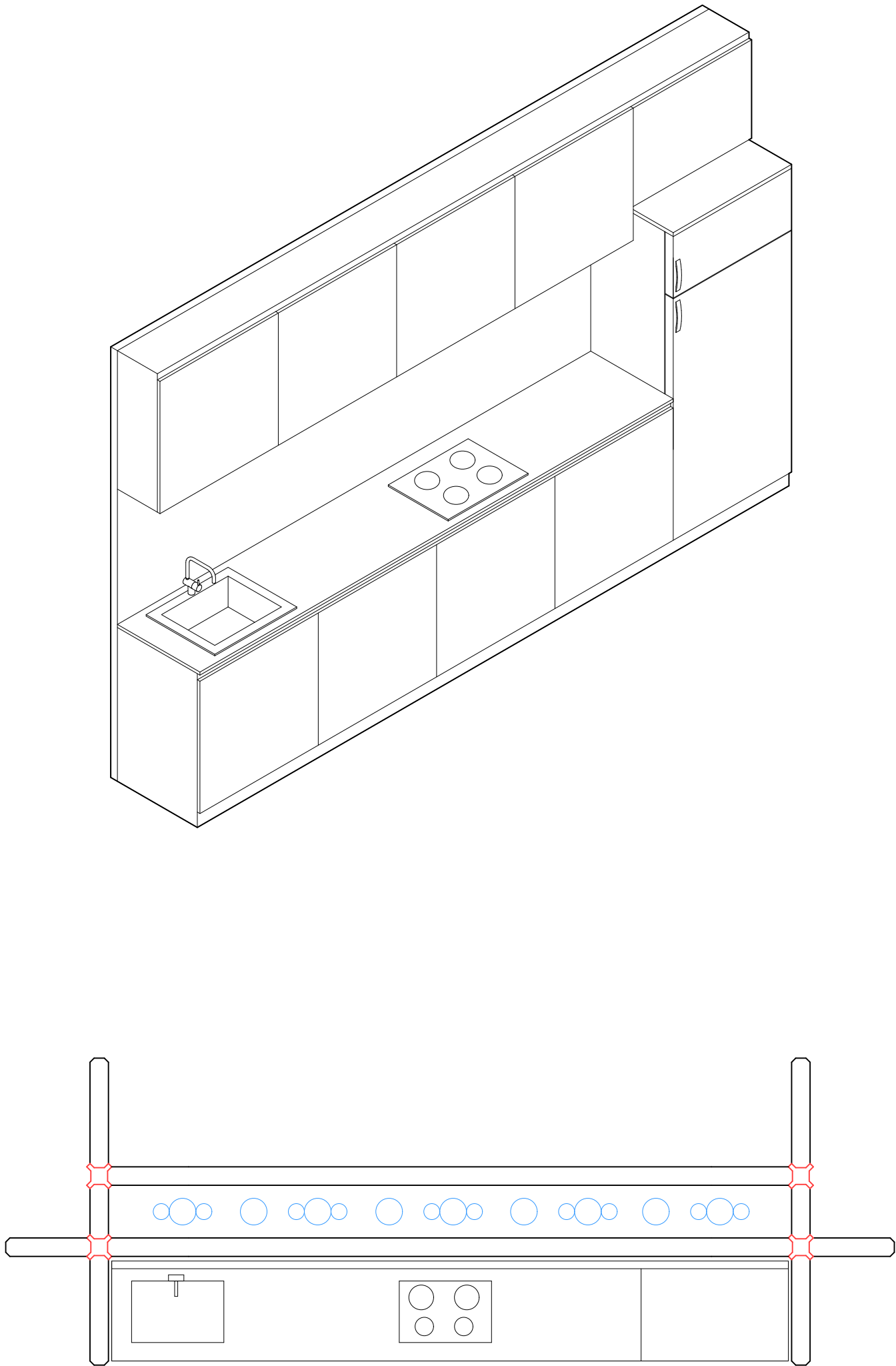
Módulo de cozinha pré-fabricado de 4,4 x 0,65 m, com pré-instalação de tubagem pronta a ser conectada ao painel infraestrutural

Furos pré-feitos para facilitar a montagem e a ligação das tubagens entre o painel e os módulos

Módulo de casa de banho pré-fabricado de 4,4 x 1,6 m, com pré-instalação de tubagem pronta a ser conectada ao painel infraestrutural

Figura 123 — Isometria do saguão e dos módulos. (1:50)

Módulo de cozinha



Módulo de casa de banho

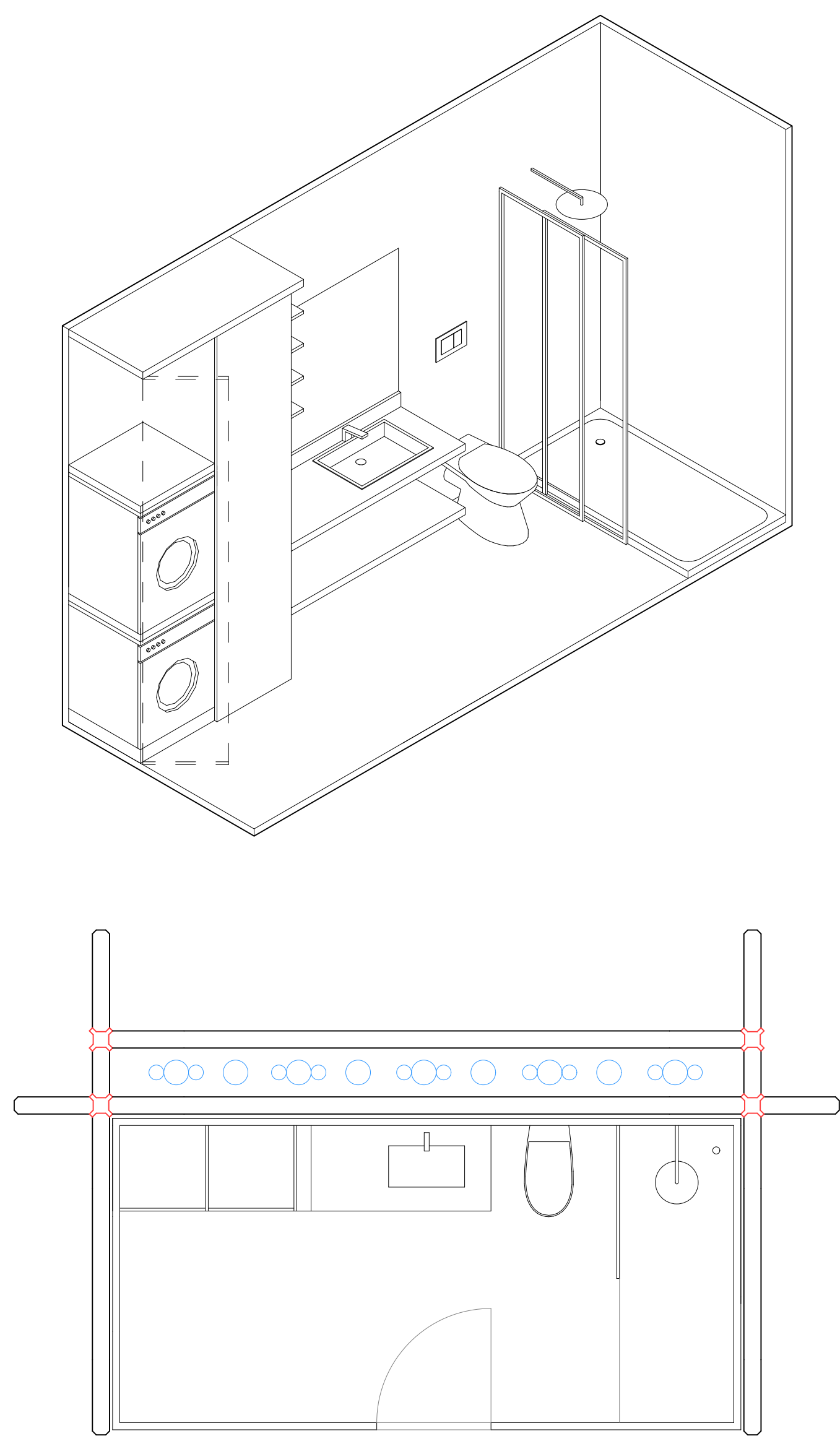
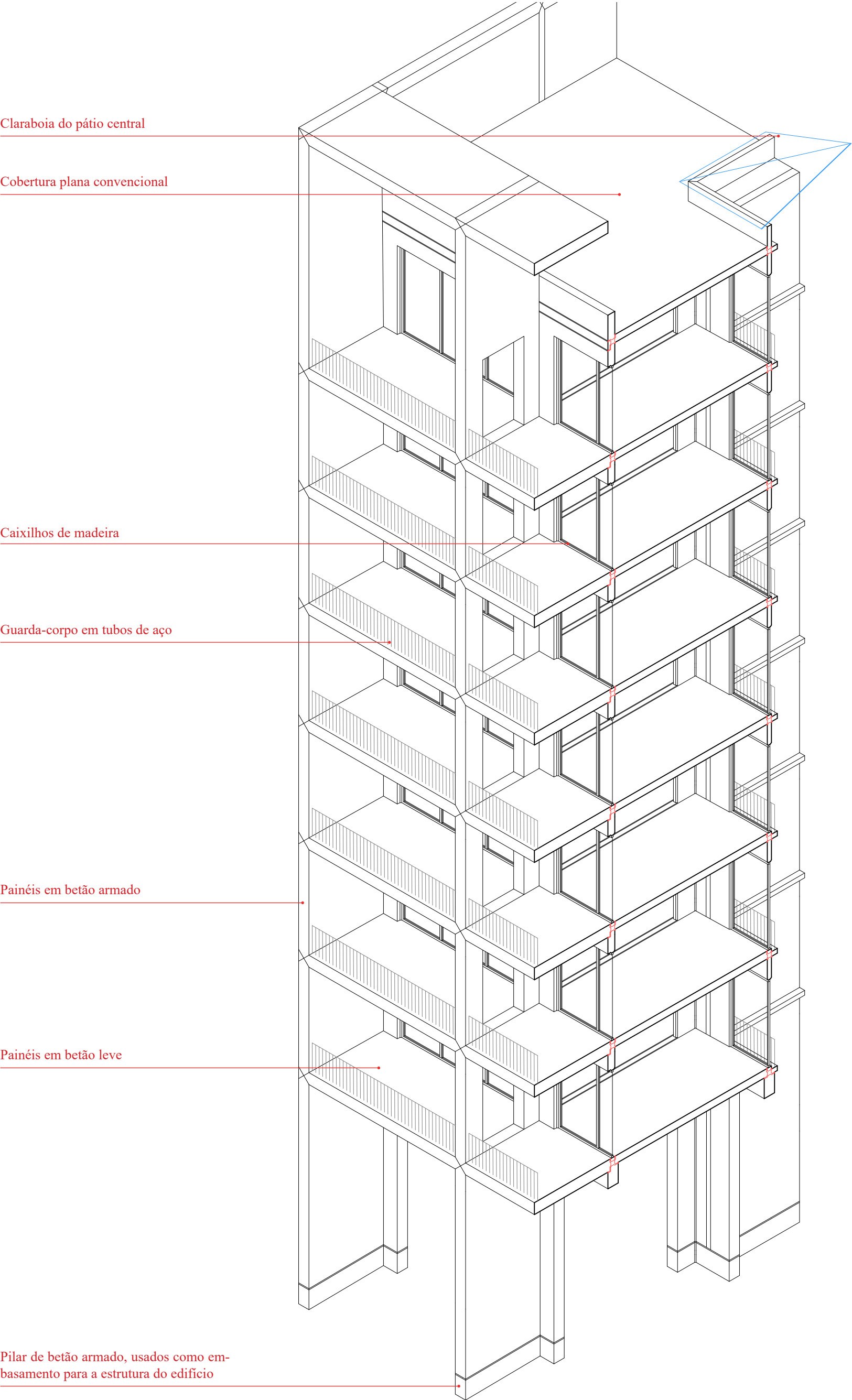


Figura 125 — Módulos pré-fabricados de casa de banho. (1:30)



Claraboia

Cobertura

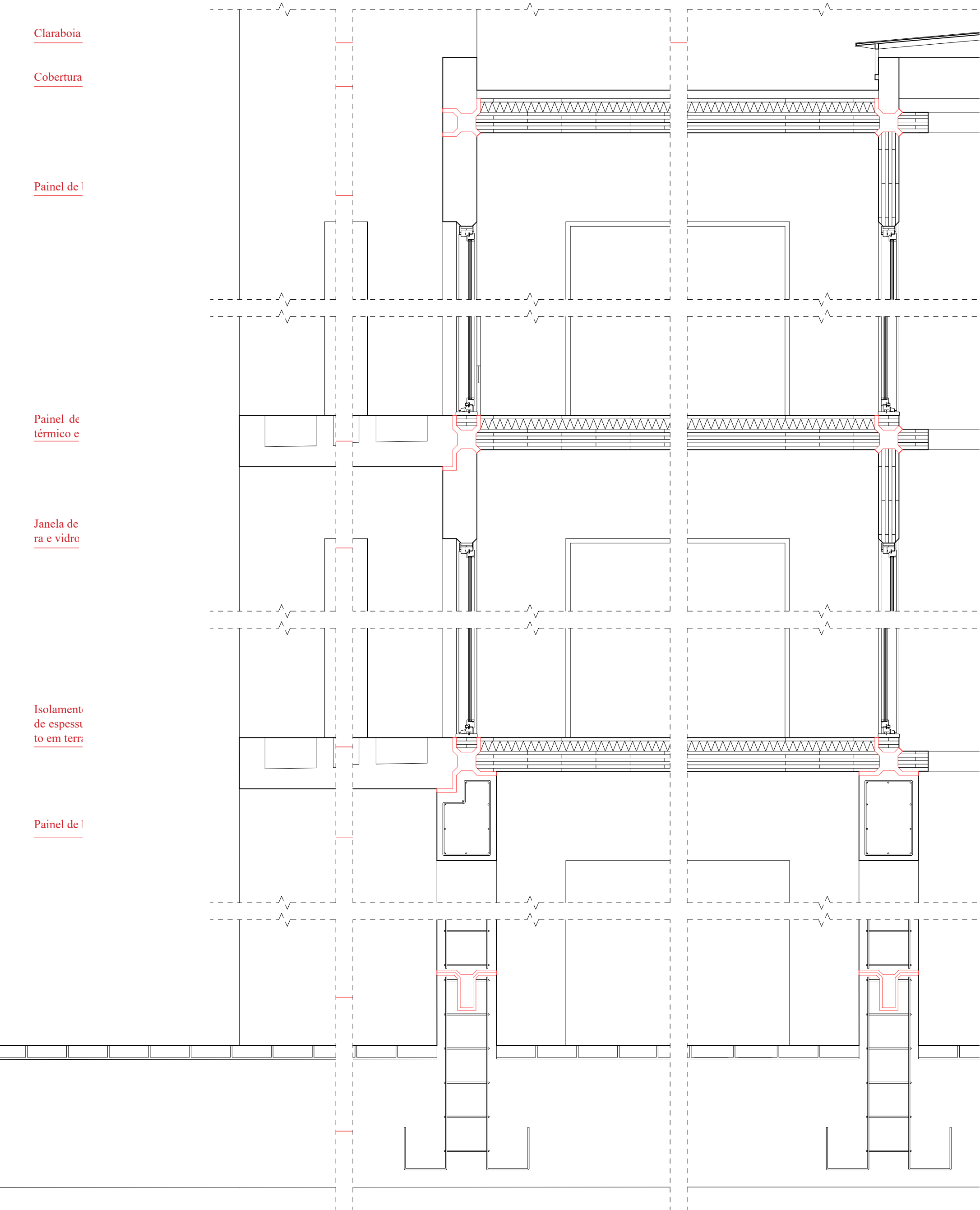
Painel de

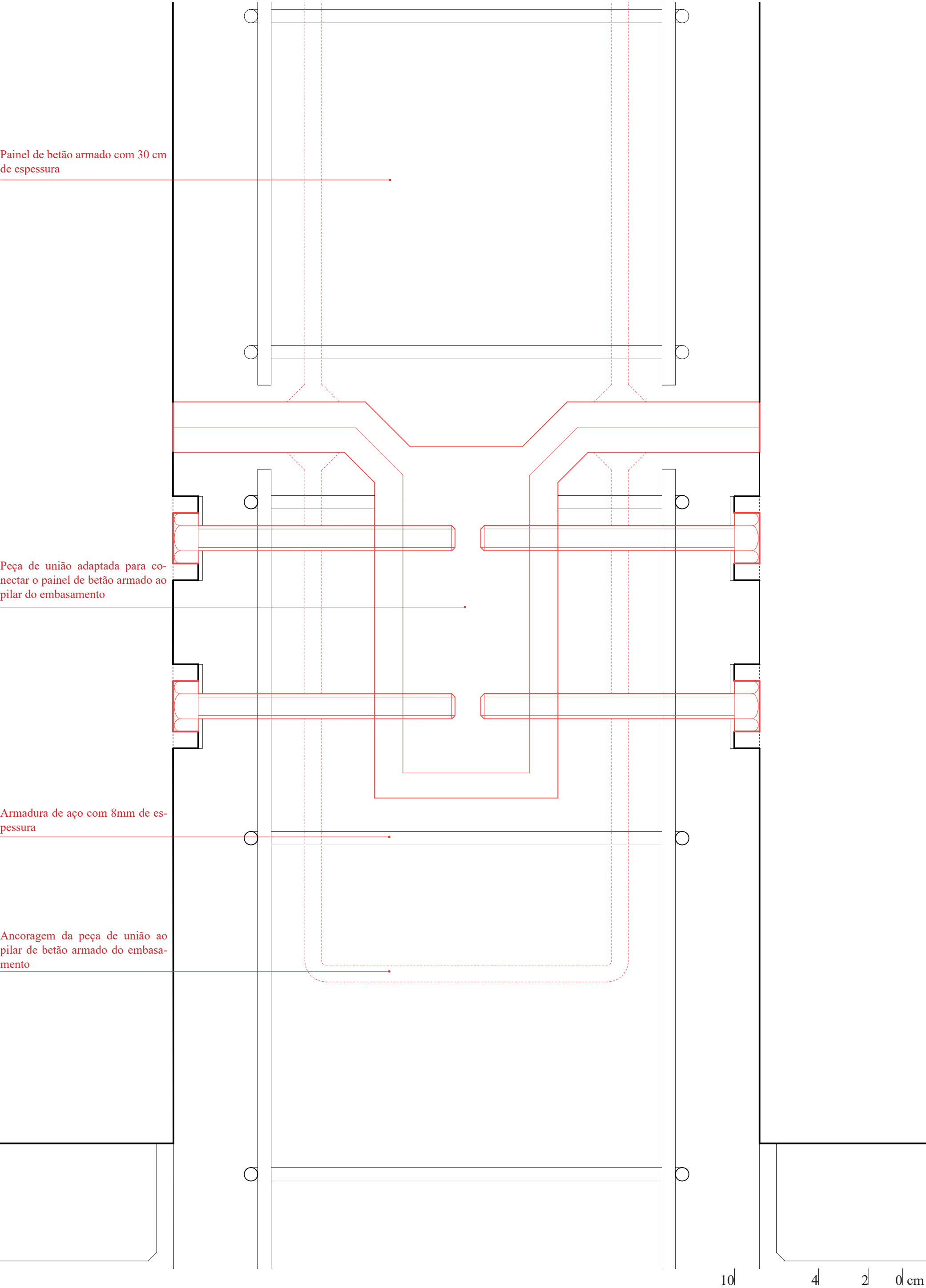
Painel de
térnico e

Janela de
ra e vidro

Isolament
de espess
to em terr

Painel de





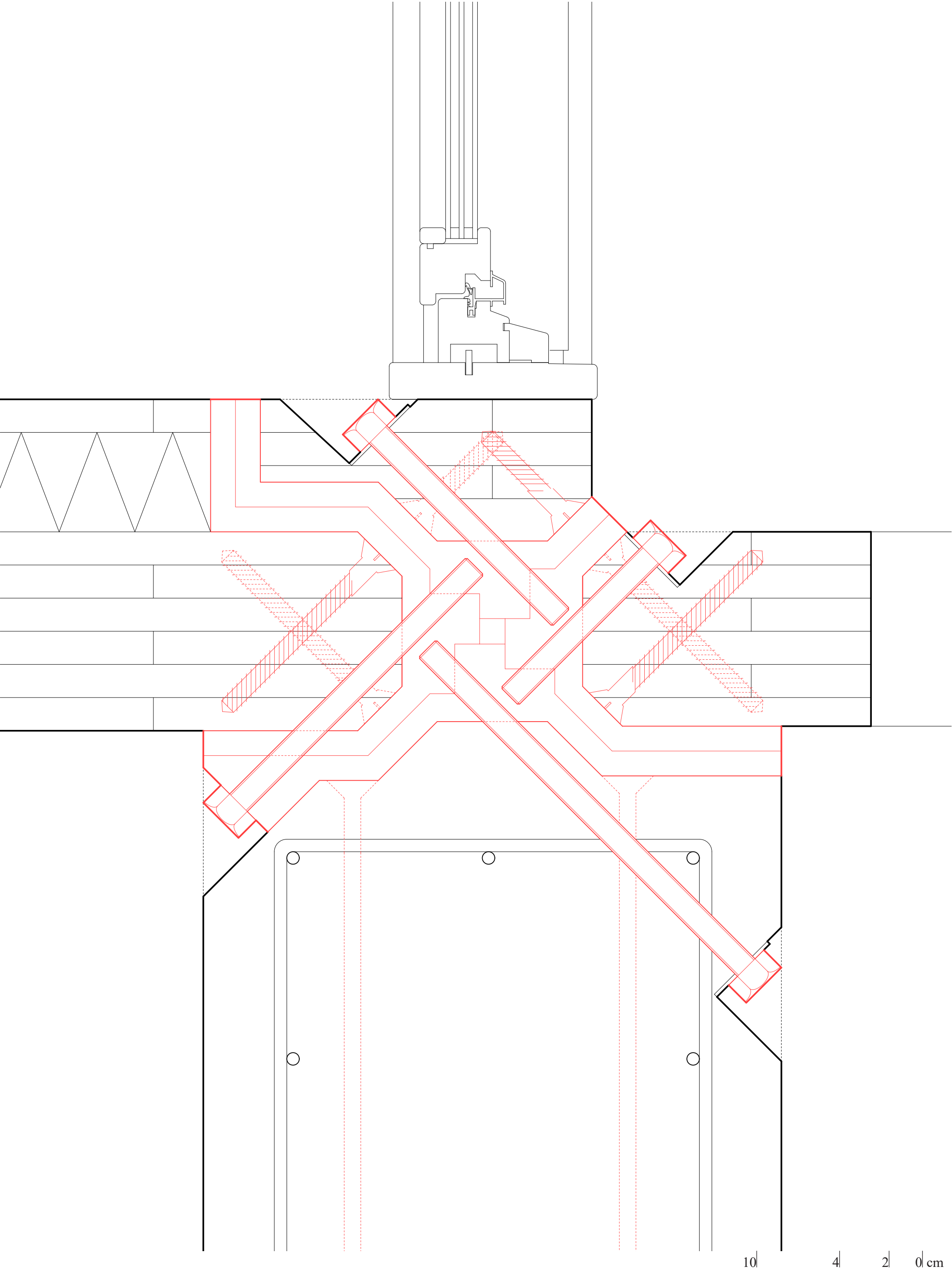
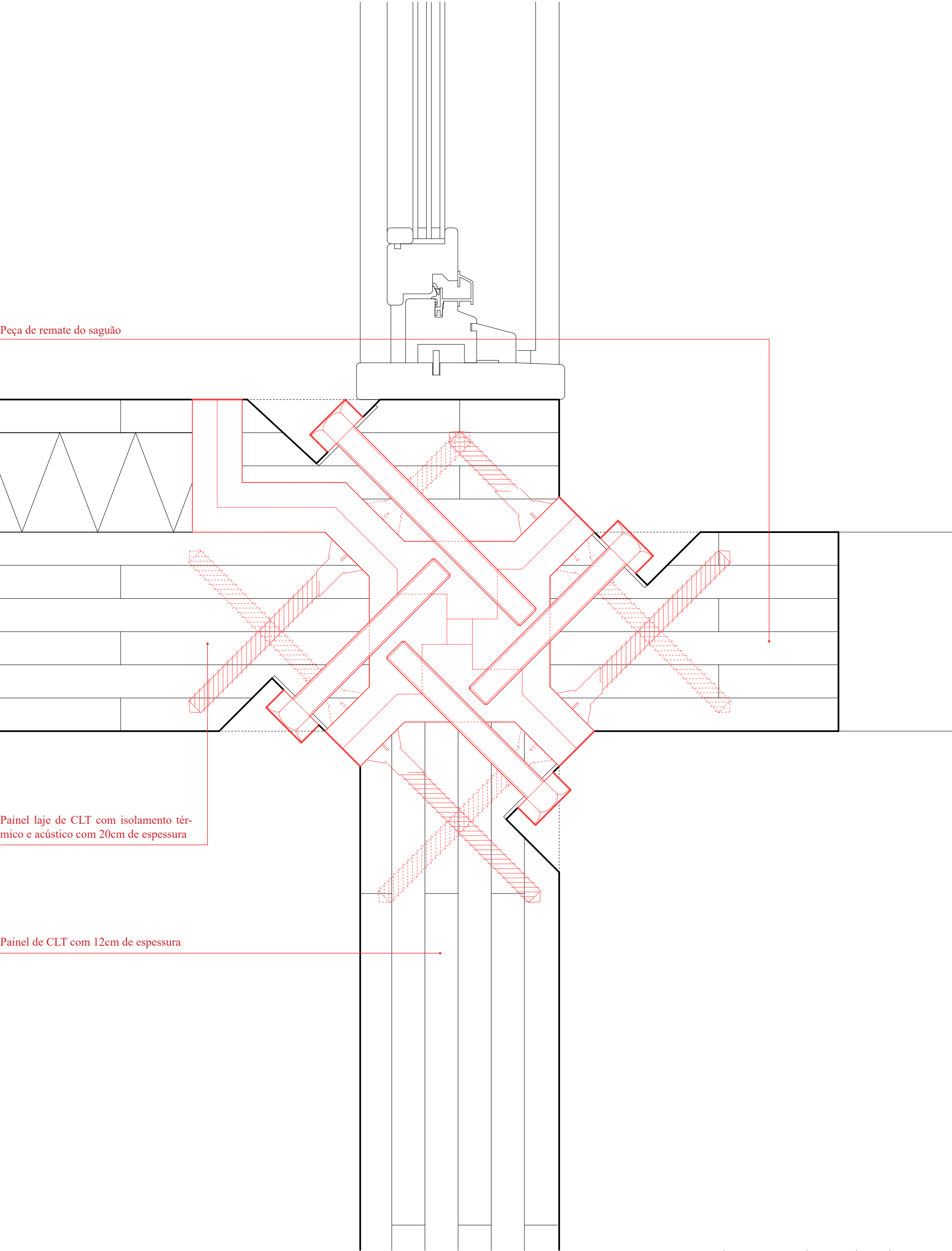


Figura 129 — Detalhe construtivo do corpo.



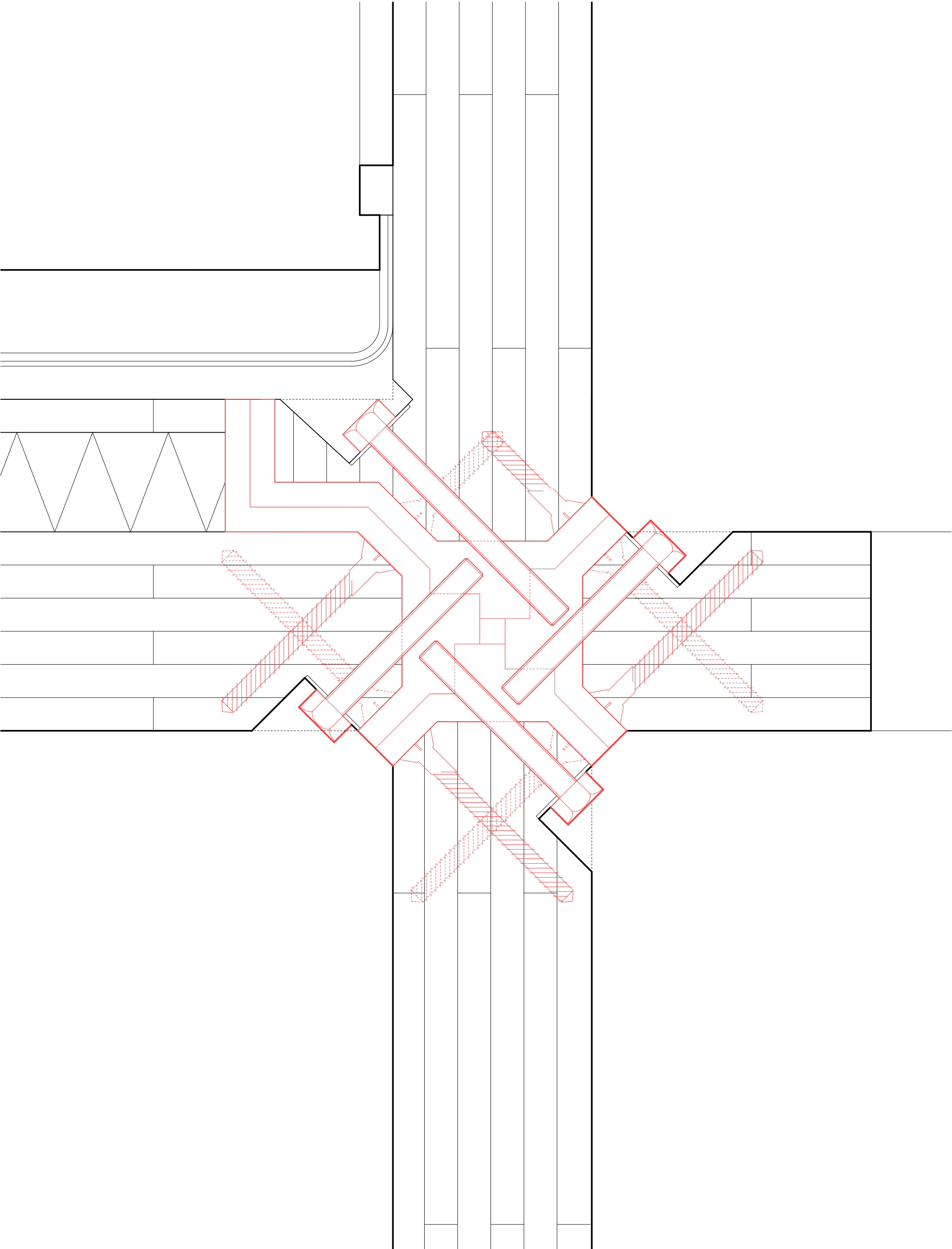


Figura 131 — Detalhe construtivo da cobertura. (1:2)

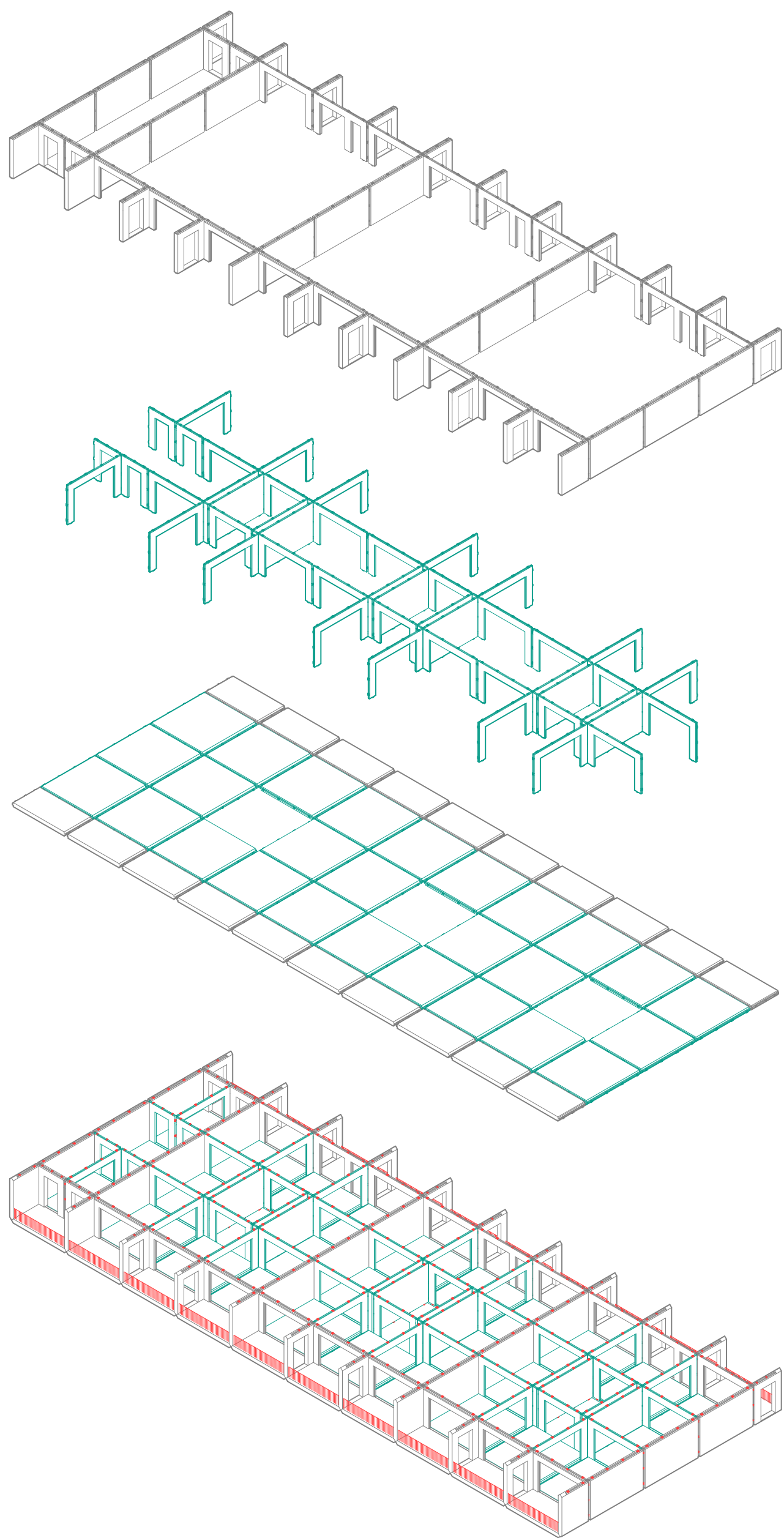


Figura 132 — Isometria explodida da habitação. (1:300)

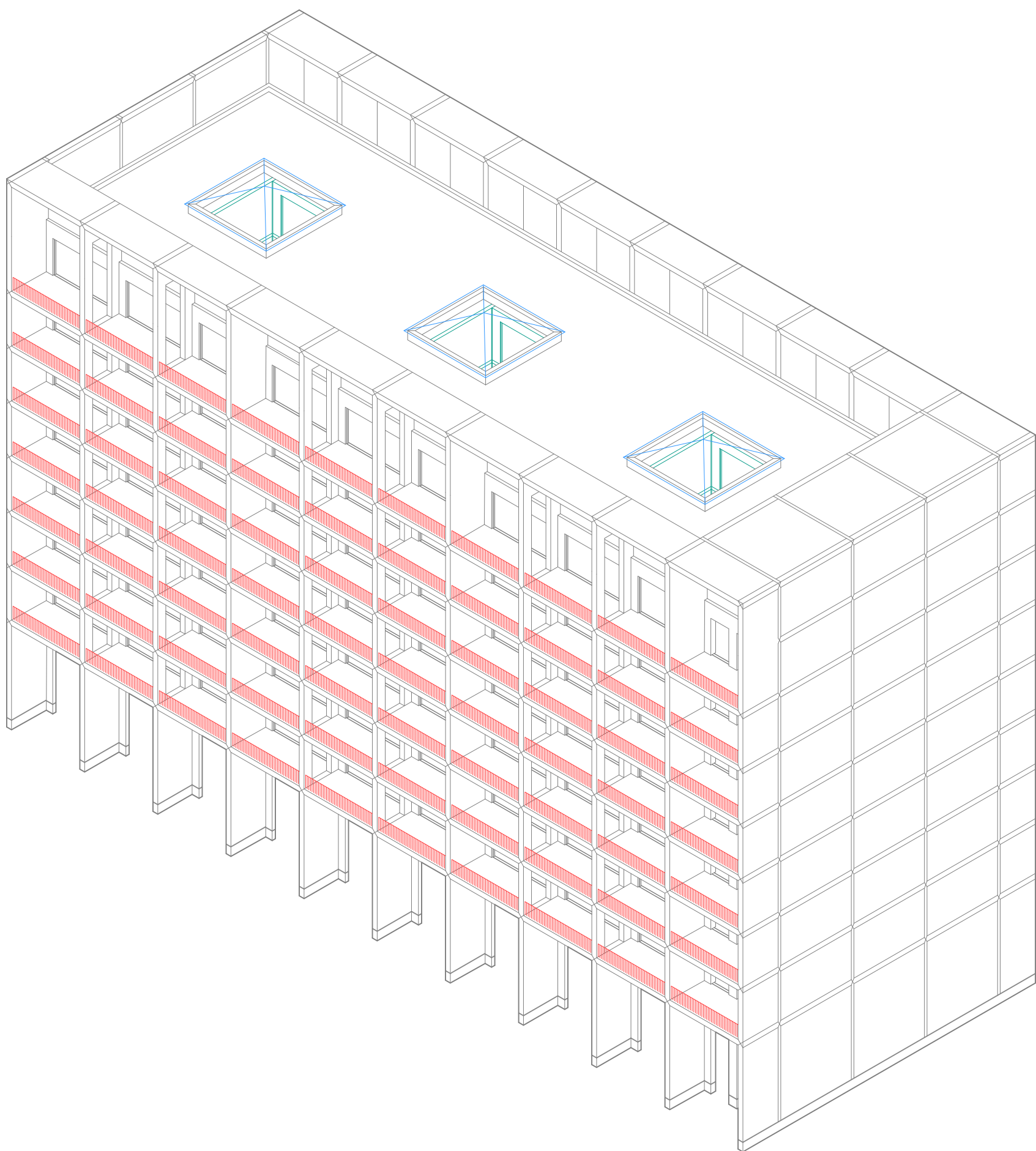
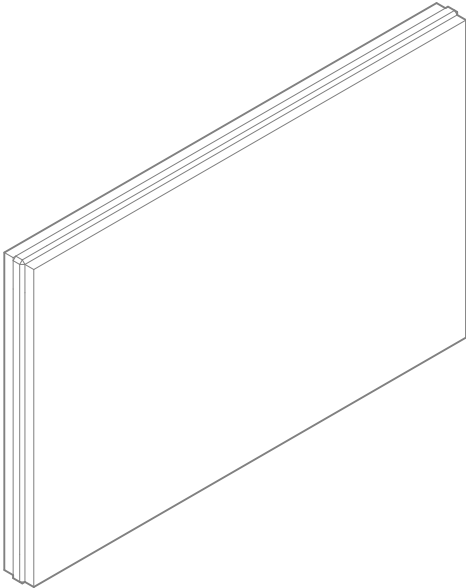
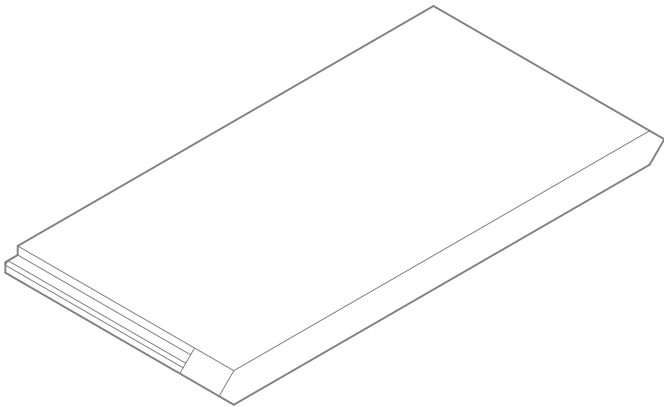


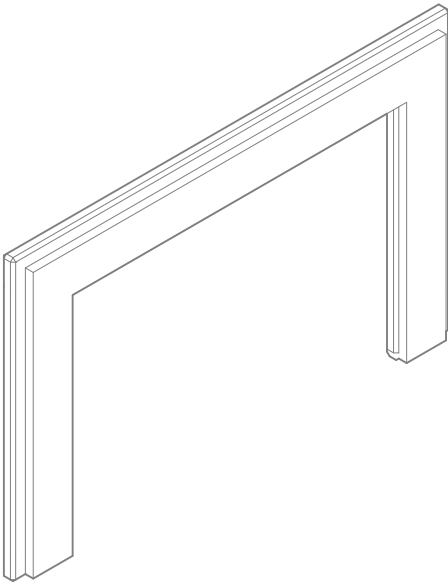
Figura 133 — Isometria da habitação. (1:250)



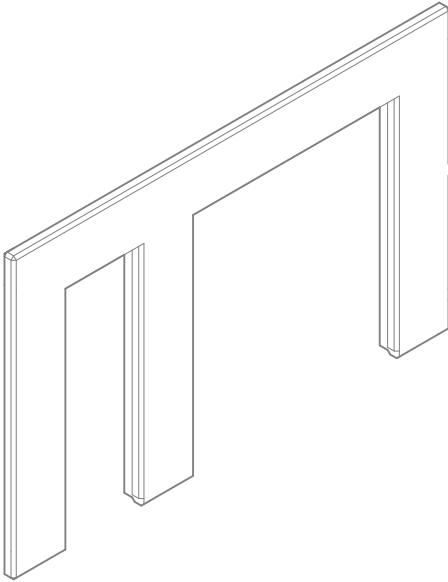
Dimensões	0,3 x 4,4 x 2,8 m
Massa	8 880 kg
Emissão de CO ₂	1 110 kg CO ₂
Quantidade	105 u



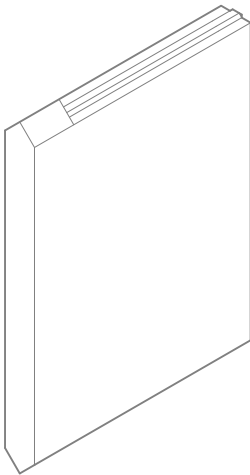
Dimensões	2,2 x 4,4 x 0,3 m
Massa	6 960 kg
Emissão de CO ₂	870 kg CO ₂
Quantidade	160 u



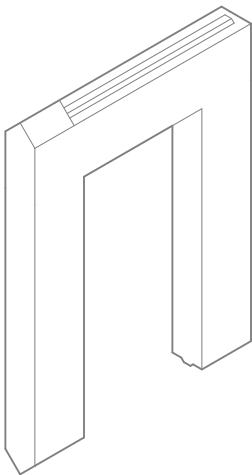
Dimensões	0,2 x 4,4 x 2,8 m
Massa	1 704 kg
Emissão de CO ₂	213 kg CO ₂
Quantidade	105 u



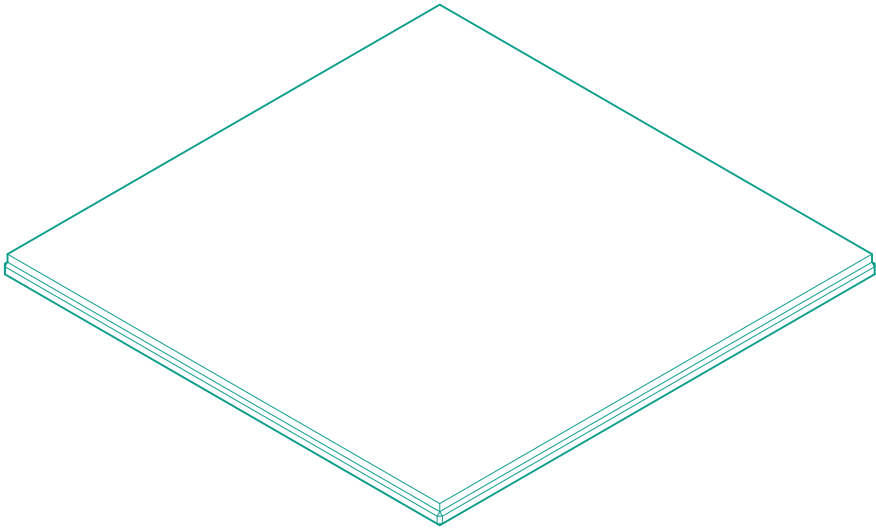
Dimensões	0,2 x 4,4 x 2,8 m
Massa	2 232 kg
Emissão de CO ₂	279 kg CO ₂
Quantidade	21 u



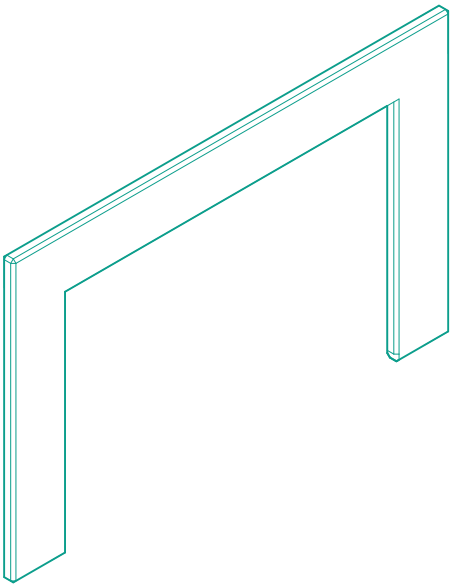
Dimensões	0,3 x 2,2 x 2,8 m
Massa	4 440 kg
Emissão de CO ₂	555 kg CO ₂
Quantidade	35 u



Dimensões	0,3 x 2,2 x 2,8 m
Massa	2 808 kg
Emissão de CO ₂	351 kg CO ₂
Quantidade	147 u



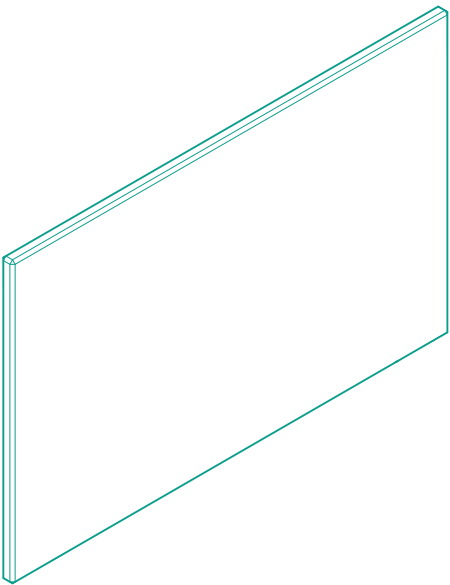
Dimensões	4,4 x 4,4 x 0,2 m
Massa	1 872 kg
Emissão de CO ₂	488 kg CO ₂
Quantidade	59 u



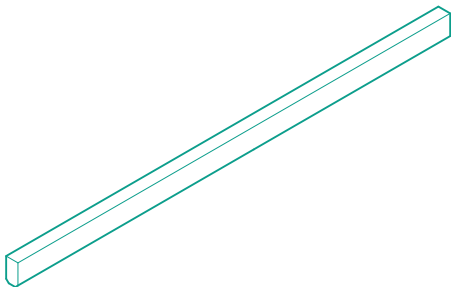
Dimensões	0,12 x 4,4 x 2,8 m
Massa	259 kg
Emissão de CO ₂	67,5 kg CO ₂
Quantidade	128 u



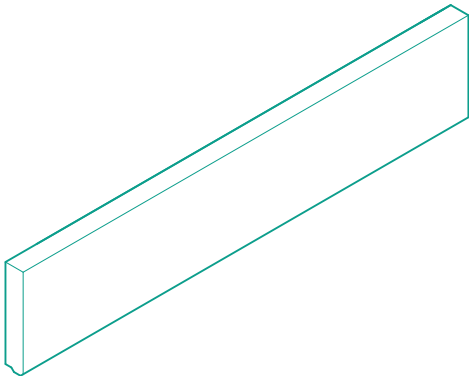
Dimensões	0,12 x 0,3 x 2,8 m
Massa	48 kg
Emissão de CO ₂	12,5 kg CO ₂
Quantidade	44 u



Dimensões	0,12 x 4,4 x 2,8 m
Massa	705 kg
Emissão de CO ₂	183 kg CO ₂
Quantidade	110 u

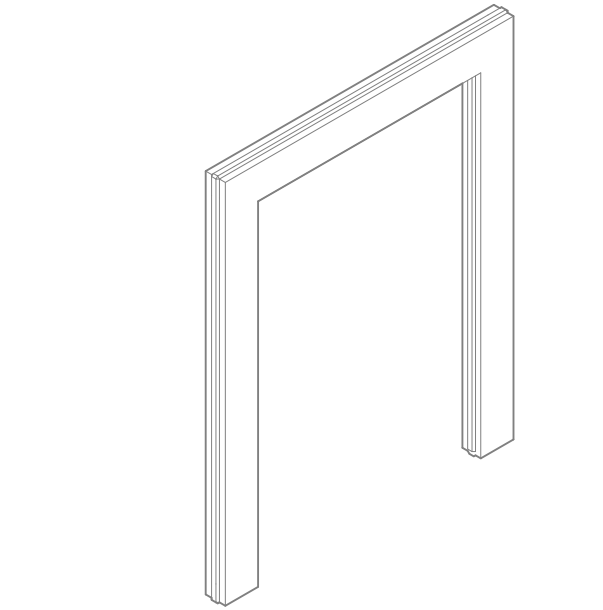


Dimensões	0,12 x 4,4 x 0,15 m
Massa	38 kg
Emissão de CO ₂	10 kg CO ₂
Quantidade	112 u

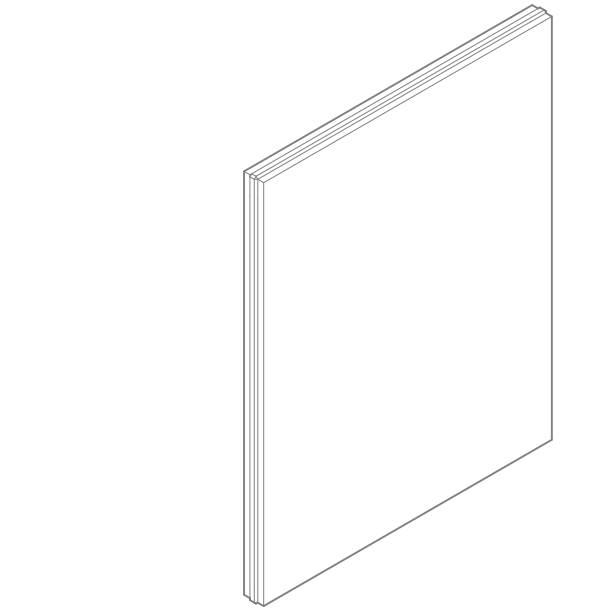


Dimensões	0,2 x 4,4 x 0,7 m
Massa	292 kg
Emissão de CO ₂	76 kg CO ₂
Quantidade	76 u

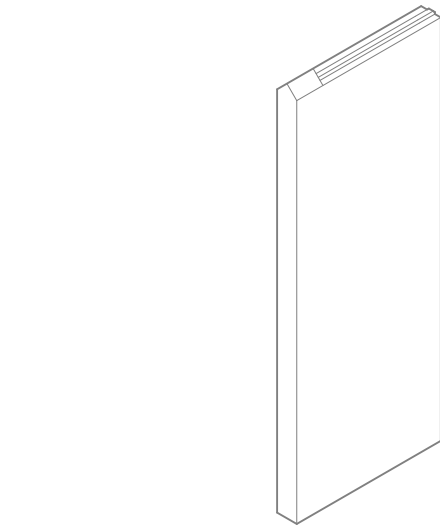
Figura 134 — Catálogo de peças usadas. (1:50)



Dimensões	0,3 x 4,4 x 5,6 m
Massa	5 050 kg
Emissão de CO ₂	631 kg CO ₂
Quantidade	22 u



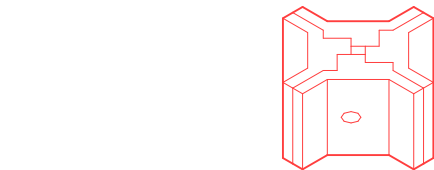
Dimensões	0,3 x 4,4 x 5,6 m
Massa	17 760 kg
Emissão de CO ₂	2 220 kg CO ₂
Quantidade	12 u



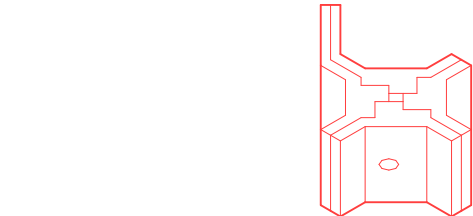
Dimensões	0,3 x 2,2 x 5,6 m
Massa	8 880 kg
Emissão de CO ₂	1 110 kg CO ₂
Quantidade	22 u



Dimensões	0,3 x 0,15 x 2,8 m
Massa	312 kg
Emissão de CO ₂	39 kg CO ₂
Quantidade	56 u



Dimensões	0,16 x 0,16 x 0,1 m
Massa	4,32 kg
Emissão de CO ₂	2,2 kg CO ₂
Quantidade	896 u



Dimensões	0,16 x 0,22 x 0,1 m
Massa	5,4 kg
Emissão de CO ₂	2,7 kg CO ₂
Quantidade	840 u

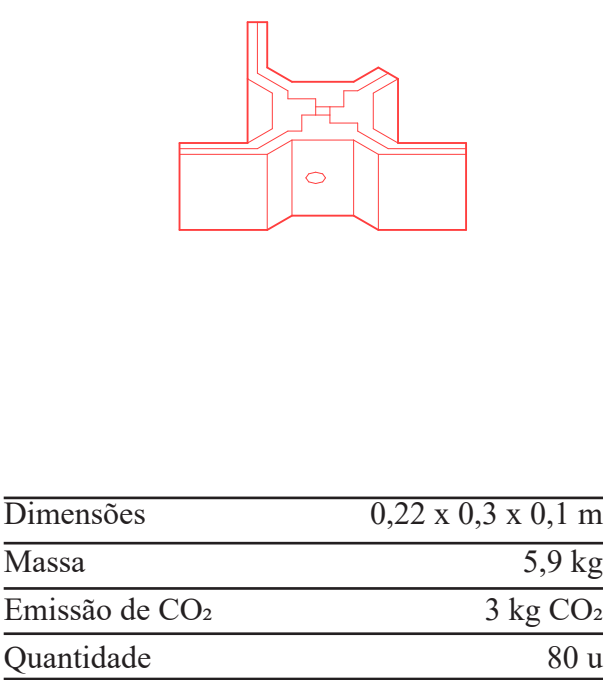
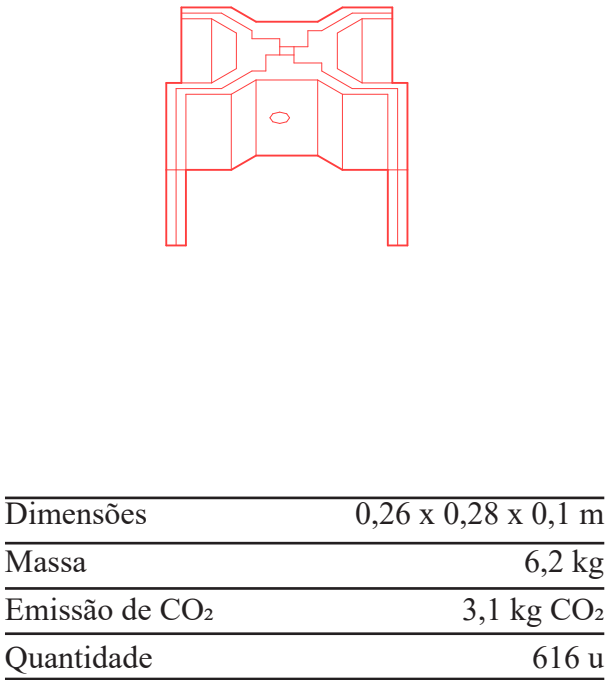
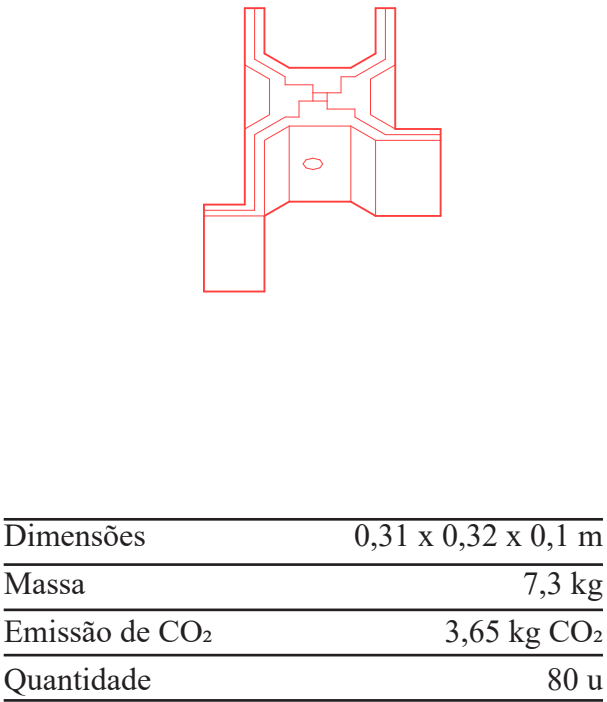
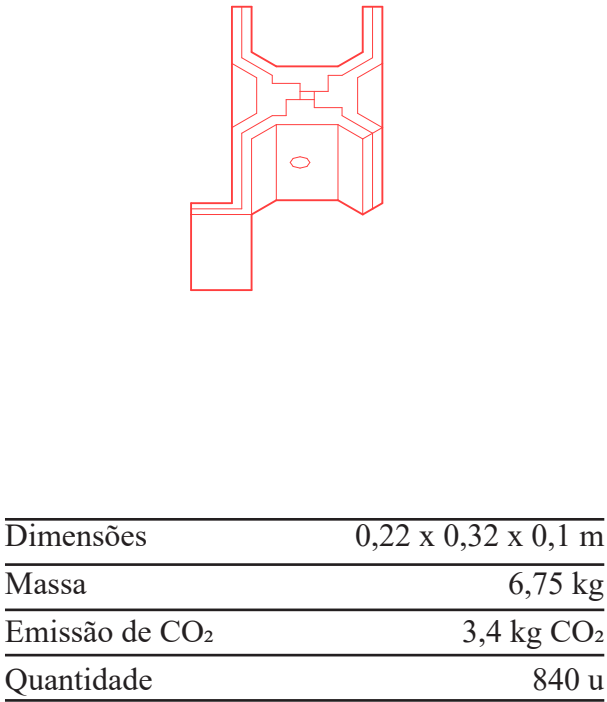


Figura 135 — Catálogo de peças usadas. (1:50)

VII

ANÁLISE

Genealogia Operativa do Sistema Proposto

A comparação entre o sistema aqui proposto e os modelos históricos que o precedem não pretende inscrever-se numa lógica de superação simplista ou de inovação auto celebratória. Pelo contrário, interessa compreender de que forma a proposta desenvolvida nesta tese se inscreve, com plena consciência, num contínuo histórico de tentativas de industrialização da arquitetura — um campo onde a tensão entre padronização e liberdade, entre repetição e adaptabilidade, permanece tão presente quanto irresolúvel.

Neste sentido, o sistema não procura destacar-se por um desempenho absoluto num parâmetro isolado — seja ele estrutural, ambiental ou económico. A sua força reside, antes, na construção de um equilíbrio operativo entre múltiplas variáveis que, historicamente, foram tratadas de forma fragmentada. Se Gropius e Wachsmann alcançaram uma padronização exemplar mas limitada na adaptabilidade formal, se Prouvé combinou materiais diversos com uma notável economia de meios mas sem resolver plenamente a flexibilidade funcional, e se Fuller concebeu uma estrutura revolucionária cujo experimentalismo esbarrou nos limites da produção, o presente sistema propõe-se integrar essas qualidades numa estrutura aberta e coerente.

Os indicadores quantitativos analisados — massa por área, pegada de carbono, diversidade material, complexidade de montagem, número de componentes — revelam não a supremacia de um único critério, mas a construção de um dispositivo técnico capaz de oferecer soluções satisfatórias e articuladas num conjunto coerente. A proposta atinge uma razão massa/área eficaz, sem recorrer ao superdimensionamento ou à leveza extrema. Ambientalmente, opera com uma pegada controlada, aliando materiais de baixo impacto a estratégias de pré-fabricação que minimizam desperdícios. Em termos logísticos, revela-se um sistema de baixa entropia: menos componentes, montagem simplificada, e elevada precisão dimensional garantida pela impressão 3D dos conectores.

Este resultado permite uma constatação: o sistema não se propõe como um arquétipo formal ou como um gesto tecnológico isolado, mas como uma matriz aberta de possibilidades — um campo operativo, tecnicamente fundado e simultaneamente receptivo à contingência do lugar, ao programa, ao tempo e à matéria. É nesta abertura que reside a sua principal inovação: não na invenção de um novo objeto, mas na consolidação de um modelo construtivo evolutivo, replicável e transformável.

É precisamente esta posição intermédia — entre o desenho e o sistema, entre a lógica produtiva e a liberdade projetual — que lhe confere consistência disciplinar. O sistema não encerra o projeto num único horizonte técnico, mas abre-o a múltiplas variações possíveis, mantendo a sua integridade estrutural, ambiental e funcional. Esta plasticidade metódica, que evita tanto o dogmatismo da engenharia como o formalismo da arquitetura, permite-lhe operar como plataforma crítica sobre o fazer arquitetónico na era da transição ecológica e da escassez material.

Se o sistema de Gropius e Wachsmann falhou por não resistir ao embate entre economia de escala e economia de desejo, e se os experimentos de Prouvé permaneceram como exceções virtuosas mas isoladas, o que aqui se propõe é a construção de uma nova categoria de sistema: não um modelo definitivo, mas um campo técnico-operativo suficientemente sólido para evoluir — uma infra-estrutura do porvir. E é talvez neste ponto que a proposta mais se aproxima de uma posição teórica robusta: ao recusar a especialização excessiva em nome da versatilidade; ao integrar a complexidade em vez de a suprimir; e, sobretudo, ao afirmar que um sistema industrializado pode não apenas responder ao presente, mas antecipar, com lucidez, a contingência do futuro.

Gráfico síntese da análise levantada

		<i>Packaged House</i> Walter Gropius & Konrad Wachsmann	<i>Maison Demontable 8x8</i> Jean Prouvé	<i>Maison Tropicque</i> Jean Prouvé	<i>Dymaxion House</i> Richard Buckminster Fuller	Hospital Rio Sarah João Filgueiras Lima	<i>Ricola Herb Center</i> Martin Rauch & Herzog & de Meuron	Copenhaga Novo Sistema Proposto	Lisboa Novo Sistema Proposto
Síntese									
Ano	Início do projeto	1942	1944	1949	1929	1994	2012	2025	2025
	Conclusão da construção	1952	1945	1949	1947	2003	2014		
Tipo	Habitação recreativa					x	x		
	Habitação individual	x	x	x	x				
	Habitação coletiva							x	x
Sistema	Peças		x	x	x	x	x	x	x
	Painéis	x	x	x		x	x	x	x
	Volumes					x		x	x
Dimensões do sistema	Comprimento	8	8	18		200	110	30,2	45,8
	Largura	4	4	10		120	30	9,6	18,3
	Altura	4	3,3	4,9	7,25	6	11	25	27
	Diâmetro				10,8				
	Área	32	32	180	90	24 000	3 300	290	840
	Volume	100	91	882	280	144 000	36 300	7 250	22 680
Análise									
Massa	Massa estimada	9,5	3,0	36	3,5	19 200	3 300	669,19	2 272
	Massa por área	292	96	200	43	800	1 000	2 310	2 705
	Massa por volume	93	34	40,8	13	133,3	90,9	92,3	100,2
Distribuição de material	Matérial primário	46%	66%	75%	59%	55%	45%	68%	85%
	Material secundário	44%	25%	12%	29%	30%	20%	29%	11%
	Material terciário	7%	7%	8%	9%	7%	18%	2%	2%
	Material quaternário	3%	2%	4%	3%	6%	7%	1%	2%
	Material quinário			1%		2%	5%		
Distribuição de massa	Fundações	46%	7%	8%	9%	30%	20%		
	Estrutura	6%	31%	55%	39%	55%	18%		
	Revestimento	48%	62%	37%	52%	15%	62%		
Pegada de carbono	Estimado	2,7	1,7	46,7	11,5	20 988	1 528	194,9	419,9
	Área	84	55	259	137	874	463	672	499,9
	Volume	26	19	52,9	41	145	140	29,6	18,5
Distribuição de pegada de carbono por material	Matérial primário	45%	80%	92,9%	87%	93,1%	57,6%	44,1%	60,9%
	Material secundário	25%	14%	2,7%	12%	6,4%	21,6%	27,4%	18%
	Material terciário	20%	4%	2%	1%	4,6%	8,7%	18,2%	11,1%
	Material quaternário	10%	2%	1,7%		3,6%	4,6%	10,2%	10%
	Material quinário			0,7%		1,26%	4,5%		
Distribuição de Pegada de Carbono	Fundações	25%	2%	0,8%	1%	3,6%	5,6%		
	Estrutura	3%	7%	78,5%	53%	86,3%	71,9%		
	Revestimento	72%	91%	20,7%	46%	10,1%	22,5%		
Complexidade	Tipos de componentes	32	43	35	36	120	60	21	22
	Tipos por área	1,0	1,3	0,19	0,4	0,005	0,01	0,07	0,03
Assemblagem	Total de componentes	500	284	1200	800	20 000	5 000	1 092	1 214
	Componentes por área	15,6	8,9	6,7	9,1	9,2	10,6	3,7	1,44
	Índice de pré-fabricação	32/35	43/43	35/35	36/39	100/120	54/60	21/21	22/22
Potencial									
Escalabilidade	Modularidade	x				x	x	x	x
	Flexibilidade	x	x	x	x	x		x	x
	Adaptabilidade	x	x	x				x	x
Circularidade	Facilidade de montagem					x		x	x
	Desmontagem	x	x	x	x	x	x	x	x
	Mobilidade		x		x			x	x

Figura 136 — Gráfico síntese.

Referências

ARCHITECTURE 2030 – «Why The Built Environment». [Em linha]. [S.l.]: Architecture 2030, 2023. Disponível em: <https://www.architecture2030.org/why-the-built-environment/>. [Consultado em: 12 jun. 2025].

CRUZ, Aline – «Pré-fabricação e conforto ambiental: o pioneirismo de Lelé». *ArchDaily Brasil* [Em linha], 28 maio 2021. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/961207/pre-fabricacao-e-conforto-ambiental-o-pioneirismo-de-lele>. [Consultado em: 15 jun. 2025].

EKERMAN, S. – *PSS*. Newcastle-upon-Tyne: TF/TK, 2024. ISBN 978-1-7390913-2-3.

FRANCO, José Tomás – «A casa desmontável 8x8 de Jean Prouvé poderá ser visitada pela primeira vez na Galerie Patrick Seguin». *Archdaily Brasil* [Em linha], 22 jan. 2014. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-169601/a-casa-desmontavel-8x8-de-jean-prouve-podera-ser-visitada-pela-primeira-vez-na-galerie-patrick-seguin>. [Consultado em: 17 jun. 2025].

FULLER, R. Buckminster – *Nine Chains to the Moon*. Philadelphia: Lippincott, 1938; reimpressão: Basileia: Birkhäuser, 2019. ISBN 978-3-0356-1775-7.

GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – *2022 Global Status Report for Buildings and Construction*. [Em linha]. [S.l.]: Global ABC, UNEP, 2022. Disponível em: https://globalabc.org/sites/default/files/2022-11/FULL%20REPORT_2022%20Buildings-GSR_1.pdf. [Consultado em: 12 jun. 2025].

HERBERT, Gilbert – «The Packaged House: A Wartime Proposal». In *The Dream of the Factory-Made House: Walter Gropius and Konrad Wachsmann*. Cambridge, MA: MIT Press, 1984. ISBN 978-0-262-36801-8.

HOUSING FUTURES STUDIO – «History of prefabrication» [Em linha]. [S.l.]: *Housing Futures Studio*, 5 dez. 2023. Disponível em: <https://www.housingfutures.studio/blog-posts/history-of-prefabrication>. [Consultado em: 15 jun. 2025].

İŞBİLEN, Ezgi – «The unbearable lightness of an open system: The Packaged House 1941-47». *Footprint: Delft Architecture Theory Journal*, vol. 16, n.º 2 (Autumn/Winter 2022), pp. 67-84. ISSN 1875-1490

JONES, Dora Epstein – «Walter Gropius and prefab». *ArcCA Digest* [Em linha], out./nov. 2007. ISSN 0212-5683.

MODULAR BUILDING INSTITUTE – «How Modular Construction Leads to Zero-Waste and Eco-Efficiency». [Em linha]. [S.l.]: Modular Building Institute, 26 dez. 2023. Disponível em: <https://www.modular.org/2023/12/26/how-modular-construction-leads-to-zero-waste-and-eco-fficiency/>. [Consultado em: 12 jun. 2025].

MYRIE, Garfield – «Hempcrete: o tijolo verde que enfrenta o desafio das alterações climáticas». *Euronews Cultura* [Em linha], 1 set. 2024. Disponível em: <https://pt.euronews.com/cultura/2024/09/01/hempcrete-o-tijolo-verde-que-enfrenta-o-desafio-das-alteracoes-climaticas>. [Consultado em: 15 jun. 2025].

PINEARQ – «Industrialized hospitals: recovering Lelé». [Em linha]. Barcelona: Pinearq, 2022. Disponível em: <https://pinearq.es/en/blog-en/industrialized-hospitals-recovering-lele>. [Consultado em: 13 jun. 2025].

PROUVÉ, Jean – 8x8 *Demountable house*, 1944. [Em linha]. [S.l.]: Ateliers Jean Prouvé, 1944. Disponível em: <https://www.jeanprouve.com/en/fiche/1944-14>. [Consultado em: 10 jun. 2025].

PROUVÉ, Jean – *Maison Tropique, Niamey* (prototype), 1949. [Em linha]. Niamey: Ateliers Jean Prouvé, 1949. Disponível em: <https://www.jeanprouve.com/fiche/1949-10>. [Consultado em: 8 jun. 2025].

RAUCH, Martin – «Earth Architecture». *EarthArchitecture.org* [Em linha], 8 out. 2024. Disponível em: <https://eartharchitecture.org/?p=1400>. [Consultado em: 11 jun. 2025].

REALL – *Summary Report of Phase 2B of the CLIFF programme – Affordable Homes Movement in Africa and Asia* (2014–2020) [Em linha]. [S.l.]: Reall, 2021. Disponível em: <https://reall.net/wp-content/uploads/2021/07/Summary-of-CLIFF-2B.pdf>. [Consultado em: 12 jun. 2025].

RIZZOTTI, Philippe (org.) – *L’empreinte d’un habitat: construire léger et décarboné = Housing footprint: light and low-carbon construction*. 1.ª ed. Paris: Éditions du Pavillon de l’Arsenal, jan. 2022. ISBN 978-2-35487-065-2.

RYFAN – «Construction Conundrum». [Em linha]. [S.l.]: Ryfan, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ryfan.ca/company/construction-connundrum?.com>. [Consultado em: 12 jun. 2025].

SANDREN, Marcus – «Dymaxion prefabrication». [Em linha]. [S.l.]: Cargo Collective, [s.d.]. Disponível em: <https://cargocollective.com/marcusandren/filter/Analysis/DYMAXION-PREFABRICATION>. [Consultado em: 10 jun. 2025].

SAUER, Marko – «Retrospective: Martin Rauch», *The Architectural Review* [Em linha], 2020. [S.l.]: The Architectural Review. Disponível em: <https://www.architectural-review.com/buildings/earth/retrospective-martin-rauch>. [Consultado em: 16 jun. 2025].

SAUER, Marko; KAPFINGER, Otto – *Martin Rauch: Refined Earth: Construction & Design with Rammed Earth*. 3.ª ed. Munique: DETAIL Business Information GmbH, 2022. ISBN 978-3-95553-574-2.

SHARMA, Aditi – «Jean Prouvé’s 80-year-old prefab house receives a permanent exhibition». *Architectural Digest* [Em linha], 13 nov. 2024. [S.l.]: Architectural Digest. Disponível em: <https://www.architecturaldigest.in/story/jean-prouves-80-year-old-prefab-house-receives-a-permanent-exhibition-carpenters-workshop-gallery-ladbroke-hall-garden-in-london>. [Consultado em: 14 jun. 2025].

SISSON, Patrick – «Progressive prefabs of Jean Prouvé». *Dwell* [Em linha], 2014. [S.l.]: *Dwell*. Disponível em: <https://www.dwell.com/article/progressive-prefabs-of-jean-prouve-89981f92>. [Consultado em: 14 jun. 2025].

VALE, Michel Chaui do – Programa urbano, projeto e fabricação: a obra de João Filgueiras Lima (Lelé) em Salvador. Dissertação de Mestrado em Arquitetura – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2019. [Em linha]. Disponível em: https://www.academia.edu/38817998/Programa_urbano_projeto_e_fabrica%C3%A7%C3%A3o_a_obra_de_Jo%C3%A3o_Filgueiras_Lima_Lel%C3%A9_em_Salvador_Urban_program_design_and_production_the_work_of_Jo%C3%A3o_Filgueiras_Lima_Lel%C3%A9_in_Salvador [Consultado em: 12 jun. 2025].

WIKIARQUITECTURA – «Maisons tropicales» Wikiarquitectura [Em linha]. [s.l.]: Wikiarquitectura, [s.d.]. Disponível em: <https://fr.wikiarquitectura.com/bâtiment/maisons-tropicales>. [Consultado em: 12 jun. 2025].

ZHOU, Fang [et al.] – «Analyze Differences in Carbon Emissions from Traditional and Prefabricated Buildings Combining the Life Cycle». *Buildings* [Em linha], vol. 13, n.º 4 (2023), artigo 874, pp. 1-12. ISSN 2075-5309.