Universidade do Minho
Escola de Arquitetura, Arte e Design

Pedro Emanuel Teixeira Gonçalves

Pré-fabricação em SIP: Uma Abordagem para uma Habitação Unifamiliar Evolutiva

julho de 2026

Pré-fabricação em SIP: Uma Abordagem para uma Habitação Unifamiliar Evolutiva
Pedro Gonçalves
UMinho | 2026

Universidade do Minho
Escola de Arquitetura, Arte e Design

Pedro Emanuel Teixeira Gonçalves

Pré-fabricação em SIP: Uma Abordagem para uma Habitação Unifamiliar Evolutiva

Trabalho de Projeto
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Arquitetura
Construção e Tecnologia

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Carlos Alberto Maia Domínguez
Professor Doutor Jorge Manuel Gonçalves Branco

julho de 2026

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

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



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações CC BY-NC-ND

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

DECLARAÇÃO DE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri a qualquer forma de utilização indevida de ferramentas de Inteligência Artificial (IA), nem à falsificação ou omissão de informações, fontes, dados, resultados ou processos em nenhuma das etapas conducentes à sua elaboração.

Declaro ainda que qualquer utilização de ferramentas de IA foi feita de forma transparente e responsável, encontrando-se devidamente assinalada/descrita no trabalho, e que procedi à verificação crítica da exatidão do conteúdo produzido com o seu apoio, assumindo integralmente a responsabilidade pelo que submeto.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho, bem como as normas aplicáveis de integridade académica e de proteção de dados.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Carlos Maia e Jorge Branco, pela orientação, disponibilidade, partilha de conhecimento e acompanhamento prestado ao longo de todo o processo de investigação e desenvolvimento da tese.

À Bolsa de Iniciação à Investigação, com a referência 016/TT/2024, no âmbito da execução do Projeto Transform, financiado através da Componente 5 – Capitalização e Inovação Empresarial (PRR) | Agenda C5 Aviso N.º 02/C05-i01/2022), dos fundos europeus atribuídos a Portugal pelo PRR, no âmbito do Mecanismo de Recuperação e Resiliência (MRR) da União Europeia (EU), enquadrado no Next Generation UE, para o período de 2021 -2025.

Ao engenheiro Francisco, pela ajuda e apoio nos cálculos técnicos.

À minha mãe, pelo apoio incondicional, incentivo constante e por estar presente em todos os momentos deste percurso.

À Inês, pela paciência, apoio, motivação e presença constante ao longo desta caminhada, especialmente nos momentos mais exigentes.

A todos os amigos que conheci ao longo deste percurso académico, pelos momentos partilhados que marcaram estes anos académicos.

A todos um sincero obrigado!

Pré-fabricação em SIP: Uma Abordagem para uma Habitação Unifamiliar Evolutiva

Resumo

A presente investigação tem como principal objetivo desenvolver uma proposta de habitação unifamiliar evolutiva com recurso ao sistema construtivo pré-fabricado *Structural Insulated Panels* (SIP). Partindo de uma análise do impacto ambiental do setor da construção, caracterizado por elevados consumos energéticos, uso intensivo de recursos e significativa produção de resíduos, o trabalho enquadra a pré-fabricação, recorrendo ao sistema construtivo SIP, como uma estratégia relevante para a transição para práticas mais sustentáveis, analisando aspetos como custo, eficiência energética, consumo de recursos, emissões e ciclo de vida, em comparação com os métodos construtivos convencionais.

Numa primeira fase, é realizado um enquadramento histórico da pré-fabricação, permitindo compreender a evolução destes sistemas até ao desenvolvimento dos painéis SIP. Posteriormente, são analisados os seus princípios construtivos, composição material e o seu desempenho estrutural e térmico.

Paralelamente, são discutidas as vantagens e limitações associadas à pré-fabricação, incluindo questões logísticas, perceção pública e desafios técnicos. O trabalho procura demonstrar o potencial dos sistemas SIP como solução eficiente, sustentável e economicamente viável, contribuindo para a inovação na arquitetura residencial contemporânea.

Por fim, o sistema é aplicado num projeto de habitação unifamiliar, com a particularidade de explorar a possibilidade de crescimento da construção, evidenciando a flexibilidade e adaptabilidade do sistema SIP no contexto habitacional.

Palavras-chave

Structural Insulated Pannels | Pré-fabricação | Sustentabilidade
Habitação evolutiva | Racionalização construtiva

SIP Prefabrication: An Approach to Evolutive Single-Family Housing

Abstract

The present research aims to develop a proposal for an evolutive single-family house using the prefabricated Structural Insulated Panels (SIP) construction system.. Starting from an analysis of the environmental impact of the construction sector, characterised by high energy consumption, intensive resource use, and significant waste generation, the study frames prefabrication, particularly through the use of the SIP construction system, as a relevant strategy for the transition towards more sustainable practices, examining aspects such as cost, energy efficiency, resource consumption, emissions, and life cycle, in comparison with traditional construction methods.

In an initial phase, a historical overview of prefabrication is presented in order to understand the evolution of these systems up to the development of SIP panels. Subsequently, their construction principles are analysed, along with their material composition and structural and thermal performance.

In parallel, the advantages and limitations associated with prefabrication are discussed, including logistical issues, public perception, and technical challenges. The study aims to demonstrate the potential of SIP systems as an efficient, sustainable, and economically viable solution, contributing to innovation in contemporary residential architecture.

Finally, the system is applied in a single-family housing project, with the particularity of exploring the possibility of future expansion, highlighting the flexibility and adaptability of the SIP system within the residential contexto.

Keywords

Structural Insulated Panels | Prefabrication | Sustainability
Evolutive housing | Construction rationalization

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO **15**

1.1. TEMA E PROBLEMÁTICA **17**

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO **27**

2. PRÉ-FABRICAÇÃO **29**

2.1. COMPARAÇÃO DA PRÉ-FABRICAÇÃO COM CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL **31**

2.1.1. Planeamento 33

2.1.2. Condições de segurança 37

2.1.3. Qualidade 39

2.1.4. Sustentabilidade 45

2.1.5. Análise SWOT 51

2.2. EVOLUÇÃO DE SISTEMAS PRÉ-FABRICADOS **53**

2.3. ARQUITETURA PRÉ-FABRICADA **67**

2.4. TIPOS DE PRÉ-FABRICAÇÃO **77**

2.5. *LIGHT TIMBER FRAME* (LTF) **81**

2.6. *LIGHT STEEL FRAME* (LSF) **83**

2.7. PRÉ-FABRICADOS DE BETÃO **85**

2.8. *STRUCTURAL INSULATED PANELS* **87**

2.8.1. Casos práticos 89

2.8.1.1. Casa SIP M3 *91*

2.8.1.2. Casa Shotgun *93*

2.8.1.3. Residência El Tume *95*

3. *STRUCTURAL INSULATED PANELS* **97**

3.1. O QUE SÃO PAINÉIS SIP? **99**

3.2. MONTAGEM EM OBRA **109**

3.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO SISTEMA SIP **113**

6.5. COMPORTAMENTO DO SISTEMA SIP **117**

4. PROJETO **121**

5. CONCLUSÃO **175**

6. BIBLIOGRAFIA **181**

1.
INTRODUÇÃO

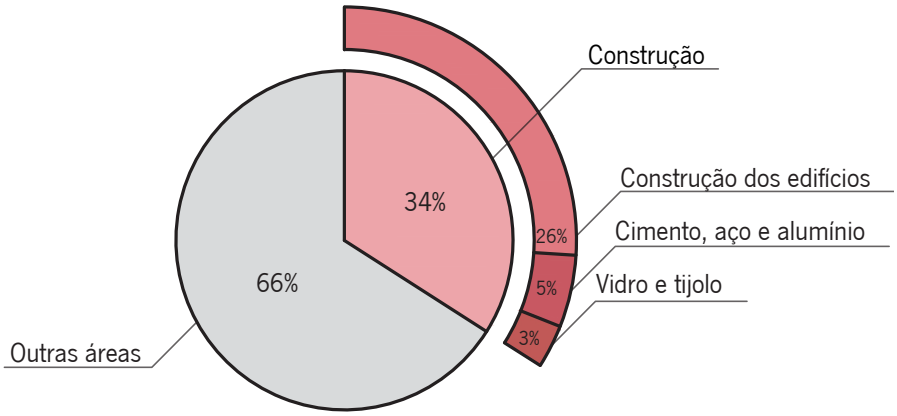
TEMA E PROBLEMÁTICA

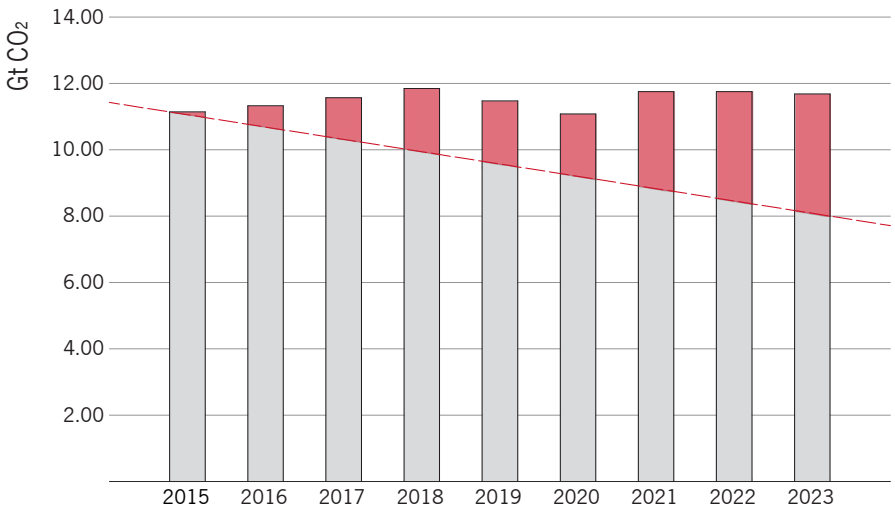
A presente investigação parte da análise dos principais desafios atuais do setor da construção, nomeadamente ao nível do impacto ambiental, culminando no desenvolvimento de uma proposta de habitação unifamiliar evolutiva com recurso ao sistema construtivo pré-fabricado *Structural Insulated Panels* (SIP).

Para tal, torna-se fundamental compreender o estado atual do setor da construção e os desafios que este enfrenta, sobretudo ao nível do impacto ambiental, do consumo de recursos e da necessidade de promover práticas mais sustentáveis e eficientes. Neste sentido, procura-se refletir sobre a importância de repensar os métodos construtivos convencionais, considerando não apenas questões de sustentabilidade e eficiência construtiva, mas também a capacidade de inovação das tipologias habitacionais e a adaptação da arquitetura às necessidades contemporâneas.

A investigação pretende ainda analisar o contributo da pré-fabricação enquanto alternativa mais sustentável face aos sistemas convencionais de construção, destacando o seu potencial na racionalização dos processos construtivos, na redução de desperdícios e na melhoria do controlo de qualidade em ambiente de produção industrial. Neste contexto, a pré-fabricação assume um papel fundamental na transformação do setor da construção.

Em particular, será aprofundado o estudo do sistema SIP enquanto solução construtiva, caracterizada pela integração entre estrutura e isolamento térmico num único elemento. Procura-se avaliar as suas principais características técnicas, o seu desempenho térmico, estrutural e energético. Paralelamente, será analisado o seu potencial de aplicação numa habitação contemporânea, tirando partido das suas vantagens nomeadamente a nível da eficiência energética, da rapidez de montagem e da flexibilidade projetual.


Construção
Construção dos edifícios
Cimento, aço e alumínio
Vidro e tijolo
Outras áreas
34%
66%
26%
5%
3%


Gt CO_2
14.00
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023



De acordo com os dados apresentados no *Global Status Report for Building and Construction 2024/25*, realizado pela *United Nations Environment Programme* (UNEP) o setor da construção é atualmente um dos maiores responsáveis pelas alterações climáticas e pelo consumo excessivo de recursos. Em 2023, este setor contribuiu diretamente com 34% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) relacionadas com a energia e desenvolvimento de processos industriais, sendo, portanto, o setor que mais emissões gerou a nível mundial. Adicionalmente, foi responsável por cerca de 32% da energia consumida globalmente, refletindo o peso considerável das atividades de construção e operação de edifícios no consumo de recursos energéticos.

Gráf. 1
Emissões globais de dióxido de carbono

Destas emissões totais, cerca de 26% resultaram diretamente da construção dos edifícios, enquanto os restantes 8% estão associados ao chamado carbono incorporado, ou seja, às emissões provenientes da produção e utilização dos materiais de construção: 5% provêm do cimento, aço e alumínio e 3% do vidro e tijolo utilizados nos processos construtivos (Gráf. 1) (UNEP, 2025).

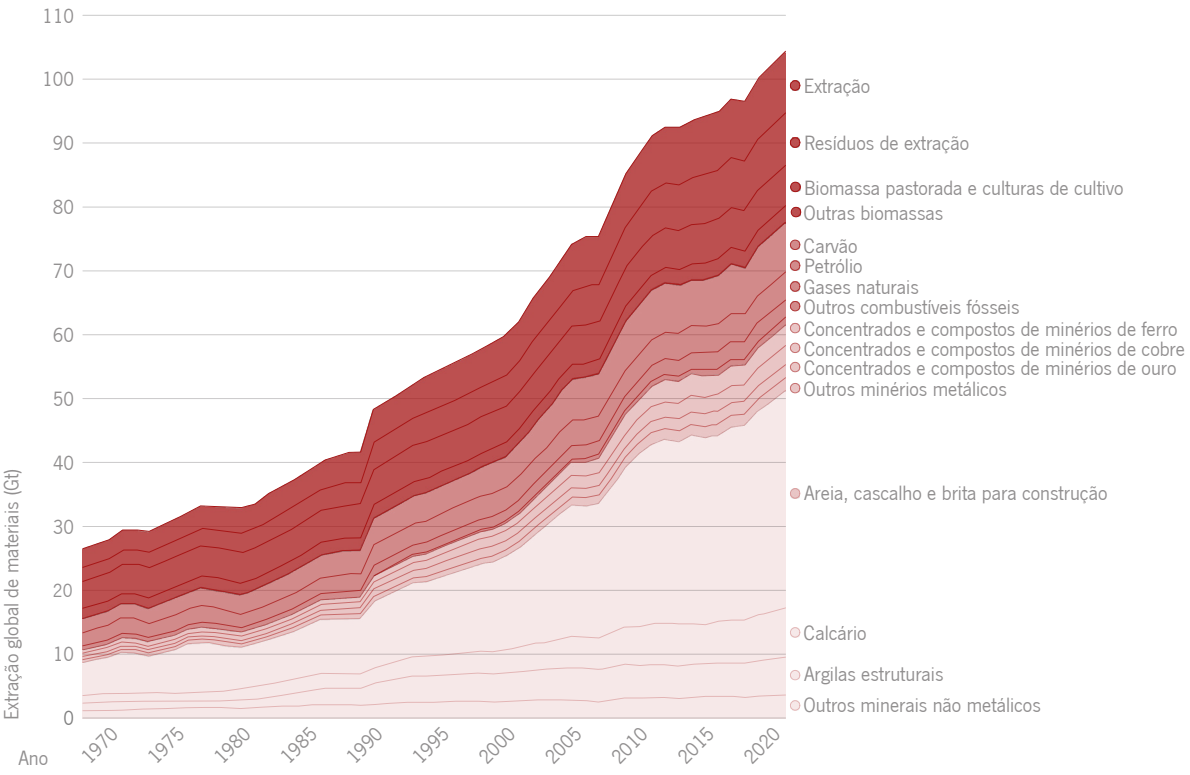
O panorama atual reflete um agravamento face ao progresso desejado. Entre 2015 e 2023, as emissões de CO_2 do setor aumentaram 5,4%, quando, para cumprir as metas estabelecidas pelo Acordo de Paris, seria necessária uma redução de 28,1% até 2030 (Gráf. 2). A trajetória atual evidencia, assim, uma defasagem preocupante em relação aos compromissos climáticos internacionais (UNEP, 2025).

Gráf. 2
Emissões globais de dióxido de carbono face as metas do Acordo de Paris

Para além do impacto associado às emissões, o setor da construção é também um dos principais responsáveis pela produção de resíduos à escala global. Estima-se que sejam geradas, anualmente, cerca de dois mil milhões de toneladas de resíduos provenientes de demolições e restos de obra, o que representa aproximadamente um terço do total de resíduos sólidos produzidos mundialmente (Fig. 1) (UNEP, 2025).

Apesar deste contexto desafiante, começam a surgir sinais positivos. Em 2023, registou-se um crescimento na adoção de fontes de energia renovável e de sistemas de climatização elétricos, em especial nas soluções de aquecimento e arrefecimento. Esta transição energética, embora incipiente, representa um passo importante na redução das emissões operacionais dos edifícios (UNEP, 2025). Paralelamente, verificou-se também uma diminuição do carbono incorporado, resultado do uso de betão de baixo carbono, aço reutilizado e madeira proveniente de fontes sustentáveis, práticas que contribuem significativamente para o decréscimo da pegada ambiental do setor (*Research and Markets*, 2024).

Fig. 1
Representação dos residuos produzidos por demolições e restos de obra


110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Extração global de materiais (Gt)
Ano
1970
1975
1980
1985
1990
1995
2000
2005
2010
2015
2020
Extração
Resíduos de extração
Biomassa pastorada e culturas de cultivo
Outras biomassas
Carvão
Petrólio
Gases naturais
Outros combustíveis fósseis
Concentrados e compostos de minérios de ferro
Concentrados e compostos de minérios de cobre
Concentrados e compostos de minérios de ouro
Outros minérios metálicos
Areia, cascalho e brita para construção
Calcário
Argilas estruturais
Outros minerais não metálicos

Simultaneamente, o número de edifícios com certificação ambiental (*Green Building Certification*) tem vindo a crescer. Em 2023, cerca de 20% dos novos edifícios comerciais nos países da OCDE (*Organization for Economic Cooperation and Development*) foram certificados, representando um aumento face aos 15% registados em 2020. As práticas de construção modular e circular, que promovem a reutilização de materiais e a redução do desperdício, também começam a ganhar maior expressão no mercado, contribuindo para uma abordagem mais sustentável ao longo do ciclo de vida dos edifícios (UNEP, 2025).

Contudo, estes avanços são ainda insuficientes para inverter a tendência. O setor continua longe de cumprir os objetivos traçados para 2030 no Acordo de Paris e de alcançar a meta da total descarbonização do parque edificado até 2050.

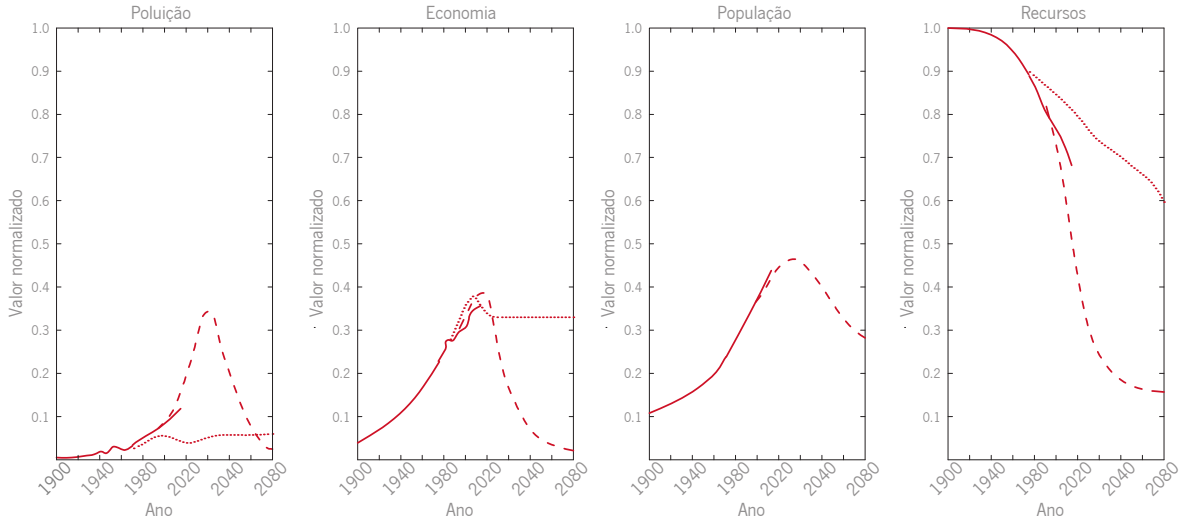
Segundo o *Circularity Gap Report 2025*, a extração global de materiais triplicou nos últimos 50 anos, atingindo recentemente a marca dos 100 mil milhões de toneladas por ano (Gráf.3). Esta tendência crescente, associada ao atual modelo económico linear, está a exercer uma pressão insustentável sobre os recursos naturais do planeta. Em paralelo, o relatório evidencia um agravamento do desequilíbrio entre extração e circularidade: enquanto a extração de materiais e a geração de resíduos continuam a aumentar, as taxas de reciclagem estão a diminuir, evidenciando a fragilidade do modelo atual em manter os materiais em circulação e em travar a crescente dependência de recursos virgens.

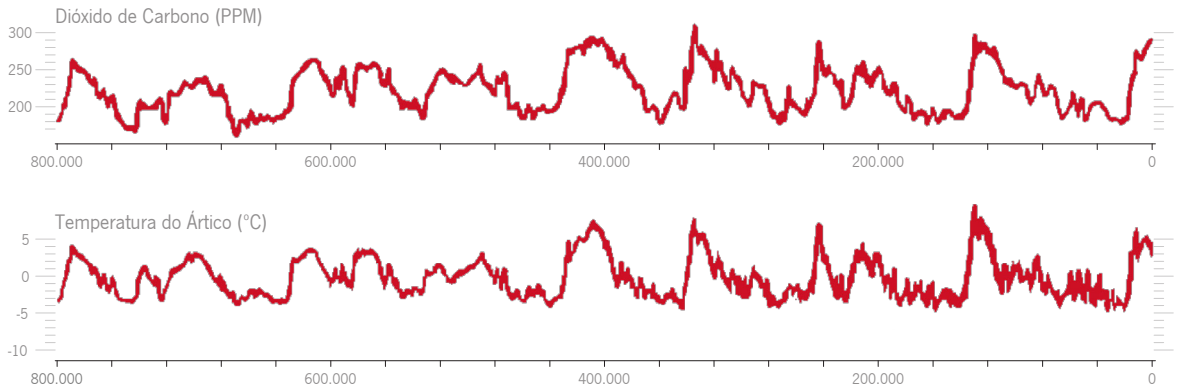
Este enquadramento global revela a urgência de uma mudança estrutural na forma como construímos e pensamos os edifícios. A adoção de soluções industrializadas e pré-fabricadas, como será abordado ao longo desta dissertação, poderá representar um contributo relevante na transição para um setor mais eficiente, resiliente e ambientalmente responsável.

A crescente preocupação com as consequências das ações humanas no meio ambiente tem vindo a reforçar a necessidade de refletir sobre a sustentabilidade. O aumento do consumo de recursos naturais, da poluição e das alterações climáticas tem vindo a impulsionar a procura por novas alternativas que promovam a transição para modelos mais circulares e sustentáveis.

Uma referência importante nesse âmbito é o estudo "*The Limits to Growth*" (Limites para o Crescimento), elaborado por um grupo de pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), a pedido do Clube de Roma em 1970. Este estudo teve como objetivo desenvolver um modelo de simulação do comportamento do sistema terrestre, considerando

Gráf. 3
Extração global de materiais ao longo dos últimos 50 anos


Poluição
Economia
População
Recursos
Valor normalizado
Ano
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
1900
1940
1980
2020
2040
2080


Dióxido de Carbono (PPM)
300
250
200
800.000
600.000
400.000
200.000
0
Temperatura do Ártico (°C)
5
0
-5
-10
800.000
600.000
400.000
200.000
0

variáveis como industrialização, crescimento populacional, uso de recursos naturais e impactos ambientais. Para concretizar essa análise, a equipa utilizou o modelo computadorizado conhecido como *World3*, que integrava diversas fontes de dados estatísticos, incluindo informações sobre recursos naturais, produção industrial, padrões de consumo e níveis de poluição, e permitia simular cenários futuros de acordo com diferentes estratégias de desenvolvimento. O estudo destacou que, se os atuais padrões de crescimento se mantivessem, o sistema terrestre poderia atingir os limites de suporte nas próximas décadas, evidenciando a necessidade de mudanças profundas na utilização de recursos.

Peter van Assche (2019) retoma este debate na sua palestra *Architecture and Circular Thinking*, sublinhando que os "*Models of Doom*" não devem ser interpretados apenas como premonições pessimistas, mas como alertas valiosos sobre a trajetória do nosso sistema socioeconómico. O modelo evidencia, de forma clara, como o comportamento humano, influencia profundamente os limites do planeta.

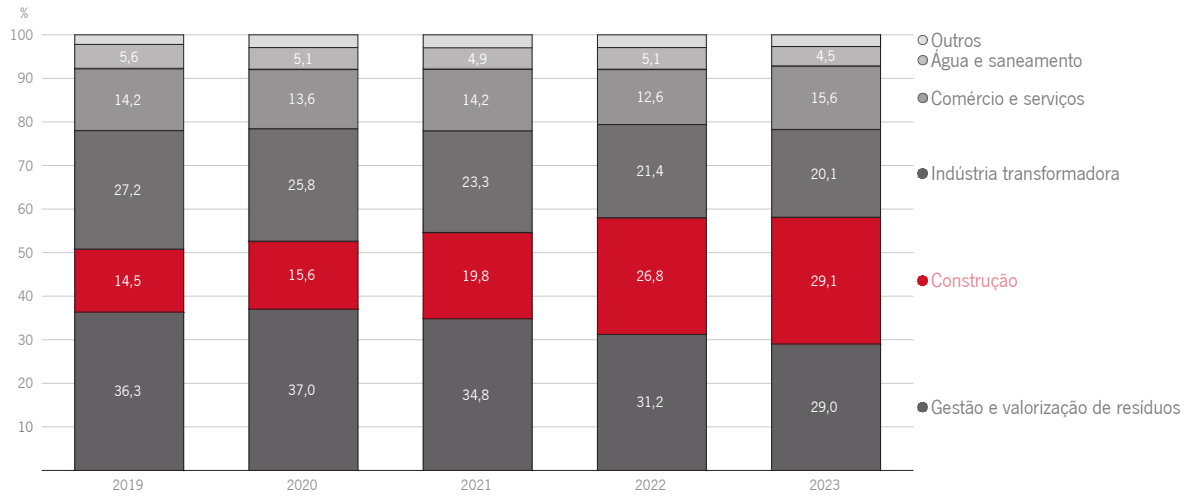
Gráf. 4
Models of Doom apresentados na palestra *Architecture and Circular Thinking* de Peter van Assche

O gráfico 4 mostra como a poluição, a economia e a população crescem até chegarem a um ponto de rutura. Ao mesmo tempo, os recursos naturais vão diminuindo de forma contínua. A linha contínua representa o que aconteceu com base nos dados reais. A linha tracejada mostra o que pode acontecer se não forem tomadas medidas para reduzir a poluição e o uso de combustíveis fósseis. Já num cenário em que a humanidade age, os resultados apresentam melhorias significativas e o colapso pode ser evitado.

Por fim, uma análise crucial apresentada por Assche (2019) envolve o gráfico paleoclimático, apresentado à direita, que correlaciona a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera e a temperatura na Antártida. Este gráfico demonstra de forma clara a intrínseca ligação entre o aumento das concentrações de CO_2 e o aquecimento global.

Gráf. 5
Gráfico paleoclimático correlacionando CO_2 e temperatura na Antártida

Em Portugal, o setor da construção mantém-se amplamente assente em métodos construtivos convencionais, com forte predominância de sistemas em alvenaria, quer de tijolo, quer de pedra, e na utilização generalizada do betão (Branco, 2013). Este tipo de soluções construtivas, que marcam a paisagem edificada do país desde o século XIX e, sobretudo, ao longo do século XX, continua a ser a opção mais adotada, tanto em obras novas como em intervenções de reabilitação. A execução destes sistemas é realizada maioritariamente no local, ou seja, através de processos construtivos designados como *in situ*, em que grande parte das operações e atividades de construção decorrem no próprio estaleiro de obra.


%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
2019
2020
2021
2022
2023
5,6
14,2
27,2
14,5
36,3
5,1
13,6
25,8
15,6
37,0
4,9
14,2
23,3
19,8
34,8
5,1
12,6
21,4
26,8
31,2
4,5
15,6
20,1
29,1
29,0
Outros
Água e saneamento
Comércio e serviços
Indústria transformadora
Construção
Gestão e valorização de resíduos

O sistema construtivo *in situ* apresenta diversos desafios, destacando-se atualmente a crescente falta de mão de obra no setor da construção (Couto & Couto, 2007). Outro constrangimento relaciona-se com os atrasos causados por condições climatéricas adversas, como chuva intensa, vento forte ou temperaturas extremas, que podem dificultar ou paralisar determinadas operações em obra. Além disso, a dependência da logística de fornecimento de materiais e equipamentos de entidades externas, torna o sistema vulnerável a falhas ou atrasos (Brusselaers, et al, 2022). Acresce ainda o facto de este tipo de sistema ser mais propenso à geração de resíduos e desperdícios, devido a erros de execução, seja pelas dificuldades em gerir e armazenar materiais no próprio estaleiro (Smith, 2010).

De acordo com o Instituto Nacional de Estatística (INE) (2024) em Portugal, o setor da construção representa uma das principais fontes de produção de resíduos. Em 2023, este setor foi o que mais contribuiu para a geração de resíduos, responsável por 29,1% do total de resíduos gerados no país, o que corresponde a cerca de 4,4 milhões de toneladas. Este valor traduz um aumento face ao ano anterior, em que a construção representava 26,8% do total de resíduos produzidos, aumentos estes que se tem vindo a verificar ao longo dos anos confirmando uma tendência crescente que reforça a necessidade de sistemas mais eficientes (Gráf. 6).

Esta realidade está fortemente associada aos sistemas construtivos que predominam no contexto nacional, nomeadamente o betão e a alvenaria. Estes sistemas são, na sua maioria, concebidos como estruturas monolíticas e permanentes, não contemplando soluções que permitam a sua desmontagem ou a reutilização dos materiais no final do ciclo de vida. Como consequência, as operações de demolição originam grandes volumes de resíduos que, na sua maioria, têm como destino final os aterros, contribuindo para o agravamento da pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos (Coelho & Brito, 2007).

Gráf. 6
Produção de resíduos por setor em Portugal

1 INTRODUÇÃO

2 PRÉ-FABRICAÇÃO

3 *STRUCTURAL INSULATED PANELS*

4 PROJETO

5 CONCLUSÃO

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente investigação está organizada em cinco capítulos (Fig.2), estruturados de forma progressiva, desde o enquadramento geral da problemática até à aplicação prática do sistema construtivo SIP numa proposta arquitetónica.

O capítulo 1, "Introdução", apresenta de forma sucinta os principais temas abordados na dissertação, bem como os objetivos definidos para o desenvolvimento da investigação. Neste capítulo é ainda realizado um enquadramento do setor da construção, abordando os principais desafios contemporâneos relacionados com o impacto ambiental, o consumo de recursos, as emissões de carbono e a necessidade de adoção de práticas construtivas mais sustentáveis e eficientes. São ainda analisadas as consequências deste modelo construtivo no contexto português. Por fim, é apresentada a estrutura geral da dissertação.

Posteriormente, o capítulo 2, "Pré-fabricação", inicia-se com uma análise comparativa entre a construção pré-fabricada e a construção convencional, considerando aspetos como planeamento, prazos, mão de obra, qualidade construtiva, sustentabilidade, segurança e desempenho global dos sistemas. Paralelamente, aborda a evolução histórica dos sistemas construtivos pré-fabricados e da arquitetura pré-fabricada. São ainda analisados os diferentes tipos de pré-fabricação, identificando as suas principais características. Posteriormente, são abordados diferentes sistemas construtivos pré-fabricados, incluindo *Light Timber Frame* (LTF), *Light Steel Frame* (LST), a pré-fabricação em betão e os *Structural Insulated Panels* (SIP), analisando as suas principais vantagens, limitações e potencialidades construtivas. O capítulo inclui ainda a apresentação de casos práticos desenvolvidos que com recurso ao sistema SIP, permitindo compreender diferentes formas de aplicação deste sistema em contexto real.

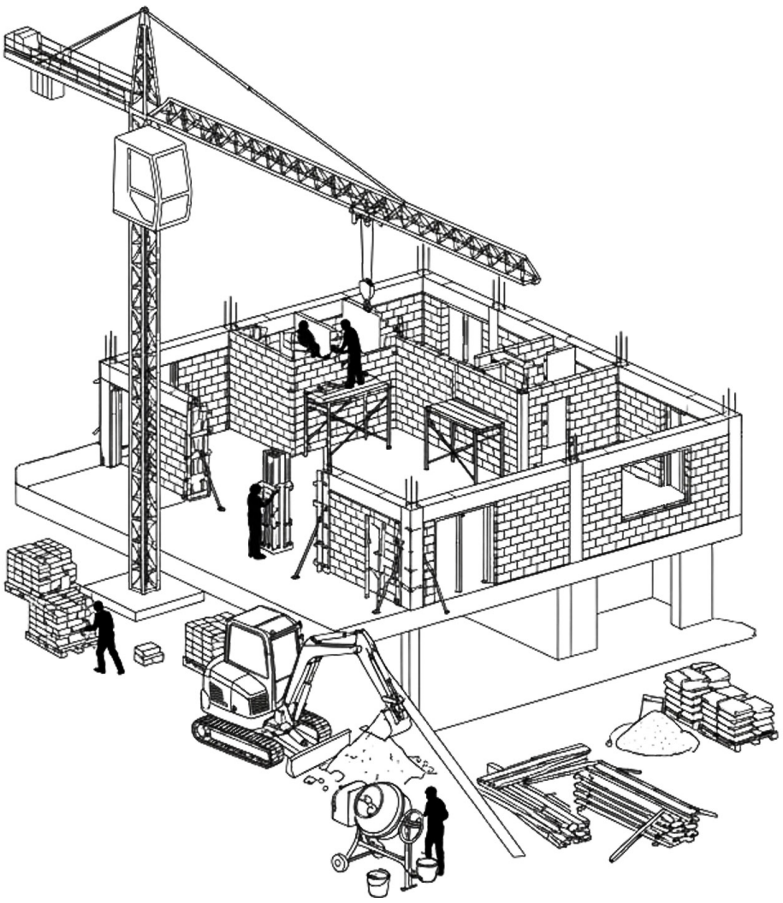
De seguida, o capítulo 3, "*Structural Insulated Panels*", centra-se no sistema SIP, abordando o seu contexto histórico, composição, processo de produção, métodos de montagem e desempenho térmico e estrutural. São também analisadas as suas vantagens, limitações e desafios de aplicação.

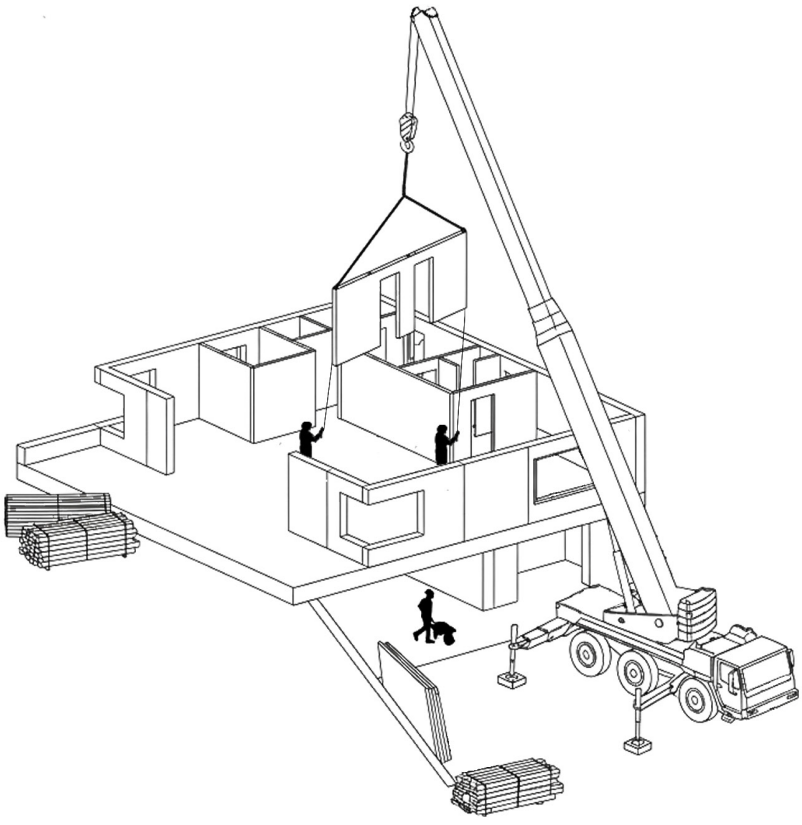
Culminando no capítulo 4, "Projeto", que apresenta o desenvolvimento da proposta de habitação unifamiliar evolutiva, explorando a aplicação do sistema construtivo SIP e as suas potencialidades arquitetónicas e construtivas.

Por fim, o capítulo 5, "Conclusão", apresenta a conclusão da investigação, reunindo as principais reflexões do trabalho, bem como considerações finais sobre o potencial do sistema SIP na arquitetura habitacional contemporânea.

Fig. 2
Estrutura da dissertação

2.
PRÉ-FABRICAÇÃO





COMPARAÇÃO DA PRÉ-FABRICAÇÃO COM CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL

Fig. 3
Estaleiro de construção convencional

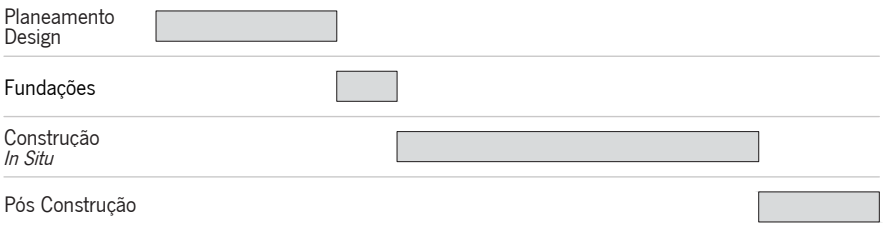
As exigências do setor da construção têm vindo a aumentar, sobretudo no que diz respeito à rapidez de execução, à eficiência económica e à sustentabilidade ambiental. A construção pré-fabricada surge como uma resposta a estes desafios, oferecendo soluções mais controladas, previsíveis e eficientes. A produção em ambiente fabril permite otimizar o uso de recursos, reduzir desperdícios e aplicar sistemas de controlo de qualidade mais rigorosos, garantindo maior precisão e uniformidade nos elementos produzidos.

Apesar destas vantagens, a pré-fabricação continua a enfrentar barreiras de implementação, muitas delas associadas a perceções desatualizadas sobre a sua qualidade, flexibilidade e viabilidade económica. No entanto, a evolução tecnológica e a crescente consciencialização ambiental têm vindo a contrariar essas limitações, reforçando a importância deste método construtivo como alternativa competitiva à construção convencional.

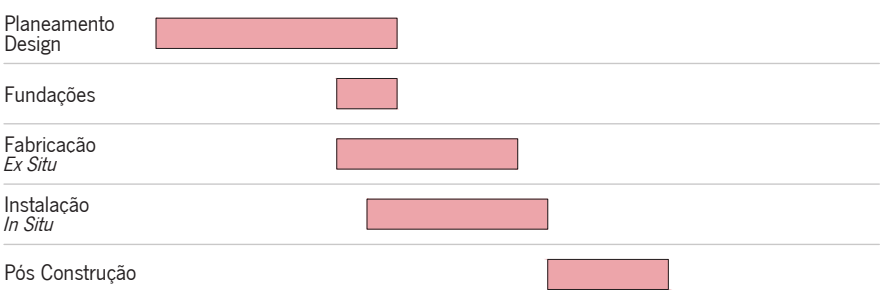
Neste capítulo, será feita uma análise comparativa dos principais parâmetros que distinguem ambos os métodos construtivos, organizados segundo diferentes parâmetros de avaliação: fase de planeamento, custos, condições de segurança, qualidade e sustentabilidade ambiental. Através desta leitura transversal, procura-se compreender de que forma a industrialização do setor da construção pode contribuir para um modelo mais eficiente, seguro e sustentável, sem comprometer a durabilidade e o desempenho das edificações.

Fig. 4
Estaleiro de construção pré-fabricada

Construção tradicional



Construção pré-fabricada



Planeamento

O planeamento é uma das etapas mais determinantes e condicionantes da construção pré-fabricada. Este método implica um aumento significativo das fases de conceção e pré-construção quando comparado com os métodos convencionais *in situ*.

Neste contexto, as equipas de arquitetura e engenharia assumem um papel central, sendo responsáveis pelo desenvolvimento detalhado do projeto antes da fase de fabrico. Esta etapa inclui o planeamento logístico do transporte, montagem e instalação em estaleiro, fatores decisivos para o sucesso do sistema construtivo (Lu & Liska, 2008).

Ao optar por sistemas pré-fabricados, é essencial, desde as fases iniciais, garantir a compatibilidade técnica e construtiva com as restantes especialidades. A introdução tardia ou a falta de articulação podem gerar incompatibilidades, aumentando custos e atrasos (Salih et. al., 2025). Nesse sentido, a reduzida possibilidade de alterações em obra reforça a necessidade de rigor e antecipação no planeamento.

Por outro lado, uma das principais vantagens deste modelo reside na possibilidade de desenvolver o projeto e o fabrico em paralelo com outras atividades de preparação em estaleiro, o que otimiza o tempo global de execução (*National Audit Office* [NAO], 2005).

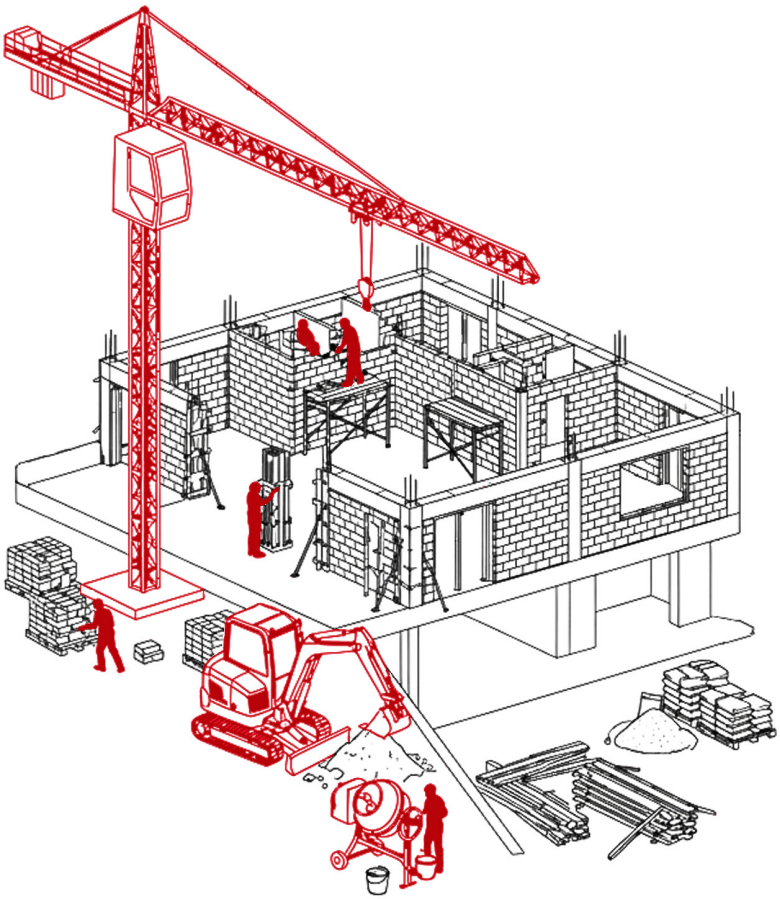
Assim, o planeamento rigoroso e integrado constitui o alicerce da eficiência e da viabilidade da construção pré-fabricada. A sua importância reside na capacidade de articular projeto, fabrico e montagem num processo contínuo e coordenado.

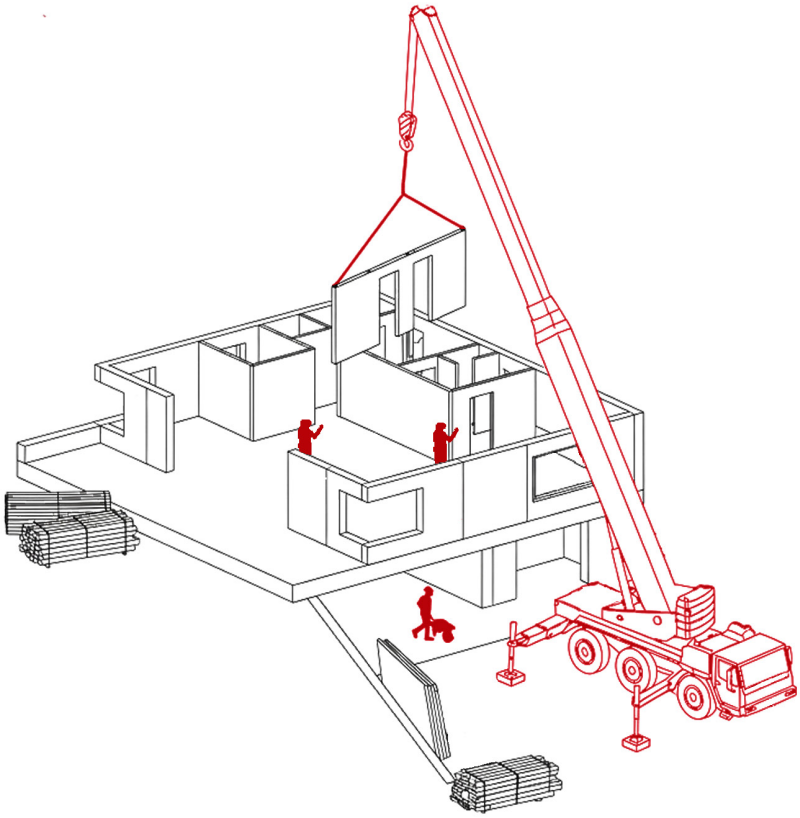
A construção pré-fabricada destaca-se pela sua eficiência temporal, permitindo reduzir significativamente os **prazos de execução** quando comparada com os métodos construtivos convencionais. Esta redução é possível graças à sobreposição entre o fabrico *ex situ* e as preparações *in situ*. Um estudo feito por Navaratnam et. al. (2019) indica reduções de tempo de construção até 40% (Gráf. 7).

O trabalho *in situ* está frequentemente sujeito a interrupções e atrasos devido a condições climatéricas adversas. Em contraste, a pré-fabricação em ambiente controlado é muito menos vulnerável a essas variáveis, garantindo maior previsibilidade e cumprimento dos prazos (Smith, 2010).

Adicionalmente, a celeridade no processo de montagem permite atingir rapidamente a estanquidade do edifício, o que possibilita o início antecipado dos trabalhos interiores.

Gráf. 7
Comparação de tempos de construção entre construção convencional e pré-fabricada





A construção pré-fabricada distingue-se da construção convencional pela redução significativa de **mão de obra** em estaleiro (Fig. 5 e 6). Nos métodos convencionais, é necessária um grande contingente de mão de obra para a execução de múltiplas tarefas manuais. Em contraste, a pré-fabricação centraliza o esforço produtivo em processos mecanizados. Deste modo, as atividades em obra ficam limitadas essencialmente à pré-alocação dos componentes e à sua montagem final por uma equipa reduzida de profissionais (Couto & Couto, 2007).

Apesar da diminuição do número de trabalhadores , a pré-fabricação exige um maior grau de especialização da mão de obra, sobretudo nas fases de montagem, e controlo de qualidade. Os profissionais tendem a adotar um comportamento mais técnico e eficiente, resultante da padronização dos procedimentos e da formação específica exigida por este tipo de sistema construtivo (Couto & Couto, 2007).

Fig. 5
Mão de obra e equipamento necessário em construção convencional

A adoção de sistemas construtivos pré-fabricados implica uma maior dependência de **equipamentos** especializados para o transporte, elevação e montagem dos componentes (Fig. 5 e 6). Ao contrário da construção convencional, em que os materiais são transportados em pequenas quantidades e montados de forma progressiva no local, a pré-fabricação, por vezes, requer o deslocamento e manuseamento de elementos de grandes dimensões e peso. Estas cracterísticas introduzem desafios técnicos e operacionais acrescidos (Lu & Liska, 2008).

A logística de transporte assume, assim, um papel determinante na viabilidade e eficiência global do processo construtivo, influenciando diretamente o planeamento, o custo e o tempo de execução da obra. O método de transporte e o itinerário devem ser definidos desde as fases iniciais do projeto, uma vez que estão sujeitos a limitações de peso, altura e largura, condicionadas tanto por regulamentações rodoviárias como pelas características físicas das vias de acesso, incluindo pontes, curvas apertadas ou restrições de carga.

Alguns fabricantes procuram mitigar estas dificuldades através da integração de gruas e dispositivos de elevação diretamente nos próprios meios de transporte, de forma a aumentar a autonomia nas operações de carga e descarga. Contudo, a adaptação destes equipamentos às condições específicas do terreno e do contexto urbano continua a ser um desafio técnico relevante. Fatores como a topografia do local, o espaço disponível para manobras e as restrições de circulação podem afetar a eficiência e segurança das operações (Costa, 2013).

Fig. 6
Mão de obra e equipamento necessário em construção pré-fabricada

Condições de segurança

A implementação de sistemas construtivos pré-fabricados potencia melhorias significativas nas condições de segurança, tanto do ponto de vista da segurança estrutural como da segurança laboral. Estas duas vertentes complementam-se entre si, traduzindo-se numa redução global de riscos associados às diferentes fases do processo, desde o fabrico dos componentes, o seu transporte e posterior montagem em obra.

A **segurança estrutural** está associada à possibilidade de realização de ensaios não destrutivos sobre as peças produzidas em fábrica, antes da sua aplicação em obra. Este procedimento permite a identificação e correção de eventuais defeitos estruturais ou de fabrico ainda em fase de produção, assegurando que apenas os elementos que se encontram em conformidade com os requisitos de qualidade definidos são integrados no edifício (Couto & Couto, 2007).

De acordo com Couto & Couto (2007) no que diz respeito à **segurança no trabalho**, a construção pré-fabricada representa um avanço significativo quando comparado com o modelo convencional. A redução do número de horas de trabalho em estaleiro traduz-se numa diminuição de probabilidade de ocorrência de acidentes e de exposição a condições adversas. Isto ocorre porque uma parte substancial das tarefas é transferida para o ambiente controlado da fábrica, onde as condições de segurança são, de forma geral, superiores.

Adicionalmente, a mão de obra envolvida na montagem tende a ser mais qualificada e especializada, apresentando um nível de eficiência e consciência de segurança mais elevado.

Outro aspeto relevante é a redução do uso de materiais e equipamentos auxiliares, como cofragens e escoramentos. Ao eliminar ou simplificar estas etapas em obra, a pré-fabricação diminui a exposição dos trabalhadores a condições de risco, reforçando assim, a segurança global do processo construtivo.

Em síntese, a construção pré-fabricada, ao conjugar o controlo de qualidade em ambiente fabril, a mecanização de processos e a qualificação de mão de obra profissional, estabelece um novo paradigma de segurança na construção. Neste contexto, a eficiência técnica e o bem-estar dos trabalhadores passam a ser entendidos como dimensões complementares e indissociáveis.


Desempenho
Durabilidade
Requisitos
de Qualidade
Custo de Ciclo de Vida

Qualidade

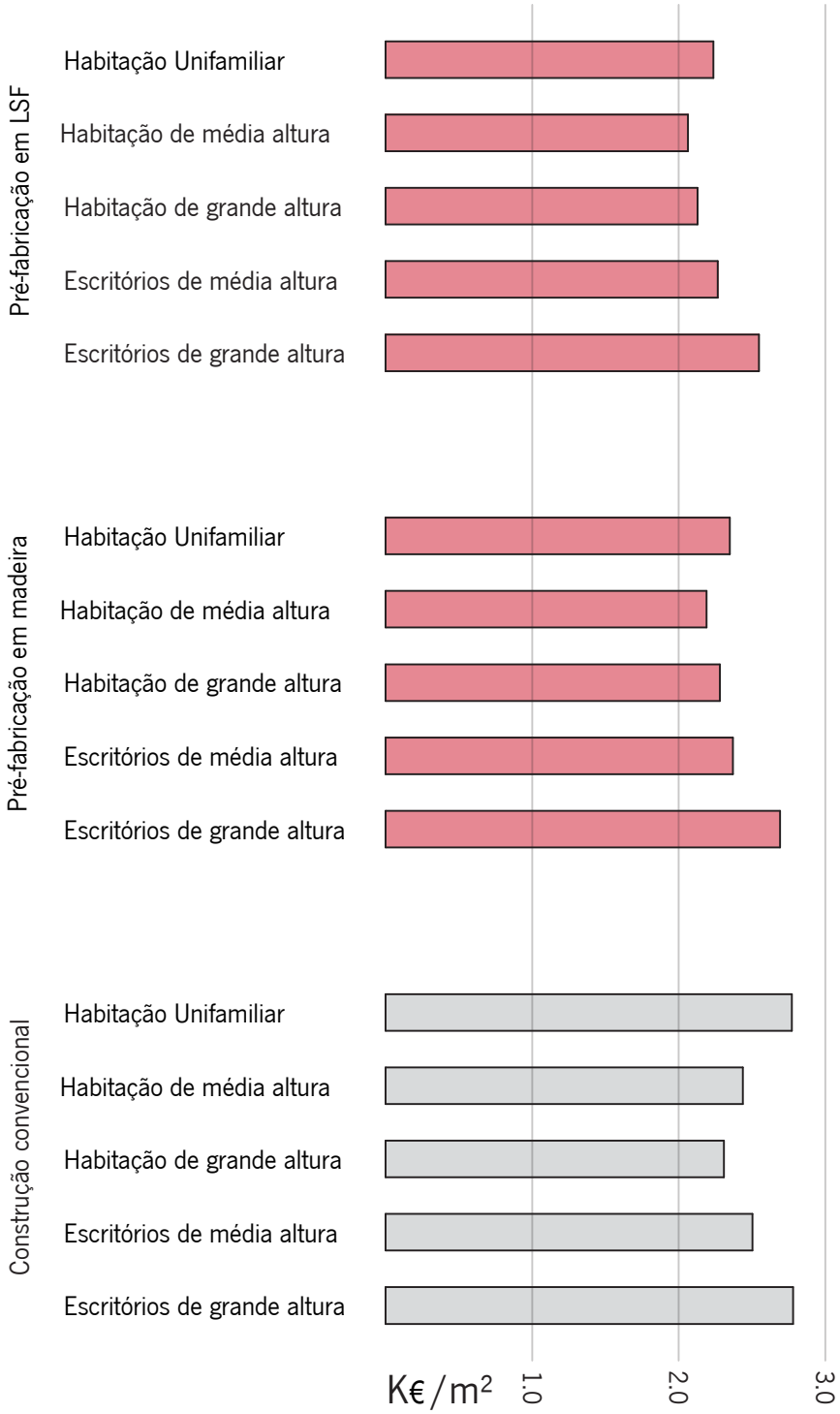
A utilização de métodos construtivos pré-fabricados levanta questões relativas à durabilidade, custo e desempenho das edificações quando comparados com a construção convencional (NAO, 2005). Apesar dos avanços tecnológicos e do maior controlo de qualidade proporcionado pelos processos industriais, a perceção pública, ainda associada a soluções económicas e temporárias do período pós-guerra, continua a influenciar a avaliação destes sistemas (Smith, 2010).

Atualmente, o fabrico em ambiente controlado permite maior precisão e supervisão rigorosa, mitigando falhas e assegurando que os elementos estruturais resistam adequadamente às exigências do fabrico, transporte, montagem e utilização (Smith & Quale, 2017). No entanto, tal como acontece com qualquer método construtivo, é fundamental considerar o comportamento em serviço, a manutenção ao longo do ciclo de vida e o desempenho estrutural, especialmente no que respeita às ligações entre os componentes, que assumem um papel determinante na estabilidade global da estrutura (Couto & Couto, 2007).

Em suma, três questões emergem ao avaliar edificações pré-fabricadas face aos métodos tradcionais (NAO, 2005):

- Custo do ciclo de vida: implicará custos de manutenção comparáveis?
- Durabilidade: terá a construção a mesma vida útil que um edifício convencional?
- Desempenho: apresentará comportamento estrutural e funcional equivalente ao longo do tempo?

Fig. 7
Requisitos de qualidade


Pré-fabricação em LSF
Habitação Unifamiliar
Habitação de média altura
Habitação de grande altura
Escritórios de média altura
Escritórios de grande altura
Pré-fabricação em madeira
Habitação Unifamiliar
Habitação de média altura
Habitação de grande altura
Escritórios de média altura
Escritórios de grande altura
Construção convencional
Habitação Unifamiliar
Habitação de média altura
Habitação de grande altura
Escritórios de média altura
Escritórios de grande altura
K€/m²
1.0
2.0
3.0

A avaliação económica dos sistemas construtivos deve considerar os **custos ao longo do ciclo de vida** do edifício.

A análise dos custos associados à construção pré-fabricada revela um potencial de redução dos encargos globais, resultante da otimização produtiva e menor necessidade de mão de obra em estaleiro. Em comparação com os métodos construtivos convencionais, a montagem mais célere e racionalizada reduz o tempo de permanência de equipas e equipamentos, traduzindo-se em menores custos operacionais (Tavares et al., 2021).

Contudo, o custo final depende do sistema construtivo adotado e das condições logísticas de transporte e montagem dos elementos. Como o transporte é frequentemente assegurado por empresas especializadas, o peso e o volume dos componentes são determinantes. Assim, sistemas em madeira ou *Light Steel Framing* (LSF), por terem menor peso, tendem a ser mais económicos quando comparados com soluções em betão pré-fabricado, que implicam maiores custos de transporte e manuseamento.

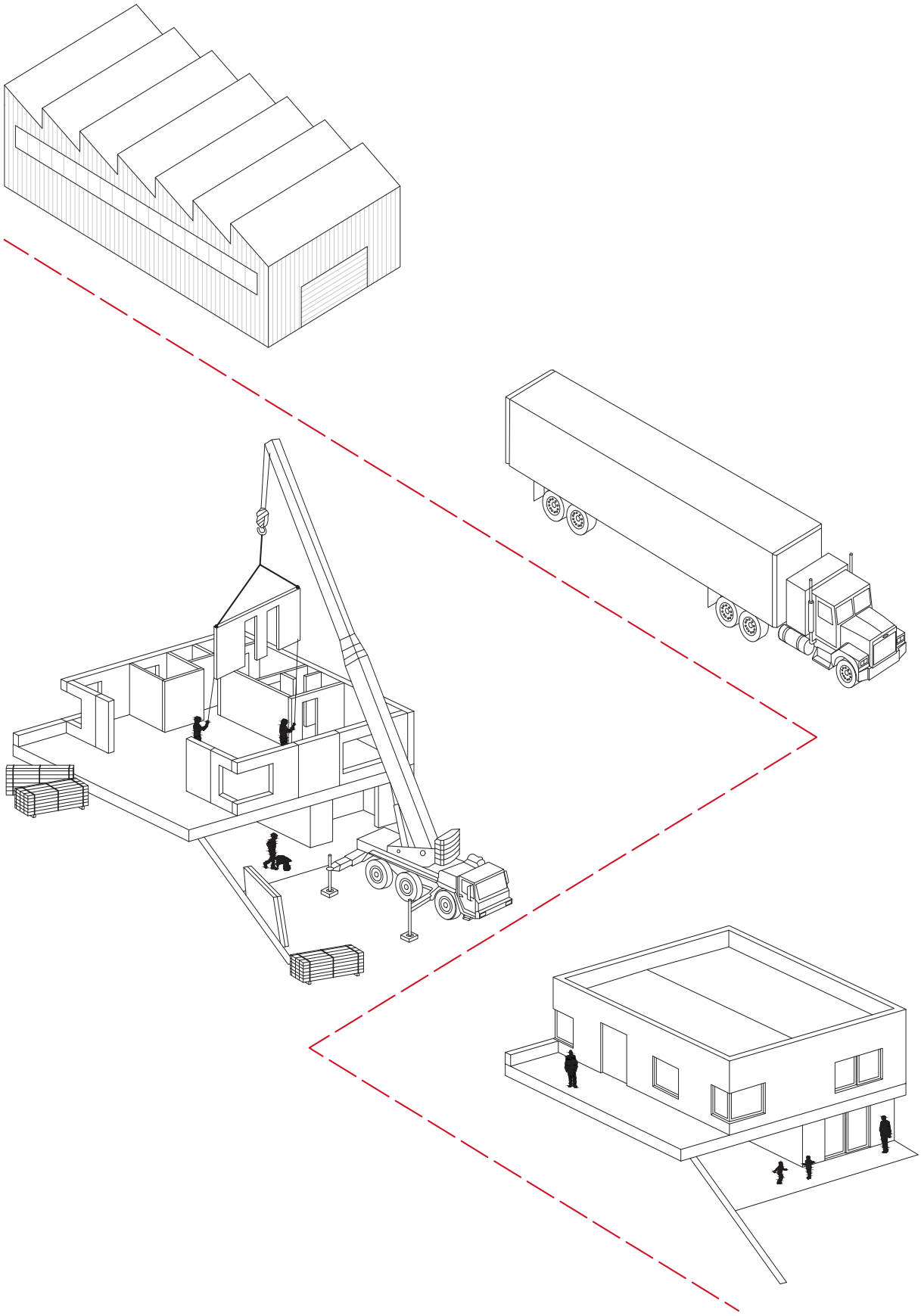
De acordo com um estudo desenvolvido por Tavares et al. (2021), que comparou sistemas de pré-fabricação em LSF e madeira com a construção convencional numa obra em Lisboa, verificou-se que as soluções pré-fabricadas apresentaram custos inferiores (Gráf. 8). Estes resultados demonstram que a industrialização do processo construtivo e a redução das ineficiências em estaleiro constituem uma vantagem económica relevante, sobretudo em contextos urbanos onde o tempo e o espaço de obra são fatores críticos.

No que diz respeito à manutenção, as construções pré-fabricadas não apresentam diferenças significativas relativamente à construção convencional, especialmente no que concerne às estruturas principais. Tal deve-se ao uso de materiais com especificações semelhantes, garantindo níveis comparáveis de durabilidade. Do mesmo modo, os planos de manutenção de elementos secundários, como caixilharias e revestimentos, mantêm-se equivalentes entre ambos os métodos, uma vez que as características técnicas dos componentes são similares (NAO, 2005).

Apesar destas equivalências, a construção pré-fabricada foi historicamente associada a uma imagem de menor qualidade e durabilidade. Esta perceção resulta, em grande parte, das soluções adotadas no período pós-guerra, quando a necessidade urgente de habitação levou à produção em massa de módulos habitacionais económicos e frequentemente temporários. Esta herança condicionou a visão pública e profissional da pré-fabricação, muitas vezes entendida como uma solução provisória. Em contraste, os métodos convencionais, particularmente em betão armado ou alvenaria, foram durante décadas associados a maior solidez e permanência (Smith, 2010).

Gráf. 8

Comparação do custo de ciclo de vida de diferentes tipologistas construídas com pré-fabricados de LSF, madeira e construção convencional



A **durabilidade** é um fator determinante no desempenho de qualquer sistema construtivo, refletindo a sua capacidade de resistir ao desgaste e manter a funcionalidade ao longo do tempo.

A vida útil expectável dos sistemas construtivos pré-fabricados é semelhante à dos métodos convencionais, sendo que os principais componentes estruturais a apresentam uma durabilidade superior a 60 anos, período este frequentemente utilizado como referência no setor para a avaliação do desempenho a longo prazo. Este facto deve-se, em grande medida, à utilização de materiais equivalentes e sujeitos aos mesmos agentes de degradação, independentemente do método construtivo adotado.

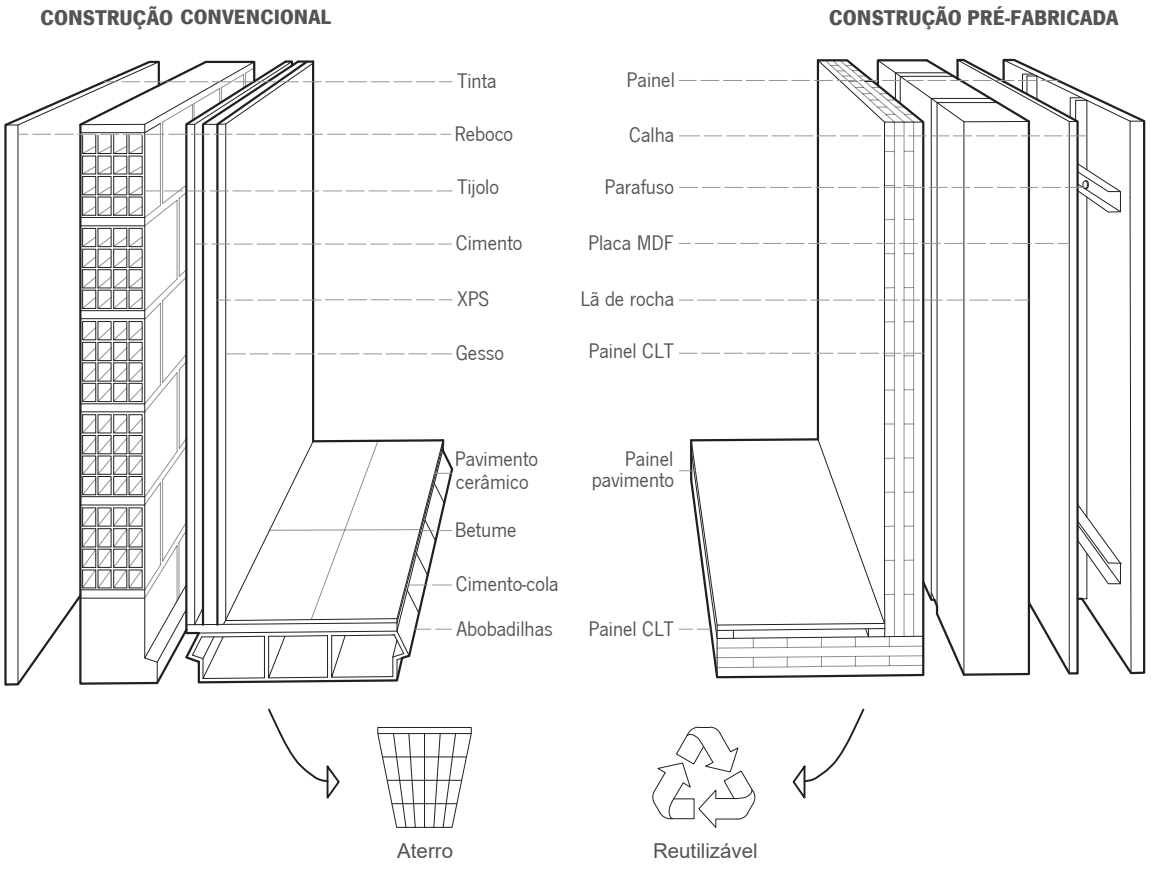
Edifícios em alvenaria, betão e madeira, tem demonstrado a sua resistência e durabilidade ao longo das últimas décadas e, em alguns casos, séculos. Mais recentemente, alguns estudos apontam para a possibilidade de estruturas em LSF atingirem tempos de vida úteil superiores a 200 anos (NAO, 2005).

Atualmente, existem normas e regulamentos técnicos que procuram assegurar o **desempenho** adequado dos edifícios em fase de utilização, independentemente do método construtivo adotado (NAO, 2005). No entanto, um edifício pré-fabricado distingue-se significativamente do observado em construções convencionais, sobretudo devido ao faseamento próprio do processo construtivo.

Na construção pré-fabricada, o desempenho dos elementos deve ser considerado desde a fase de projeto, garantindo resitência não apenas durante a fase de utilização mas também ao longo do fabrico, transporte e montagem (Fig. 8). Cada uma dessas fases impõe condições específicas de esforço, equilíbrio e estabilidade, que necessitam de ser cuidadosamente previstas e controladas (Navaratnam et. al., 2018).

Um dos aspetos mais críticos neste tipo de sistema prende-se com as ligações entre componentes, que assumem um papel determinante no comportamento estrutural global do edifício. A correta transmissão de cargas entre elementos estruturais é essencial para assegurar a estabilidade e segurança da construção. Assim, as ligações devem ser minuciosamente dimensionadas e especificadas em projeto, garantindo a compatibilidade entre materiais, tolerâncias e métodos de montagem, e executadas em obra com elevado rigor técnico (Couto & Couto, 2007).

Fig. 8
Fabrico, transporte e montagem de elementos pré-fabricados


CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL
Tinta
Reboco
Tijolo
Cimento
XPS
Gesso
Pavimento cerâmico
Betume
Cimento-cola
Abobadilhas
Aterro
CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA
Painel
Calha
Parafuso
Placa MDF
Lã de rocha
Painel CLT
Painel pavimento
Painel CLT
Reutilizável

Sustentabilidade

Ao longo das últimas décadas, têm sido implementadas políticas e diretivas internacionais destinadas a regular o impacto ambiental e o desempenho energético dos edifícios, nomeadamente o Acordo de Paris e a Diretiva Europeia dos Edifícios Sustentáveis. Estas iniciativas globais visam promover uma transição gradual para práticas construtivas mais responsáveis, eficientes e ambientalmente conscientes, incentivando a redução efetiva de emissões, a eficiência energética e o uso racional de recursos naturais disponíveis.

Apesar destes esforços, o setor da construção continua a representar uma das atividades com maior impacto ambiental negativo. É responsável por uma parcela significativa do consumo energético mundial, pela exploração intensiva de matérias-primas, pela poluição atmosférica e a geração de desperdícios.

Neste contexto, a construção pré-fabricada tem vindo a afirmar-se progressivamente como uma alternativa viável e ambientalmente mais sustentável face aos métodos convencionais de construção. A industrialização e padronização dos processos construtivos, associada à redução de desperdícios em obra e à otimização do uso de materiais, permite não apenas diminuir a pegada ecológica global do setor, mas também melhorar de forma significativa o desempenho energético dos edifícios ao longo do seu ciclo de vida útil (Navaratnam et. al., 2019).

Adicionalmente, no final deste ciclo, a pré-fabricação revela-se ainda mais sustentável, uma vez que a maioria dos seus componentes podem ser recuperados e reutilizados em novas contruções ou integrados no fabrico de novos produtos, minizando o descarte final e produção de resíduos quando comparado com os processos de demolição associados à construção convencional (Smith, 2010).

A nível europeu, a pré-fabricação tem sido progressivamente reconhecida como um vetor essencial para a transição ecológica no setor da construção, desempenhando um papel estratégico e cada vez mais relevante na concretização das metas ambientais e energéticas delineadas para as próximas décadas.

Um estudo conduzido por Tavares et al. (2021) reforça esta perspetiva, ao evidenciar que a adoção de sistemas pré-fabricados contribui de forma significativa para a redução de resíduos e emissões, consolidando-se como uma solução eficaz e alinhada com os objetivos da transição ecológica no setor.

Fig. 9
Comparação de componentes e ligações entre construção convencional e construção pré-fabricada

A **eficiência energética** no setor da construção deve ser analisada em duas fases distintas, mas complementares: a fase de construção e a fase de utilização. Na primeira, a energia é consumida na produção, transporte e montagem dos componentes; na segunda, corresponde à energia necessária para garantir o conforto térmico, a iluminação e o funcionamento quotidiano do espaço ao longo da sua vida útil.

A construção pré-fabricada apresenta vantagens na **eficiência energética durante a fase construtiva**. O fabrico em ambiente controlado permite reduzir o consumo de energia ao concentrar a produção num único local, minimizar deslocamentos de maquinaria e tempo de permanência em obra. Os processos automatizados e padronizados tendem a ser mais eficientes do que as operações dispersas e sujeitas a imprevistos das obras convencionais, tornando a construção pré-fabricada uma alternativa mais sustentável e competitiva do ponto de vista energético (Couto & Couto, 2007).

A construção pré-fabricada apresenta vantagens no **desempenho energético após a conclusão da obra**, face à construção convencional. Os elementos produzidos em fábrica permitem integrar o isolamento térmico e instalações no interior dos elementos construtivos, garantindo uma maior uniformidade e controlo das propriedades térmicas (Smith, 2010). Este processo é potenciado pela precisão dimensional e redução de pontes térmicas, resultando em paredes mais finas com menores valores de condutividade térmica (U) (Hogan-O'neill, 2021). Em contraste, na construção *in situ*, a impermeabilização e estanquidade dos edifícios é mais difícil de assegurar, frequentemente exigindo quantidades adicionais de materiais para atingir níveis equivalentes de desempenho térmico. Estas limitações podem resultar em maior consumo energético em serviço, refletindo-se tanto no aquecimento como no arrefecimento dos espaços interiores (Costa, 2013).

Assim, os edifícios pré-fabricados tendem a apresentar menor consumo energético ao longo da sua vida útil, evidenciando o contributo da pré-fabricação para a sustentabilidade e redução dos custos operacionais.

A **água**, tal como na energia, apresenta um consumo mais eficiente na construção pré-fabricada quando a produção é realizada em ambiente fabril. O controlo dos processos industriais permite reduzir a quantidade de água necessária à produção dos componentes construtivos, quando comparado com os métodos convencionais executados em obra (Smith & Quale, 2017).

Além disso, a centralização das atividades de fabrico possibilita a implementação de sistemas de reaproveitamento e reciclagem da água, promovendo um uso mais racional deste recurso.

Embora a construção pré-fabricada apresente vantagens ambientais em diversas fases do processo construtivo, o **transporte** dos componentes até ao estaleiro da obra constitui uma das suas principais limitações relacionadas com a sustentabilidade, especialmente na construção modular, onde os elementos são transportados em volumes consideráveis, ocupando frequentemente grandes espaços. Para além do impacto energético associado e, tal como referido previamente, o transporte destes componentes exige um planeamento logístico rigoroso e detalhado, uma vez que as dimensões e o peso das cargas têm obrigatoriamente de respeitar as restrições rodoviárias e urbanas, como limites de altura de pontes, sinalização luminosa, curvas mais apertadas, proibições de circulação por excesso de comprimento ou peso e horários específicos de transporte. Estes condicionamentos obrigatórios impõem percursos mais longos e complexos, podendo resultar num aumento de tempo de transporte e, consequentemente, um acréscimo de consumo energético total das operações (Navaratnam et. al., 2019).

Tais características exigem, por conseguinte, um maior número de viagens e um consumo de combustível superior, reduzindo a eficiência energética global do processo quando comparado com a construção convencional, cujos materiais são geralmente transportados em quantidades menores e de forma mais fracionada.

Adicionalmente, a distância entre as unidades de produção e os estaleiros pode aumentar de forma significativa o consumo energético e as emissões associadas ao transporte (Smith & Quale, 2017). Este impacto assume particular relevância quando se tratam de módulos de grandes dimensões ou elementos mais pesados. Assim, apesar das vantagens em termos de eficiência e de sustentabilidade nas fases de fabrico e montagem, a logística do transporte permanece como um dos pontos críticos na avaliação do desempenho ambiental da construção pré-fabricada, sendo um fator determinante na sua viabilidade global.

O **desperdício de materiais** na construção é significativamente reduzido na construção pré-fabricada, graças à supervisão e padronização dos processos em ambiente fabril. A produção industrial permite uma gestão mais eficiente dos recursos materiais, evitando perdas e desperdícios frequentemente associados aos métodos construtivos convencionais. Além disso, o controlo de qualidade e a repetibilidade dos processos facilitam a separação, reciclagem e reutilização dos resíduos gerados, contribuindo para um menor impacto ambiental e para uma utilização mais eficiente dos recursos (Tenório et al., 2024).

Indicador de sustentabilidade	Resultados da adoção da pré-fabricação
Energia (em construção)	Positivo A construção pré-fabricada otimiza a eficiência energética durante a fase de obra, graças à produção centralizada e controlada em fábrica
Energia (em utilização)	Positivo A construção pré-fabricada assegura melhorias na qualidade dos edifícios, garantindo padrões consistentes de isolamento e instalações. A precisão e o controlo fabril permitem reduzir pontes térmicas e perdas de energia
Transporte	Negativo Apesar das vantagens ambientais da pré-fabricação, o transporte representa limitações significativa, devido às restrições logísticas associadas ao volume e peso das cargas
Água	Positivo A produção em ambiente controlado confere à construção pré-fabricada uma gestão mais eficiente da água, reduzindo o consumo e permitindo o reaproveitamento e reciclagem dos recursos hídricos
Materiais e desperdício	Positivo A construção pré-fabricada permite reduzir significativamente os resíduos, graças ao controlo rigoroso em ambiente fabril é possível otimizar o uso de materiais e evitar desperdícios
Poluição	Positivo A construção pré-fabricada reduz impactos ambientais ao transferir fases intensivas para fábrica, diminuindo emissões, resíduos, ruído e poeiras no estaleiro, além de encurtar a duração da obra
Desconstrução	Positivo A construção pré-fabricada facilita a desmontagem, separação e reaproveitamento dos componentes no final do ciclo de vida, ao contrário da construção convencional

Os processos em ambiente fabril da construção pré-fabricada permitem maior controlo das emissões e da **poluição**. A transferência das fases mais intensivas para a fábrica reduz os impactos no estaleiro, nomeadamente emissões de CO_2, poeiras e produção de resíduos (Kamali & Hewage, 2016).

A redução do tempo de execução em obra constitui outro fator relevante, uma vez que reduz a duração da interferência ambiental local, mitigando os efeitos negativos sobre a ecologia envolvente. Além disso, há uma menor geração de ruído e poeiras, contribuindo para um processo construtivo mais controlado e menos intrusivo (Kamali & Hewage, 2016).

A crescente preocupação ambiental exige estratégias de **desconstrução** que promovam a recuperação e reciclagem de materiais. Neste contexto, a construção pré-fabricada destaca-se pela sua lógica modular, que facilita a desmontagem e a separação dos componentes no final do ciclo de vida do edifício (Navaratnam et. al., 2019).

Ao contrário dos métodos convencionais, onde a demolição implica frequentemente a perda de materiais, a pré-fabricação permite a reutilização de elementos construtivos, que podem ser removidos, inspecionados e reintegrados noutros projetos.

Tab. 1
Síntese qualitativa do desempenho ambiental da construção pré-fabricada

Na tabela 1 apresenta-se uma síntese qualitativa do desempenho ambiental da construção pré-fabricada, organizada segundo os indicadores abordados previamente que permitem avaliar o seu impacto e contributo para a sustentabilidade do setor.

S

- Rapidez de construção;
- Maior previsibilidade de custos e prazos;
- Menos quantidade de energia consumida na fase de construção/utilização;
- Redução do desperdício de materiais e recursos;
- Facilidade no processo de desconstrução;
- Menor impacto do estaleiro no meio ambiente local;
- Aumento da segurança em estaleiro;
- Redução de atrasos em obra.

W

- Mais energia consumida nas operações de transporte dos componentes;
- Custos mais elevados do que a construção convencional, caso não se consigam condições favoráveis de implementação;
- Fragmentação do setor da construção - necessidade de forte coordenação desde as fases iniciais do projeto;
- Impossibilidade ou grande dificuldade de efetuar alterações em estaleiro;
- Necessidade de mão de obra especializada.

O

- Aumento da qualidade dos produtos finais construídos;
- Maior controlo e coordenação ao longo de todos os processos;
- Flexibilidade de soluções, apesar da estandardização dos componentes;
- Aumento da produtividade do setor da construção;
- Edifícios sustentáveis e energeticamente eficientes;
- Participação do cliente e fabricante no processo de conceção - maior acompanhamento.

T

- Aumento dos custos de transporte;
- Falta de legislação específica;
- Falta de conhecimento e formação dos vários intervenientes da indústria da construção na temática da construção pré-fabricada;
- Perceção de edifícios pré-fabricados com fraca qualidade por uma parte dos utilizadores;
- Critério de escolha de soluções baseado essencialmente no preço;
- Receio de mudança por parte de projetistas, empreiteiros e utilizadores.

Análise SWOT

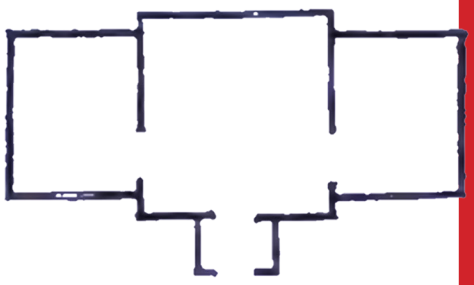
Embora atualmente seja amplamente aceite que a pré-fabricação representa uma direção estratégica para as empresas do setor da construção, esta tecnologia construtiva continua associada a alguns inconvenientes frequentemente associados a aspetos logísticos, bem como a perceção por parte dos utilizadores de que a pré-fabricação está associada a edifícios de menor qualidade. Existem ainda questões que devem ser encaradas como desafios a superar, nomeadamente a ausência de uma legislação específica e a falta de conhecimento técnico, juntamente com o receio de mudança, por parte de projetistas, empreiteiros e utilizadores.

De forma a sintetizar os principais fatores discutidos neste capítulo, é possível realizar uma análise SWOT, ainda que de caráter simplificado, que permita evidenciar os aspetos mais relevantes a considerar.









400 000 AEC

17 88

Abrigos nómadas

The Coalbrookdale Company Bridge

Portable Cottage

Fábrica de linho em Shrewsbury

Tear mecânico

Manning Portable Cottages for Emmigrants

Ferro ondulado

Balloon Frame

Betão armado

Casino de Biarritz

Casas para sinaleiros e porteiros ferroviários

Frederick Winslow Taylor

Henry Ford/Ford T

Aladdin Company

Airstream

Platform Frame

Lustron Company

Biblioteca Sainte-Geneviève

Palácio de Cristal

Quonset Huts/Nissen Huts

Casas móveis

CAD/CAM

EVOLUÇÃO DE SISTEMAS PRÉ-FABRICADOS

Quando se pensa na construção pré-fabricada, é comum associá-la a uma prática recente, impulsionada pela industrialização. Contudo, ao analisar o contexto histórico de uma forma mais abrangente, é possível reconhecer que a procura por sistemas construtivos pré-fabricados acompanha o ser humano desde os primórdios da sua necessidade de abrigo. Desde os primeiros **abrigos nómadas** (Fig. 10), cerca de 400 000 A.E.C, que eram desmontáveis e transportáveis para responder a estilos de vida em constante deslocação (Staib, et. al., 2008). A partir dessas soluções primitivas até às primeiras tentativas de produção modular organizada, a pré-fabricação surge sempre como resposta direta às necessidades económicas, sociais e logísticas de cada período.

Fig. 10
Abrigos nómadas

Neste sentido, esta evolução é posteriormente abordada de forma cronológica, com base em três bibliografias: Staib et. al. (2008), Knaack et. al. (2012) e Smith (2010), que evidenciam a diversidade de abordagens e o desenvolvimento progressivo dos sistemas construtivos pré-fabricados ao longo da história.

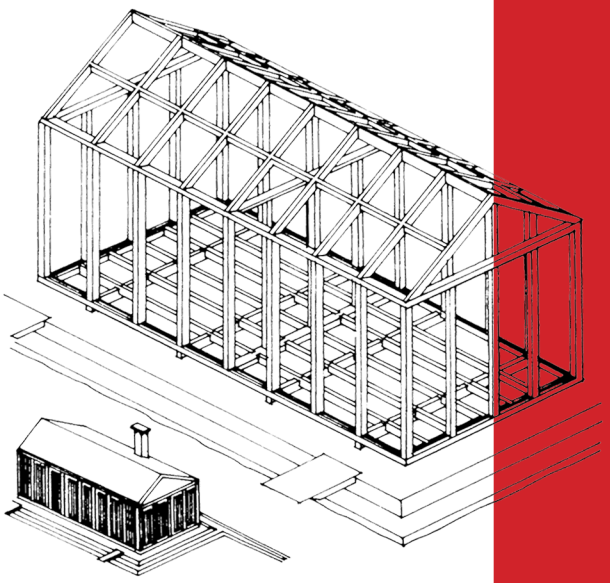
Um dos primeiros registos de construção em fábrica remonta ao ano de 1624, quando casas foram produzidas em Inglaterra e transportadas posteriormente para a aldeia piscatória de Cape Anne, localizada no atual estado de Massachusetts (Arieff & Burkhart, 2002).

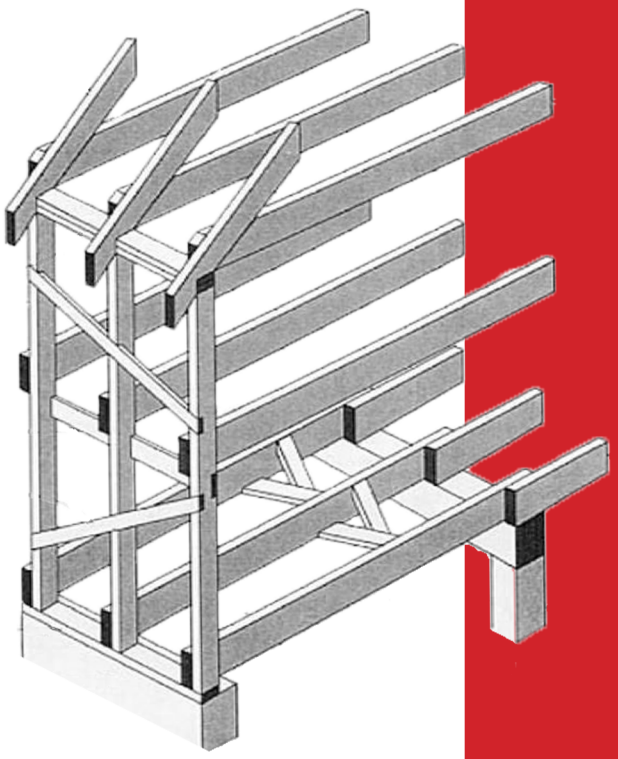
Um dos primeiros exemplos documentados de um sistema construtivo pré-fabricado foi o das ***Portable Cottages*** (Fig.11). Estas estruturas foram concebidas para serem produzidas em fábrica, transportadas e rapidamente montadas noutro local. Em 1788, regista-se a exportação da primeira *Portable Cottage* a partir de Inglaterra, tendo esta sido foi erguida na Austrália em apenas uma semana (Staib, et. al., 2008). As construções eram integralmente realizadas em madeira, incluindo pavimento, paredes e cobertura através de painéis (Herbert, 1978).

Com o passar do tempo e devido à elevada adesão a este tipo de solução construtiva, desenvolveu-se um vasto mercado em torno das *Portable Cottages*. A título de exemplo nos finais do século XVIII, um hospital, um armazém e vários edifícios de pequena escala foram transportados de Inglaterra para Sydney (Herbert, 1978).

Fig. 11
Portable Cottages

Ainda que inicialmente a madeira fosse o principal material estrutural utilizado, a introdução do ferro na construção, a partir da década de 1840, veio substituir progressivamente a madeira como material estrutural neste sistema (Staib, et. al., 2008).







1830

Abrigos nómadas

The Coalbrookdale Company Bridge

Portable Cottages

Fábrica de linho em Shrewsbury

Tear mecânico

Manning Portable Cottage for Emmigrants

Ferro ondulado

Balloon Frame

Betão armado

1833

Casino de Biarritz

Casas para sinaleiros e porteiros ferroviários

Frederick Winslow Taylor

Henry Ford/Ford T

Aladdin Company

Airstream

Platform Frame

Lustron Company

Biblioteca Sainte-Geneviève

Palácio de Cristal

Quonset Huts/Nissen Huts

Casas móveis

CAD/CAM

Durante a década de 1830, o conceito das *Portable Cottages* atingiram maior sofisticação com o sistema desenvolvido pelo carpinteiro londrino John Manning, destinado ao seu filho que emigrava para a Austrália (Smith, 2010). Este modelo, posteriormente designado ***Manning Portable Colonial Cottage for Emmigrants*** (Fig. 12), consistia numa estrutura em madeira com painéis de enchimento e um sistema de montagem pensado para facilitar o transporte e a execução. Segundo Loudon (1839), na *Encyclopedia of Cottage, Farm, and Villa Architecture and Furniture*, a estrutura era formada por postes ranhurados e treliças triangulares onde se encaixavam painéis padronizados. O sistema foi pensado para ser leve e facilmente transportável, permitindo que cada elemento pudesse ser transportado por uma única pessoa, reforçando o seu caráter inovador. Herbert (1972) destaca que

Fig. 12
Manning Portable Colonial Cottage for Emmigrants

> *"...o sistema de Manning antecipou os conceitos essenciais da pré-fabricação, coordenação dimensional e da padronização..."*
> *(Tradução própria)*

uma vez que o sistema se baseava em dimensões uniformes para postes e painéis, podendo ser integralmente montado com recurso a uma ferramenta.

Graças à sua simplicidade construtiva e eficiência logística, o sistema de Manning disseminou-se rapidamente pelas colónias britânicas, nomeadamente na Nova Zelândia e na África do Sul.

Ao passo que as *Portable Cottages* ganhavam protagonismo na Inglaterra, nos Estados Unidos da América passava-se a reconhecer o sistema ***Balloon Frame*** (Fig. 13 e 14). No entanto a história deste sistema não é tão "clara" como o sistema anterior, Woodward (1869) observa:

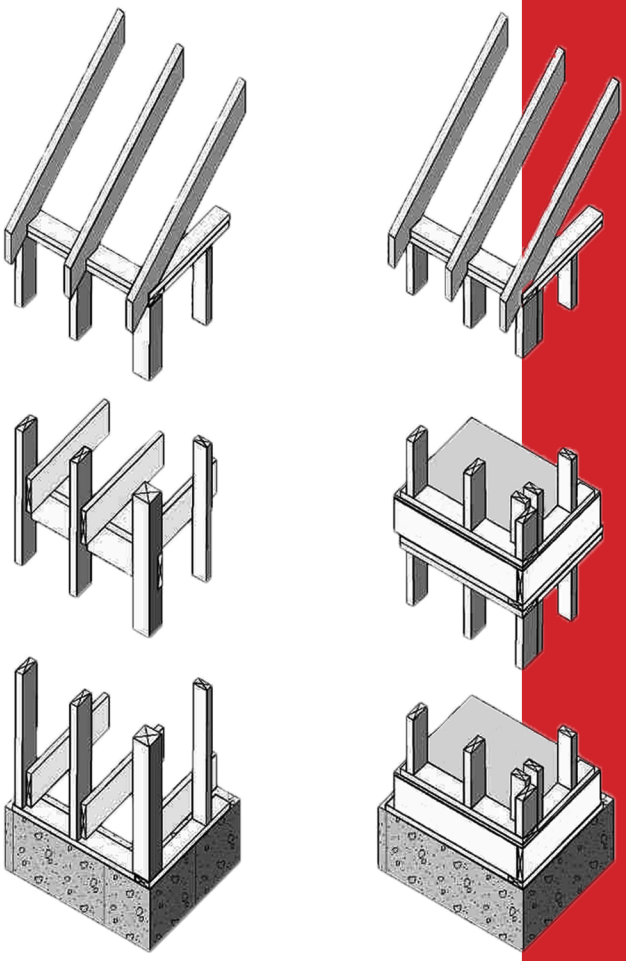
Fig. 13
Ballon Frame

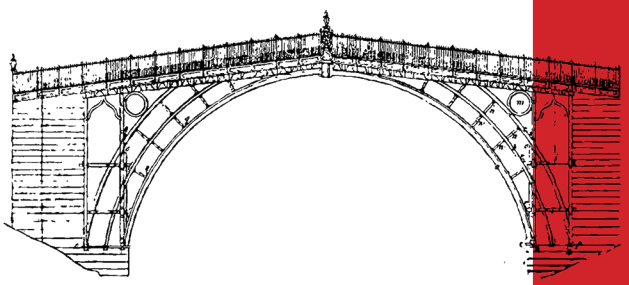
> *"A história do balloon frame é algo obscura, não há nenhum relato autenticado sobre a sua origem... O balloon frame não pertence a ninguém; ninguém o reivindica como invenção"*
> *(Tradução própria)*

Esta afirmação reflete a dificuldade em atribuir a autoria do sistema, cuja origem permanece envolta em incertezas.

De acordo com Field (1942), o carpinteiro norte-americano George Washington Snow foi inicialmente associado à invenção do *Balloon Frame*, embora não existam provas que o confirmem. Em contrapartida, registos indicam que, em 1833, Augustine Taylor utilizou este sistema na St. Mary's Church, em Chicago. Assim, apesar de possíveis experiências anteriores de Snow, o reconhecimento da sua invenção é geralmente atribuído a Taylor.

Fig. 14
Construção em *Ballon Frame*







19

Abrigos nómadas

The Coalbrookdale Company Bridge

Portable Cottages

40

Fábrica de linho em Shrewsbury

Tear mecânico

Manning Portable Cottage for Emmigrants

Ferro ondulado

Balloon Frame

Betão armado

Casino de Biarritz

Casas para sinaleiros e porteiros ferroviários

17

Frederick Winslow Taylor

Henry Ford/Ford T

Aladdin Company

80

Airstream

Platform Frame

Lustron Company

17

Biblioteca Sainte-Geneviève

Palácio de Cristal

Quonset Huts/Nissen Huts

96

Casas móveis

CAD/CAM

O *Balloon Frame* consistia numa estrutura contínua de montantes verticais em madeira, que se estendiam desde a base até à laje superior, atravessando os pisos intermédios. Este sistema surgiu à abundância de matéria-prima e o rápido desenvolvimento industrial, que permitiu a produção em massa de pregos e o surgimento de serrarias (Field, 1942). A simplicidade e rapidez de execução permitiram uma ampla difusão do método, levando à construção de mais de 150 habitações no ano seguinda à construção da St. Mary's Church. Durante a década de 1833 a 1843, grande parte da cidade foi edificada com este sistema, até ao grande incêndio de 1871 (Field, 1942).

O sistema acabou por ser gradualmente substituído, por volta da década de 1940, devido às suas limitações técnicas e às novas regulamentações construtivas nos Estados Unidos. Foi então substituido pelo ***Platform Frame*** (Fig. 15), uma evolução direta do sistema anterior, diferenciando-se apenas pelo facto de os montantes verticais serem interrompidos ao nível de cada piso (Knaack, 2012).

Fig. 15
Balloon Frame vs Platform Frame

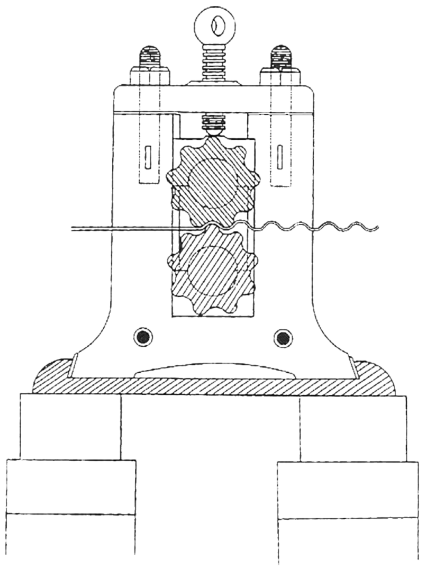
Com o início da Revolução Industrial, o metal de boa qualidade ficou mais acessível e abundante. O ferro e o aço, passaram a ser utilizados como elementos estruturais, abrindo novas possibilidades estruturais e estéticas (Gloag & Brigwater, 2023). Esta evolução permitiu o aumento das dimensões dos edifícios e redução da espessura dos elementos estruturais, transformando profundamente a linguagem arquitetónica (Staib et. al., 2008). Staib et. al. (2008) citam Christian Schädlich:

"a indústria do ferro (...) desempenhou o papel de impulsionadora da industrialização geral da indústria da construção. Ela desenvolveu aqueles elementos das tecnologias industriais relevantes para a construção: desde o desemembramento do produto em grandes elementos, a sua pré-fabricação em fábrica e montagem mecanizada, até à padronização de dimensões e formas para fins de produção em série, e ainda novas estruturas organizacionais no setor da construção."
(Tradução própria)

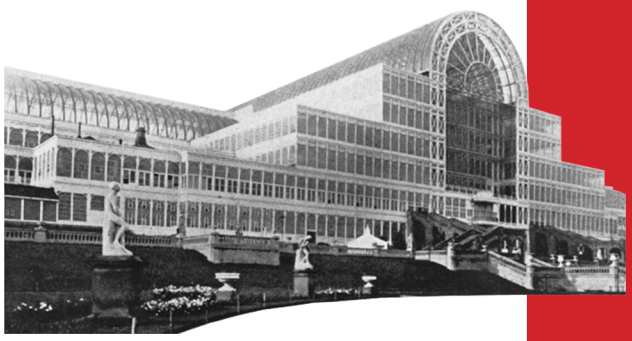
Fig. 16
The Coalbrookdale Company Bridge

Nos primeiros anos da industrialização, o ferro foi sobretudo usado na construção de pontes, destacando-se a ***The Coalbrookdale Company Bridge*** (Fig. 16), erguida entre o final da década de 1770 e o início de 1780. Poucos anos depois, em 1796/97, Charles Bage projetou a **fábrica de linho em Shrewsbury** (Fig. 17), uma das primeiras obras com estrutura interna integralmente em ferro fundido, com colunas e vigas produzidas em série, embora as paredes e pisos fossem ainda em alvenaria (Staib et. al., 2008).

Fig. 17
Fábrica de linho de Shrewsbury









18 00

Abrigos nómadas

The Coalbrookdale Company Bridge

Portable Cottages

Fábrica de linho em Shrewsbury

Tear mecânico

Manning Portable Cottage for Emmigrants

Ferro ondulado

18 50

Balloon Frame

Betão armado

Casino de Biarritz

Casas para sinaleiros e porteiros ferroviários

Frederick Winslow Taylor

Henry Ford/Ford T

18 51

Aladdin Company

Airstream

Platform Frame

Lustron Company

Biblioteca Sainte-Geneviève

19 40

Palácio de Cristal

Quonset Huts/Nissen Huts

Casas móveis

CAD/CAM

No início do século XIX, surgiu uma inovação no domínio dos materiais de construção: o **ferro ondulado** (Fig. 18). Este material revelou-se particularmente eficiente porque possibilitava uma construção rápida, económica , leve e durável, sendo aplicado em coberturas e paredes. A sua introdução marcou uma viragem na conceção de elementos construtivos industrializados. Em 1832, Richard Walker percebeu o potencial do material para exportação, cortando-o em painéis de cerca de 60 x 90 cm, dimensões facilmente transportadas e manuseadas por uma única pessoa. A partir de 1837, as empresas começaram a aplicar processos de galvanização no metal para evitar a corrosão e prolongar a vida útil dos elementos (Smith, 2010).

Fig. 18
Ferro ondulado

Em conjunto com as *Manning Portable Cottages*, o sistema desenvolvido por Walker representou um dos primeiros modelos de construção pré-fabricada híbrida que combinava madeira e ferro (Smith, 2010). Esta combinação permitiu explorar novas lógicas construtivas, tornando as edificações mais leves e fáceis de montar, embora a sua aplicação em climas subtropicais tenha revelado limitações devido à reduzida capacidade de isolamento térmico destas soluções (Knaack et. al, 2012).

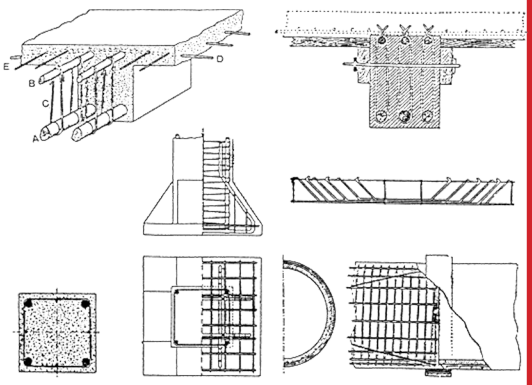
O auge da construção em ferro ocorreu em meados do século XIX, período marcado por obras emblemáticas que consolidaram o material como símbolo de progresso técnico e industrial. Neste cenário, destacam-se dois projetos que evidenciaram o potencial estrutural e expressivo do ferro na arquitetura: a **Biblioteca de Sainte-Geneviève** (Fig. 19), de Henri Labrouste, em Paris, em 1850, e sobretudo o **Palácio de Cristal** (Fig. 20), de Joseph Paxton, para a Grande Exposição de Londres de 1851 edifício que se consolidou como um marco internacional na utilização de elementos construtivos padronizados. A sua estrutura baseava-se num sistema modular e repetitivo de elementos padronizados, permitindo que todo o processo, desde o projeto até à fabricação e montagem, fosse realizado num período de apenas oito meses. A repetição de vãos e o uso de elementos autoportantes facilitaram a montagem indipendente, tornando-a viável mesmo com mão de obra não qualificada (Knaack et. al., 2012).

Fig. 19
Biblioteca de Saint-Geneviève

Fig. 20
Palácio de Cristal

O ferro ondulado teve um papel determinante na difusão de tipologias construtivas de emergência, sendo notável a sua aplicação em modelos como os ***Quonset huts*** (Fig. 21), nos Estados Unidos, e dos ***Nissen Huts***, na Inglaterra, durante a Segunda Guerra Mundial. A rapidez de produção e a simplicidade de montagem tornaram-no adequado para contextos militares e de emergência. A sua versatilidade permitiu uma trasição eficaz entre tipologias funcionais tais como edifícios industriais, armazéns/hangares e até pequenas igrejas inseridas em contextos rurais (Smith, 2010).

Fig. 21
Quonset Huts/Nissen Huts



1850

Abrigos nómadas

The Coalbrookdale Company Bridge

Portable Cottages

Fábrica de linho em Shrewsbury

Tear mecânico

Manning Portable Cottage for Emmigrants

Ferro ondulado

Balloon Frame



1891

Betão armado

Casino de Biarritz

Casas para sinaleiros e porteiros ferroviários

Frederick Winslow Taylor

Henry Ford/Ford T

Aladdin Company

Airstream

Platform Frame



1896

Lustron Company

Biblioteca Sainte-Geneviève

Palácio de Cristal

Quonset Huts/Nissen Huts

Casas móveis

CAD/CAM

Paralelamente à crescente difusão do ferro como material estrutural, emergiu, ao longo do século XIX, um novo método construtivo que viria a alterar, de forma profunda e irreversível, os paradigmas da arquitetura e da engenharia civil: o **betão armado** (Fig. 22). A introdução deste material representou uma transformação significativa na forma de conceber a relação entre resistência estrutural e expressão arquitetónica, permitindo execução de maiores vãos, maior liberdade estética e uma nova abordagem à durabilidade dos edifícios (Moussard et. al., 2018).

A génese deste material remonta às décadas de 1850 e 1860, quando os horticultores franceses Joseph Lambot e Joseph Monier iniciaram experiências pioneiras com a incorporação de armaduras metálicas ao cimento, procurando melhorar a resistência de elementos como floreiras e pequenas embarcações. Estas experiências, embora de caráter empírico, estabeleceram o princípio fundamental do comportamento compósito. Ao conjugar a resistência à compressão do betão com a resistência à tração do aço, definiu-se uma lógical estrutural que viria a tornar-se um dos pilares da construção moderna (Moussard et. al., 2018).

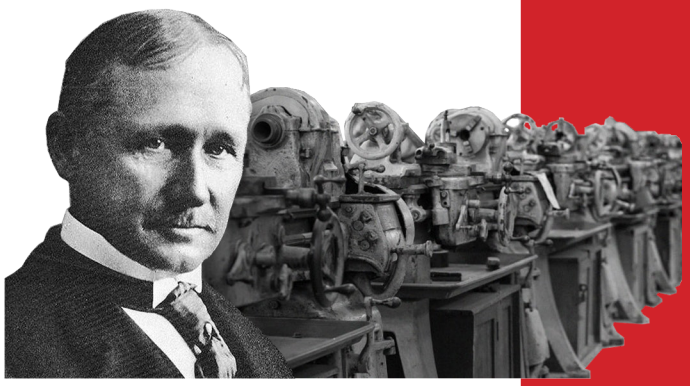
Fig. 22
Betão armado

Contudo, os primeiros exemplos de aplicação prática do betão armado pré-fabricado surgiram apenas algumas décadas mais tarde, impulsionados sobretudo pela iniciativa de empreendedores franceses. Entre eles, Edmond Coignet, destacou-se ao utilizar elementos de betão pré-fabricado na construção do **Casino de Biarritz** (Fig. 23) em 1891 em França. Outro nome de particular relevância foi François Hennebique, que desempenhou um papel determinante na democratização e consolidação deste sistema. Hennebique não só aperfeiçoou, como patentiou o sistema *Béton Armé*, um modelo estrutural modular concebido para a sua produção em massa, baseado na padronização de elementos e racionalização do processo construtivo. Em 1896, aplicou-o na construção de **casas pré-fabricadas destinadas a sinalizadores e porteiros ferroviários** (Fig. 24) (Correia, 2017).

Fig. 23
Casino de Biarritz

No início do século XX, com a rápida expansão territorial dos Estados Unidos para oeste, aliada ao crescimento acelerado decorrente da Revolução Industrial, o setor da construção passou a procurar soluções que fossem simultâneamente mais rápidas, económicamente acessíveis e facilmente reprodutíveis a grande escala. Perante estas exigências, o sistema *Balloon Frame*, previamente mencionado e já amplamente difundido, assumiu-se como modelo de referência. A sua lógica construtiva simples e eficiente possibilitou a produção em massa de habitações pré-fabricadas em madeira, que rapidamente se afirmaram como uma resposta eficaz às necessidades habitacionais emergentes da época (Smith, 2010).

Fig. 24
Casas pré-fabricadas destinadas a sinalizadores e porteiros ferroviários



1911

Abrigos nómadas

The Coalbrookdale Company Bridge

Portable Cottages

Fábrica de linho em Shrewsbury

Tear mecânico



1913

Manning Portable Cottage for Emmigrants

Ferro ondulado

Balloon Frame

Betão armado

Casino de Biarritz

Casas para sinaleiros e porteiros ferroviários



ALADDIN "BUILT IN A DAY" HOUSE
CATALOG, 1917

The Aladdin Company

1918

Frederick Winslow Taylor

Henry Ford/Ford T

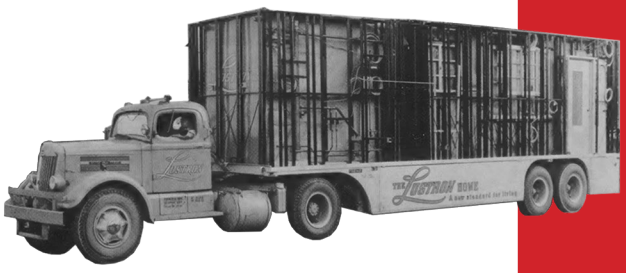
Aladdin Company

Airstream

Platform Frame

Lustron Company

Biblioteca Sainte-Geneviève



1945

Palácio de Cristal

Quonset Huts/Nissen Huts

Casas móveis

CAD/CAM

A 1911, Frederick Winslow Taylor (Fig. 25) apresentou o conceito de *Scientific Management*, mais tarde conhecido como **Taylorismo**. Esta abordagem analisava cientificamente do processo de trabalho, decompondo tarefas em elementos básicos para eliminar desperdícios, otimizar movimentos e aumentar a produtividade através da padronização. Esta visão marcou o início de uma nova forma de encarar o trabalho como um sistema racional e previsível, baseado em métodos científicos de gestão (Staib et. al., 2008).

Fig. 25
Fredrick Winslow Taylor, Taylorism

Em 1913, **Henry Ford** aplicou estes princípios à produção automóvel, introduzindo uma linha de montagem contínua para a fabricação do ***Model T*** (Fig. 26). Cinco anos após a sua primeira tentativa em 1908, Ford conseguiu criar um processo de produção em série que reduzia tempo, custos e necessidade de mão de obra, enquanto aumentava a qualidade do produto final (Correia, 2017).

Como refere Ray Batchelor (1994), o impacto dos princípios de Ford foi notável:

Fig. 26
Henry Ford e a sua linha de produção para o *Model T*

"...mas no mundo mais amplo é vista como uma das ideias-chave do século XX, que alterou de forma fundamental o modo de vida ocidental. As artes — música, literatura, teatro, pintura, escultura, arquitetura e design — foram todas afetadas"

(Tradução própria)

Tal como noutros campos criativos, a arquitetura foi influenciada por Ford, e os arquitetos da vanguarda moderna viram na racionalização, padronização e eficiência da indústria automóvel um modelo para repensar o processo de projeto e construção.

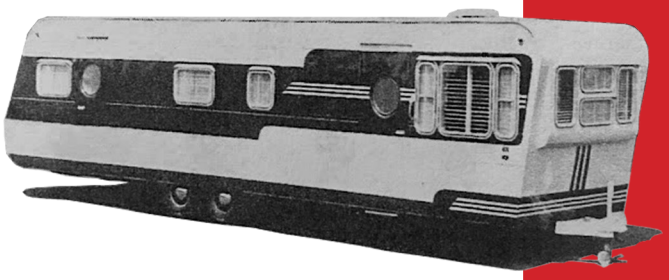
Entre os pioneiros deste conceito destacam-se os irmãos Sovereign, fundadores da ***Aladdin Company*** (Fig. 27), que defenderam a aplicação dos princípios da produção em massa à construção de habitações (Reiff, 2000). Em 1918, introduziram as "*kit homes*", ou casas de catálogo, que podiam ser encomendadas e montadas pelo comprador (Smith, 2010). Sob o lema "*Readi-Cut*", estas casas, eram entregues com todas as peças de madeira previamente cortadas, numeradas e prontas a montar, reduzindo desperdícios, tempo de construção e aumentando a velocidade de produção. O sistema permitia a montagem por qualquer pessoa, munida apenas de um martelo e instruções, de forma rápida e económica (Smith, 2010).

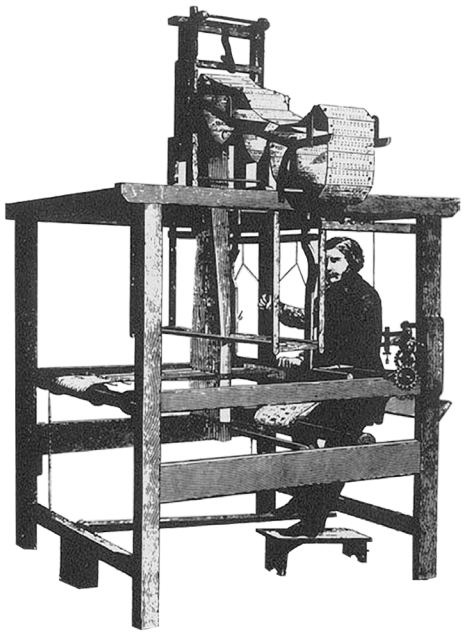
Fig. 27
Aladdin Company

No pós-guerra, com a crescente procura de habitação para os soldados regressados, surgiram várias empresas dedicadas à pré-fabricação. Entre elas destacou-se a ***Lustron Corporation*** (Fig. 28), que produzia casas

Fig. 28
Lustron Corporation









19 29

Abrigos nómadas

The Coalbrookdale Company Bridge

Portable Cottages

Fábrica de linho em Shrewsbury

Tear mecânico

19 50

Manning Portable Cottage for Emmigrants

Ferro ondulado

Balloon Frame

Betão armado

Casino de Biarritz

18 01

Casas para sinaleiros e porteiros ferroviários

Frederick Winslow Taylor

Henry Ford/Ford T

Aladdin Company

Airstream

Platform Frame

Lustron Company

19 50

Biblioteca Sainte-Geneviève

Palácio de Cristal

Quonset Huts/Nissen Huts

Casas móveis

CAD/CAM

inteiramente em aço, tanto no interior como no exterior, recorrendo a antigas fábricas de aviões para a sua produção. O fundador da empresa, Carl Strandlund, levou a analogia com a indústria automóvel ao extremo, utilizando os mesmos processos e materiais. Contudo, a produção revelou-se problemática: muitos dos componentes não se adequavam às dimensões padronizadas das chapas metálicas, o que originava desperdício e dificultava a racionalização do processo. Além disso, as casas apresentavam deficiências térmicas e elevado custo, levando ao encerramento da empresa em 1950, após a construção de cerca de 2.500 unidades (Fetters, 2002).

Fig. 29
Airstream

Os veículos recreativos, como o icónico ***Airstream*** *(1929)* (Fig. 29), surgiram nas décadas de 1920 e 1930 como uma solução transitória, económica e fléxivel para quem necessitava de se deslocar para procura de trabalho. Durante a Segunda Guerra Mundial, estes trailers foram amplamente utilizados como alojamento temporário para trabalhadores migrantes e deslocados (Wallis, 1991) .

Fig. 30
Casas móveis

Durante a década de 1950, a indústria das **casas móveis** (Fig. 30) ganhou expressão. Estas eram produzidas integralmente em fábrica, montadas sobre um chassi metálico com rodas e transportadas por camião até ao local de instalação. Embora concebidas para serem móveis, na maioria dos casos permaneciam fixas, funcionando como habitações permanentes. Em 1968, as casas móveis representavam cerca de um quarto das habitações unifamiliares nos Estados Unidos (Smith, 2010).

Um dos primeiros marcos no desenvolvimento da automação remonta a 1801, quando Joseph Marie Jacquard criou um sistema de cartões perfurados capaz de controlar os padrões de tecelagem de um **tear mecânico** (Fig. 31) sendo considerado uma das primeiras formas de programação aplicada à produção industrial (Smith, 2010).

Fig. 31
Tear mecânico

Com o avanço tecnológico, diversos sistemas de automatização foram surgindo, mas apenas na década de 1950 os computadores começaram a ser integrados nos processos industriais, permitindo o controlo digital de máquinas e inaugurando uma nova era na manufatura (Smith, 2010).

A introdução dos sistemas **CAD/CAM** (*Computer-Aided Design/ Computer-Aided Manufacturing*) (Fig. 32) consolidou o elo entre o projeto digital e a produção física, tornando possível uma precisão sem precedentes e a personalização em larga escala.

A fabricação digital surge, assim, como um método capaz de materializar as promessas da pré-fabricação, unindo eficiência produtiva e elevada qualidade construtiva numa mesma abordagem integrada, com maior precisão e controlo.

Fig. 32
CAD/CAM



Fábrica AEG

1908

Dom-Ino

Maison Citrohan

Usonian Houses

Casa nº17

System Stadrat



Dymaxion House

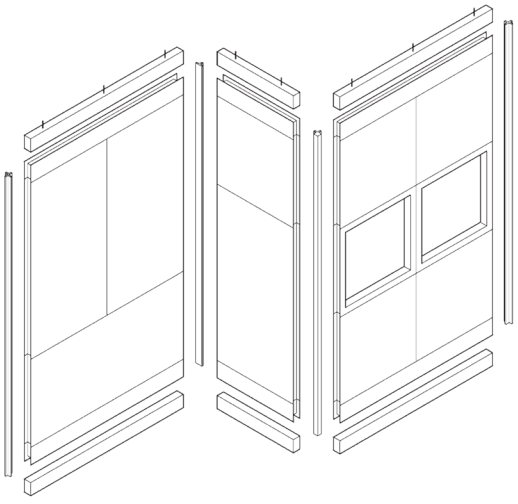
1927

Dymaxion Development Unit

Package House System/ General Panel System

Wichita House

Meudon House



1941

Casa Eames

Maison Tropicale

Habitat Montreal

Nakagin Capsule Tower

ARQUITETURA PRÉ-FABRICADA

A pré-fabricação passou a ganhar destaque ao ser vista como linguagem arquitetónica e não apenas como método construtivo. Esse reconhecimento inicia-se com Peter Behrens, e é desenvolvido nas obras de Walter Gropius, Mies van der Rohe, Le Corbusier e Frank Lloyd Wright (Smith, 2010).

A **Fábrica AEG** (Fig. 33), projetada por Behrens em Berlim a 1908, marcou um ponto de viragem ao expressar a beleza da indústria. Behrens foi também decisivo na formação de Gropius, Mies e Le Corbusier (Smith, 2010).

Fig. 33
Fábrica AEG

Walter Gropius e Konrad Wachsmann, cuja colaboração resultou em algumas das mais relevantes experiências de pré-fabricação do século XX. Gropius, arquiteto que pensava muito como um engenheiro. Já Wachsmann, um arquiteto autodidata com formação em carpintaria, manteve ao longo da sua carreira um interesse constante pela pré-fabricação (Smith, 2010).

Na exposição "*Die Wohnung*", em Estugarda em 1927, Gropius apresentou a **Casa nº17** (Fig. 34), uma experiência com elementos pré-fabricados que utilizava uma estrutura metálica sobre base de betão e painéis de cortiça como enchimento (Staib et. al., 2008).

Fig. 34
Casa n°17

Mais tarde, em 1941, Gropius e Wachsmann desenvolveram o ***Package House System***, um sistema modular em madeira destinado a edifícios de pequena escala, cujos elementos eram ligados por ganchos e cavilhas. O sistema foi aperfeiçoado entre 1943 e 1944, originando o ***General Panel System***, com menos componentes e ligações mais eficientes (Fig. 35). O objetivo era criar (Staib et. al., 2008):

> *"o sistema construtivo pré-fabricado mais completo possível, que pudesse ser montado facilmente no local por trabalhadores sem formação ou experiência prévia, permitindo a construção de qualquer tipo de edifício de um ou dois pisos."*
>
> *(Tradução própria)*

Ao contrário de Gropius e Wachsmann, Mies van der Rohe não demonstrou interesse direto pela pré-fabricação, embora tenha explorado a construção industrializada como recurso arquitetónico. A sua abordagem, influenciada por Behrens, privilegiava a precisão e o rigor construtivo, recorrendo a processos industriais para componentes personalizados, afastando-se da produção em massa. A sua influência na pré-fabricação foi sobretudo estética, marcada pela pureza formal e minimalismo presentes em obras como o Pavilhão de Barcelona e a Casa Farnsworth (Smith, 2010).

Fig. 35
Package House System/General Panel System



Fábrica AEG

19

Dom-Ino

14

Maison Citrohan

Usonian Houses

Casa n°17

System Stadrat



Dymaxion House

Dymaxion Development Unit

19

Package House System/ General Panel System

20

Wichita House

Meudon House

Casa Eames

19

Maison Tropicale



20

Habitat Montreal

Nakagin Capsule Tower

Le Corbusier teve um papel central na formação do pensamento sobre a industrialização da arquitetura, defendendo a produção em massa como resposta às necessidades sociais do seu tempo (Smith, 2010). No livro *Towards a New Architecture* (1923), o arquiteto afirma:

> *"Uma nova era começou; um novo espírito está no exterior do mundo. (...) O problema da habitação é um problema dos nossos tempos; o equilíbrio da nossa ordem social depende da sua resolução. (...) A grande indústria deve abordar a construção e produzir elementos de construção individuais em série. Os requisitos intelectuais para a produção em série devem ser criados."*
>
> *(Tradução própria)*

Fig. 36
Dom-Ino

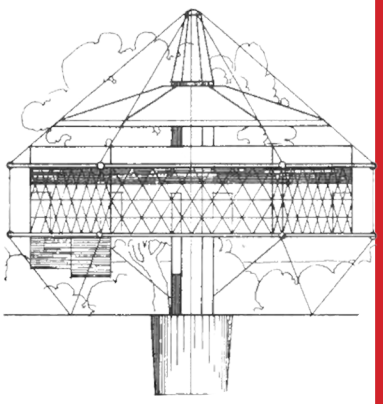
Em 1914, desenvolveu a ***Dom-Ino*** (Fig. 36), um sistema estrutural inovador baseado em lajes planas e colunas de betão armado. Elementos como janelas, portas e armários eram produzidos em série e montados pelos próprios utilizadores (Staib et. al., 2008).

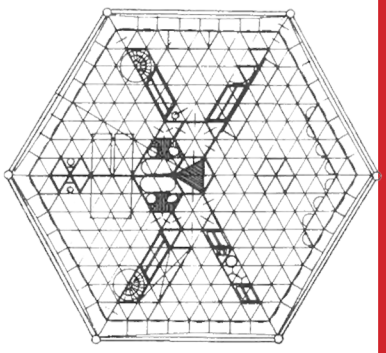
Seguindo a ideia de que "a casa é uma máquina de habitar", projetou em 1920 a ***Maison Citrohan*** (Fig. 37), cujo nome remete diretamente à indústria automóvel, refletindo os ideais de eficiência, racionalidade e repetição (Knaack et. al., 2012). No entanto, a comparação entre a *Maison Citrohan* e um automóvel é algo enganadora. Embora Le Corbusier defendesse a "produção em massa", dificilmente estas habitações eram produtos de fábrica. Nas primeiras versões, a estrutura base consistia em paredes portantes, construídas *in situ* com materiais locais e lajes de betão. Com a introdução dos *pilotis*, passou-se ao betão armado, mantendo-se, contudo, a execução manual de vigas e elementos estruturais. Assim, o conceito de "*maisons en série*" traduz-se mais numa racionalização do processo construtivo em obra do que numa industrialização plena (Davies, 2005).

Fig. 37
Maison Citrohan

Frank Lloyd Wright via a pré-fabricação com ceticismo, acreditando que esta comprometia as qualidades táteis. Ainda assim, em 1916, desenvolveu um sistema construtivo baseado no *balloon framing* e, nas décadas de 1920 e 1930, realizou experiências com estruturas em madeira e aço, mas o elevado nível de detalhe artesanal tornava as suas propostas economicamente inviáveis (Smith, 2010). O seu maior sucesso surgiu com a criação das ***Usonian Houses*** (Fig. 38), concebidas como habitações acessíveis e funcionais, em que em algumas das suas propostas introduziu elementos pré-fabricados e métodos pré-cortados para facilitar a "autoconstrução". Existia também um maior controlo de custos através da repetição de elementos (Correia, 2017).

Fig. 38
Usonian Houses- The Gordon House









1928

Fábrica AEG

Dom-Ino

Maison Citrohan

Usonian Houses

Casa n°17

System Stadrat

Dymaxion House

1940

Dymaxion Development Unit

Package House System/ General Panel System

Wichita House

Meudon House

Casa Eames

1945

Maison Tropicale

Habitat Montreal

Nakagin Capsule Tower

Richard Buckminster Fuller juntamente com Jean Prouvé foram dois dos mais emblemáticos "engenheiros arquitetónicos" do século XX.

Buckminster Fuller, em 1928, criou a ***Dymaxion House*** (Fig. 39), uma habitação de formato hexagonal suspensa sobre um mastro central, concebida para suportar forças de tensão, o que inspirou o seu nome (*DY(namic) MAX(imum) (tens)ION)*. O alumínio, material ainda relativamente recente à época, foi escolhido pela sua leveza, resistência e durabilidade. A casa, com cerca de 2720 kg (aproximadamente o peso de um automóvel da época, ícone da pré-fabricação) (Knaack et. al., 2012), foi pensada para ser rapidamente transportada e montada (Staib et. al., 2008). Contudo, tal como outros projetos pré-fabricados ambiciosos da altura, a Dymaxion House nunca chegou a ser produzida em massa, sobretudo devido ao elevado custo associado ao uso do alumínio (Knaack et. al., 2012).

Fig. 39
Dymaxion House

Fuller continuou a desenvolver soluções inovadoras e, em 1936, projetou uma unidade de instalações sanitárias pré-fabricada para a sua mesma casa (Smith, 2010). Em 1940, perante a ameaça de bombardeamentos durante a guerra, foi contratado para desenvolver o que viria a ser a ***Dymaxion Development Unit*** (DDU) (Fig. 40), uma versão compacta da sua casa original, destinada a situações de emergência. Este projeto baseava-se em silos agrícolas circulares padrão da região, adaptados a novos usos, habitacional e funcional, tendo o exército vindo a encomendar centenas de unidades para servirem como centros de operações de radar. (Staib et. al., 2008).

Fig. 40
Dymaxion Development House

Após a guerra, em 1945, a *Dymaxion House* foi modificada e tecnologicamente aprimorada, dando origem à *Dymaxion Dwelling Machine*, mais conhecida como ***Wichita House*** (Fig. 41) (Knaack et. al., 2012). Com o fim da guerra, a indústria aeronáutica enfrentava dificuldades significativas, com quebra de procura e a uma crise de emprego. Neste contexto, Fuller foi abordado para converter fábricas de aviões em unidades de produção de habitação, mantendo a mão de obra ativa durante a recessão do pós-guerra (Smith, 2010). O projeto foi desenvolvido com uma equipa multidisciplinar provenientes da indústria aeronáutica, tendo sido posteriormente executado pela *Beech Aircraft Company* (Knaack et. al., 2012). A nova versão da Dymaxion House, construída em duralumínio, material proveniente da indústria aeronáutica apresentava planta circular e pesava menos de 3000 kg (Knaack et. al., 2012). Os seus componentes, com menos de 5 kg cada, permitiam o transporte num único camião e a montagem por seis homens em um dia ou por um homem em seis dias (Staib et al., 2008). À semelhança da *Dymaxion House*, a *Wichita House* permaneceu um projeto de caráter experimental e utópico, sem alcançar produção significativa.

Fig. 41
Wichita House







Fábrica AEG

19

Dom-Ino

49

Maison Citrohan

Usonian Houses

Casa n°17

System Stadrat

Dymaxion House

19

Dymaxion Development Unit

50

Package House System/ General Panel System

Wichita House

Meudon House

Casa Eames

19

Maison Tropicale

49

Habitat Montreal

Nakagin Capsule Tower

Jean Prouvé em 1949, recebeu a encomenda de 25 casas pré-fabricadas experimentais, conhecidas como ***Meudon Houses*** (Fig. 42), destinadas a serem permanentes, bem equipadas e economicamente competitivas aos sistemas convencionais, erguidas num subúrbio de Paris (Davies, 2005).

Entre 1949 e 1951, Prouvé desenvolveu também a ***Maison Tropicale*** (Fig. 43), concebida como um protótipo de habitação modular e acessível para as colónias francesas em África. Baseada num módulo de 1 metro, a casa foi projetada para fácil montagem e transporte, sendo enviada em dois contentores. O elemento mais pesado pesava apenas cerca de 100 kg, podendo ser manuseado por dois homens (Knaack et. al., 2012).

Fig. 42
Meudon House

Em 1949, **Charles e Ray Eames** projetaram a própria casa (Fig. 44) em Pacific Palisades, Califórnia, integrada no programa *Case Study Houses*. O casal propôs um sistema construtivo baseado inteiramente em componentes padronizados disponíveis nos catálogos industriais, desde a estrutura metálica até aos painéis e janelas que compunham a fachada.

Embora a casa nunca tenha sido reproduzida, o projeto tornou-se um ícone da aplicação direta dos princípios industriais à arquitetura, representando a maximização da industria da época.

Ernst May, planeador-chefe da cidade de Frankfurt, defendia em 1929 a criação de habitações de subsistência, apartamentos simples, mas com padrões mínimos de qualidade, acessíveis à população trabalhadora de baixa renda (Wolf, 2011). Na sua visão estes apartamentos:

Fig. 43
Maison Tropicale

> *" Devem ser projetados de forma a evitar toda a miséria do passado que os apartamentos para trabalhadores de baixos rendimentos infligiram aos seus habitantes."*
>
> *(Tradução própria)*

Para alcançar este objetivo, May apoiava-se em princípios de produção industrial (Staib, et. al., 2008), argumentando que:

> *"o objetivo deve continuar a ser a habitação produzida em fábrica – incluindo os acabamentos internos – que pode ser entregue como um produto completo e montado em poucos dias"*
>
> *(Tradução própria)*

Foi também responsável pela *Frankfurter Häusfabrik* ("Fábrica de Casas de Frankfurt"), onde desenvolveu o *System Stadrat* (1927), considerado o primeiro sistema alemão de painéis de betão pré-fabricados. O sistema

Fig. 44
Eames House



1967

Fábrica AEG

Dom-Ino

Maison Citrohan

Usonian Houses

Casa n°17

System Stadrat

Dymaxion House

Dymaxion Development Unit



1970

Package House System/ General Panel System

Wichita House

Meudon House

Casa Eames

Maison Tropicale

Habitat Montreal

Nakagin Capsule Tower

distinguia-se pela separação entre paredes e vãos. Era composto por três elementos principais: os painéis de janela (*Fenster-Platte*), os peito (*Brüstungs-Platte*) e de lintel (*Sturz-Platte*), reforçados para suportar cargas superiores. As dimensões reduzidas permitiam uma montagem rápida, possibilitando que a estrutura de uma casa unifamiliar fosse montada em apenas um dia e meio e concluída para habitação em cerca de 26 dias (Staib, et. al., 2008).

Em 1928, os CIAM (*Congrès Internationaux d'Architecture Moderne*), na Declaração de La Sarraz, defenderam a racionalização dos processos construtivos e a padronização como métodos essenciais para uma construção mais económica e eficiente (Staib, et. al., 2008).

Fig. 45
Habitat Montreal

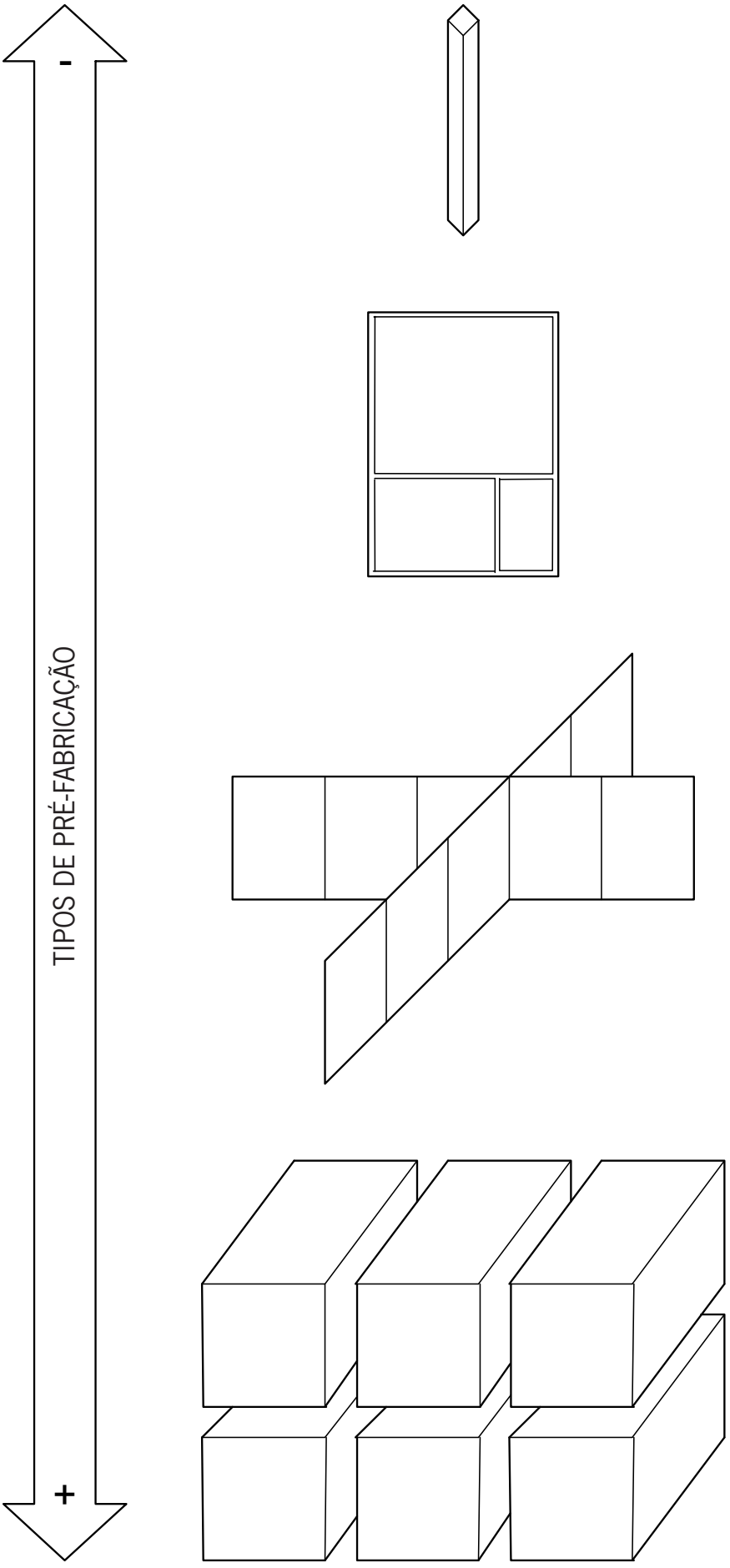
Na Expo Mundial de 1967, Moshe Safdie apresentou o ***Habitat Montreal*** (Fig. 45), composto por 158 habitações formadas por 354 módulos de betão pré-fabricados, distribuídos por 18 tipologias. Contudo, o peso elevado, a complexidade das formas e a necessidade de equipamentos especializados tornaram a construção dispendiosa e difícil, exigindo grandes gruas e muita mão de obra. O projeto ultrapassou o orçamento previsto, levando Safdie a considerá-lo uma falha, e a concluir que a pré-fabricação em habitação em massa ainda não era viável (Smith, 2010). Em *Beyond Habitat* (1970) Safdie refere que:

> *"Estou convencido que ninguém vai conseguir produzir casas em massa até que todo o processo esteja sob uma única estrutura corporativa, e provavelmente um sistema de ligação único também. No entanto, a habitação produzida e fabricada em fábrica é a palavra mágica que está a ser sussurrada como a chave para a salvação. A prática atual é impossível."*
>
> *(Tradução própria)*

Paul Rudolph defendeu que as dificuldades de Safdie não resultavam da pré-fabricação em si, mas sim da escolha dos materiais, que tornava o fabrico e a montagem dos módulos excessivamente complexos (Smith, 2010).

Um exemplo que contraria a visão de Safdie é a ***Nakagin Capsule Tower*** (Fig. 46), projetada por Kisho Kurokawa, construída na década de 1970, em Tóquio. Considerada a primeira edificação de "cápsulas habitacionais", consistia num núcleo central de betão ao qual as cápsulas eram fixadas por quatro parafusos. Cada unidade, totalmente pré-fabricada, chegava ao local com o interior completo, incluindo mobiliário e eletrodomésticos. As cápsulas, podiam ser substituídas ou removidas, podiam funcionar como estúdios individuais ou ser interligadas para formar habitações maiores conferindo ao edifício uma aparência em constante mutação (Staib et. al., 2008).

Fig. 46
Nakagin Capsule Tower


-
TIPOS DE PRÉ-FABRICAÇÃO
+

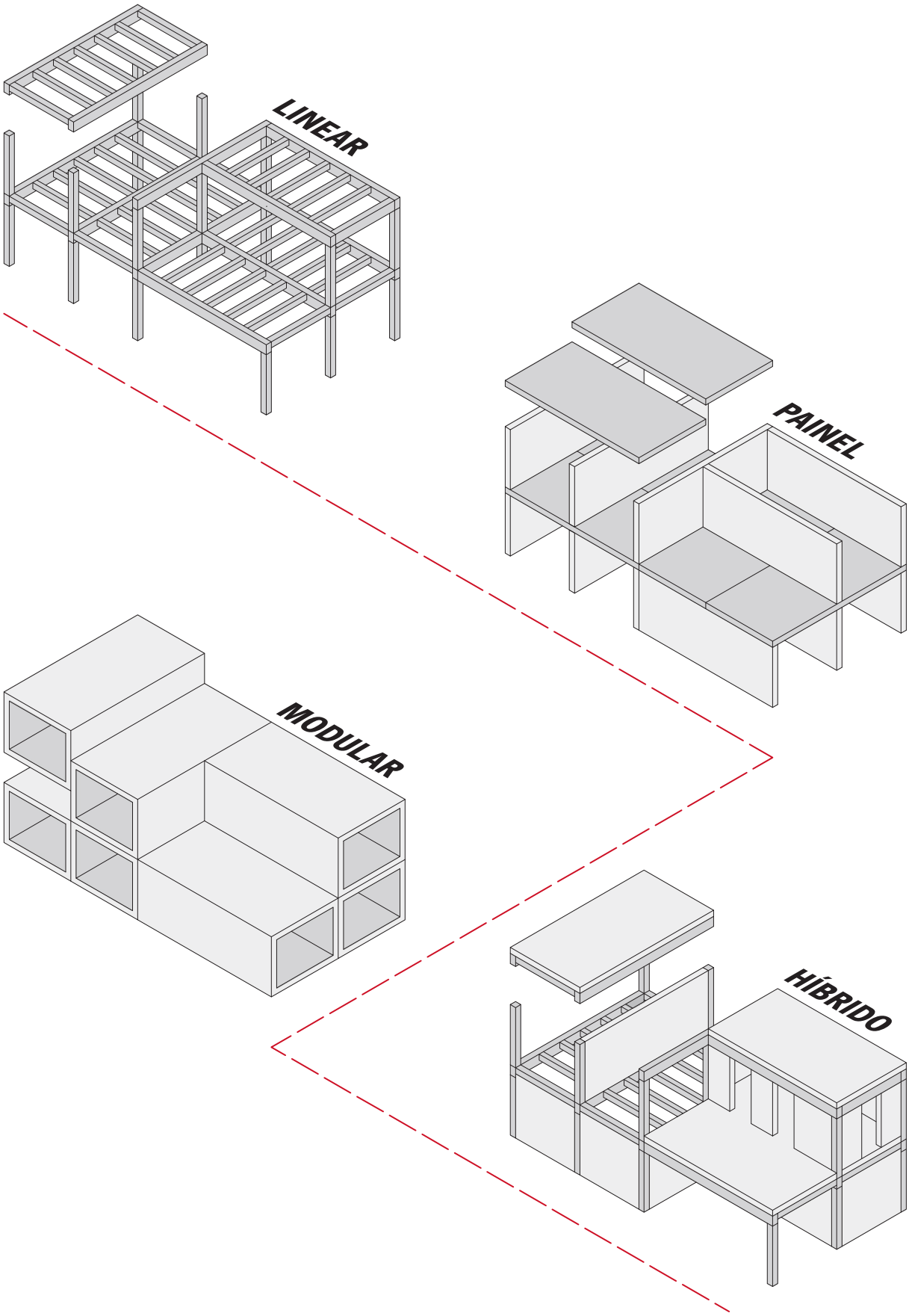
TIPOS DE PRÉ-FABRICAÇÃO

A crescente adoção de sistemas pré-fabricados na construção contemporânea evidencia a diversidade de abordagens que este método integra refletindo diferentes níveis de industrialização. Longe de constituir um método único e homogéneo, a pré-fabricação corresponde a um conjunto de processos distintos que influenciam diretamente o modo como se projeta, se constrói e se organiza o estaleiro.

Neste contexto, torna-se pertinente sistematizar e compreender os principais tipos de pré-fabricação (Fig. 47), nomeadamente os sistemas lineares, em painel, modulares e híbridos.

Importa, no entanto, sublinhar que a escolha do sistema construtivo não é universal, dependendo diretamente das características do projeto, da escala da intervenção e das condições do local de implantação. Fatores como a logística de transporte, acesso ao terreno e disponibilidade de meios de montagem desempenham um papel determinante nesta decisão.

Fig. 47
Tipos de pré-fabricação


LINEAR
PAINEL
MODULAR
HÍBRIDO

A **pré-fabricação linear** (Fig. 48) corresponde ao nível mais básico da construção pré-fabricada, baseando na produção de elementos como pilares e vigas, posteriormente montados em obra. Destaca-se pela facilidade de transporte e manuseamento, devido às dimensões e ao seu carácter repetitivo, embora exija um elevado número de ligações em obra, o que pode aumentar o tempo e a complexidade da montagem.

A **pré-fabricação em painel** (Fig. 48) corresponde a um nível intermédio de industrialização, baseado na produção de elementos planares como paredes, lajes e coberturas, posteriormente montados em obra podendo já integrar várias camadas construtivas. Este sistema permite maior rapidez de execução face à pré-fabricação linear, embora as juntas entre os painéis possam ser visíveis e influenciar a expressão arquitetónica. Em relação a outros sistemas diferentes, como o modular, oferece maior flexibilidade projetual. Ainda assim, implica a realização de ligações em obra, embora em menor número quando comparado com o sistema linear.

Fig. 48
Pré-fabricação linear

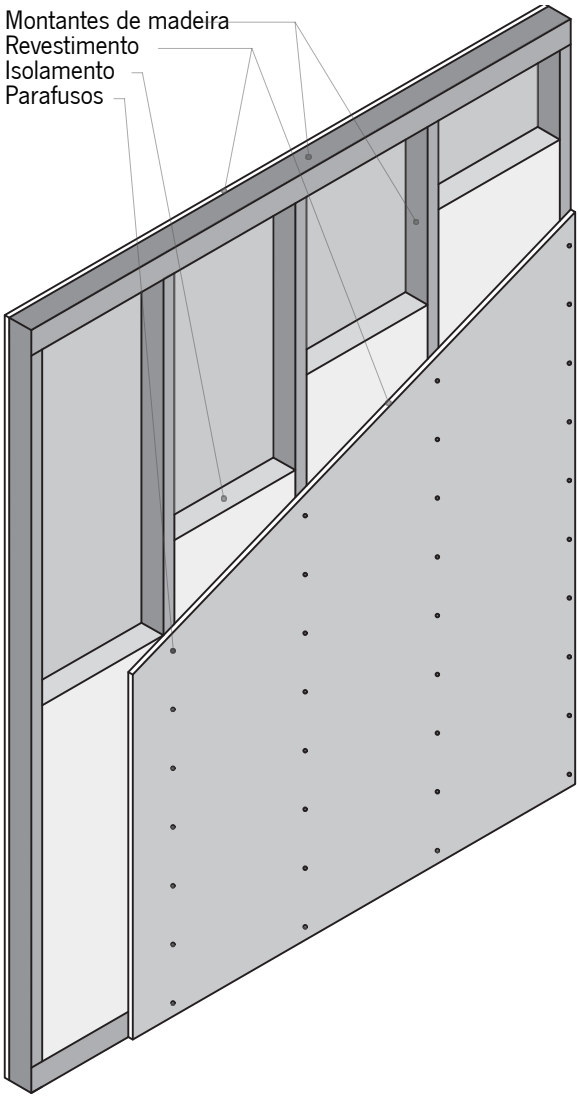
A **pré-fabricação modular** (Fig. 50) representa um nível avançado de industrialização, baseada na produção de módulos tridimensionais completos em fábrica, podendo integrar estrutura, acabamentos, instalações técnicas e até mobiliário fixo, sendo posteriormente transportados para o local e montados com ligações simples. Este sistema permite a redução de tempo de construção em obra, concentrando a maior parte do trabalho em fábrica sendo a montagem no local limitada à colocação e ligação dos módulos. No entanto, as dimensões dos módulos são condicionadas pelas limitações de transporte.

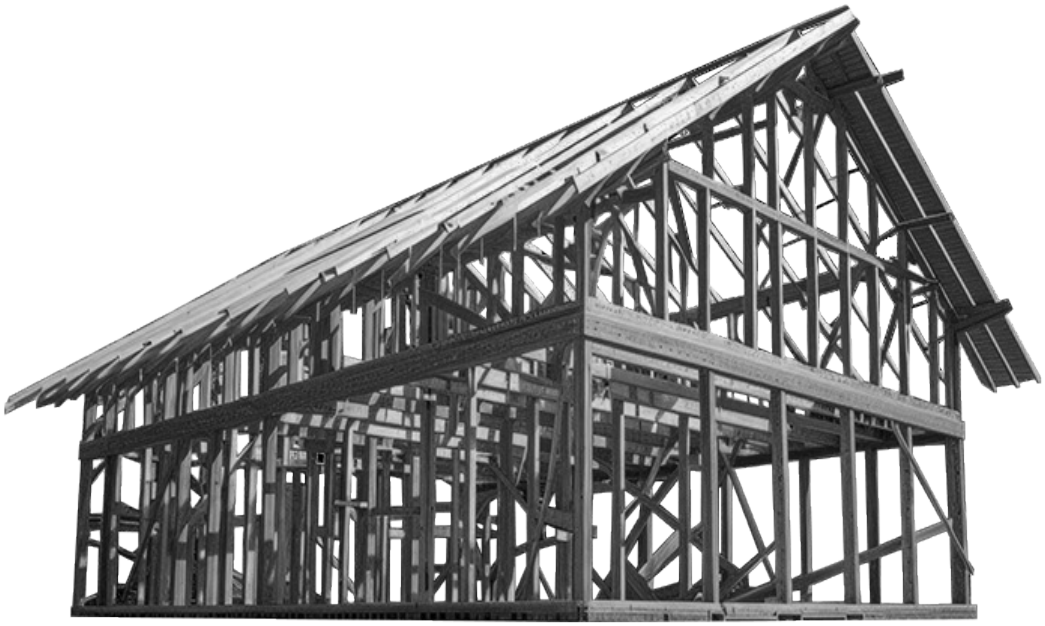
Fig. 49
Pré-fabricação apainelada

O **sistema híbrido** (Fig. 51) resulta da combinação de diferentes modelos de pré-fabricação, articulando sobretudo elementos lineares e planares de forma a tirar partido das vantagens de cada sistema. Os componentes mais simples são produzidos em fábrica, como paredes, lajes ou elementos estruturais, enquanto as partes mais complexas ou específicas são executadas em obra.

Fig. 50
Pré-fabricação modular

Fig. 51
Pré-fabricação híbrida


Montantes de madeira
Revestimento
Isolamento
Parafusos



LIGHT TIMBER FRAME (LTF)

Os sistemas *Light Timber Frame* (LTF) têm sido amplamente utilizados na construção, particularmente em edifícios de baixa altura, devido à sua leveza e reduzido custo (Piloto & Vergara, 2023). Estes sistemas baseiam-se, de forma geral, numa estrutura composta por montantes de madeira, articulados com elementos horizontais superiores e inferiores, aos quais são fixados painéis de revestimento, geralmente placas de OSB ou gesso cartonado, aplicados em ambas as faces (Fig. 52 e 53). No interior da estrutura é normalmente colocado material isolante, o que contribui para o desempenho térmico e acústico do sistema construtivo (Sah et. al., 2024).

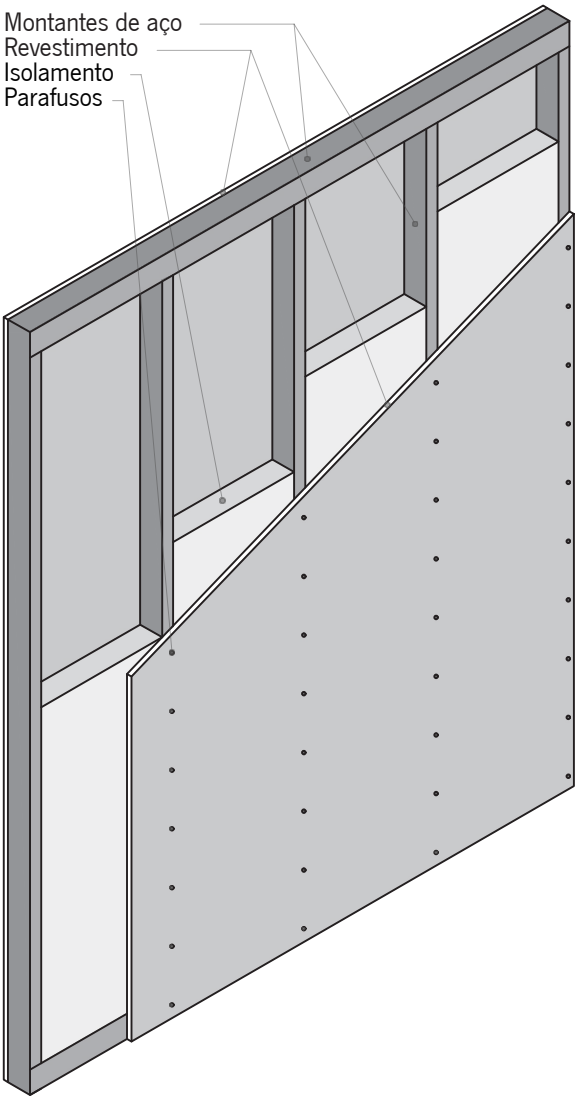
Fig. 52
Painel em *Light Timber Frame*

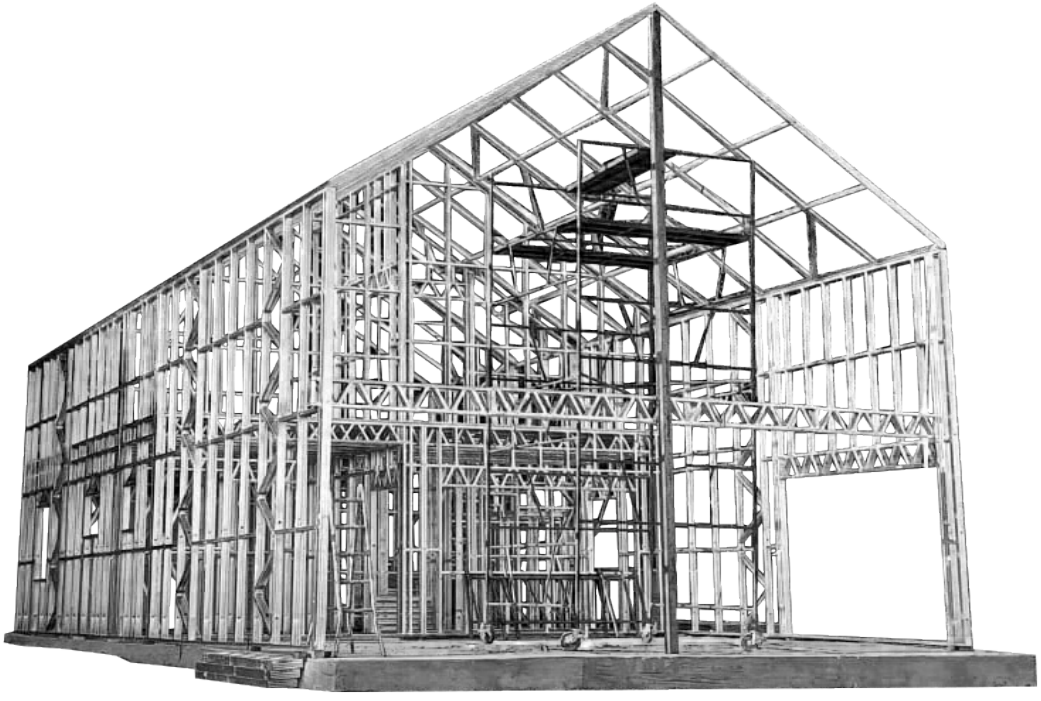
A utilização da madeira, enquanto recurso renovável, confere a estes sistemas vantagens ambientais relevantes, destacando-se em particular, a redução do carbono incorporado e a diminuição do peso global da construção, quando comparados com soluções equivalentes em aço. Além disso, a madeira apresenta facilidade de transformação e permite alguma flexibilidade no processo construtivo (Sah et. al., 2024).

Apesar destas vantagens, existem ainda limitações associadas às propriedades físicas e mecânicas da madeira que condicionam a sua aplicação. Em particular, a sua resistência à compressão perpendicular às fibras e os efeitos de deformação ao longo do tempo restringem o uso de sistemas LTF em edifícios de maior altura (Sah et. al., 2024). Assim, quando utilizados como elementos portantes, estes sistemas são geralmente limitados a construções até cerca de quatro pisos (Piloto & Vergara, 2023). No entanto, quando integrados em estruturas principais independentes, podem ser aplicados em edifícios de média e grande altura como elementos não estruturais (Sah et. al., 2024).

Fig. 53
Construção em *Light Timber Frame*

Contudo, a madeira apresenta vulnerabilidades associadas ao e à degradação por agentes como humidade, fungos ou insetos, o que pode limitar a sua utilização em determinados contextos (Sah et. al., 2024).


Montantes de aço
Revestimento
Isolamento
Parafusos



LIGHT STEEL FRAME (LSF)

O sistema *Light Steel Frame* (LSF) apresenta uma lógica construtiva semelhante ao LTF, distinguindo-se pela substituição dos elementos de madeira por perfis de aço leve. Estes sistemas são compostos por montantes metálicos fixos a guias horizontais, com isolamento térmico no seu interior e revestimentos, aplicados em ambas as faces (Fig. 54 e 55). A sua utilização tem vindo a crescer, em parte devido à rapidez de execução e, em alguns casos, às vantagens económicas associadas (Sah et. al., 2024).

Comparativamente à madeira, o aço oferece maior durabilidade e resistência mecânica (STUDCO, 2019).

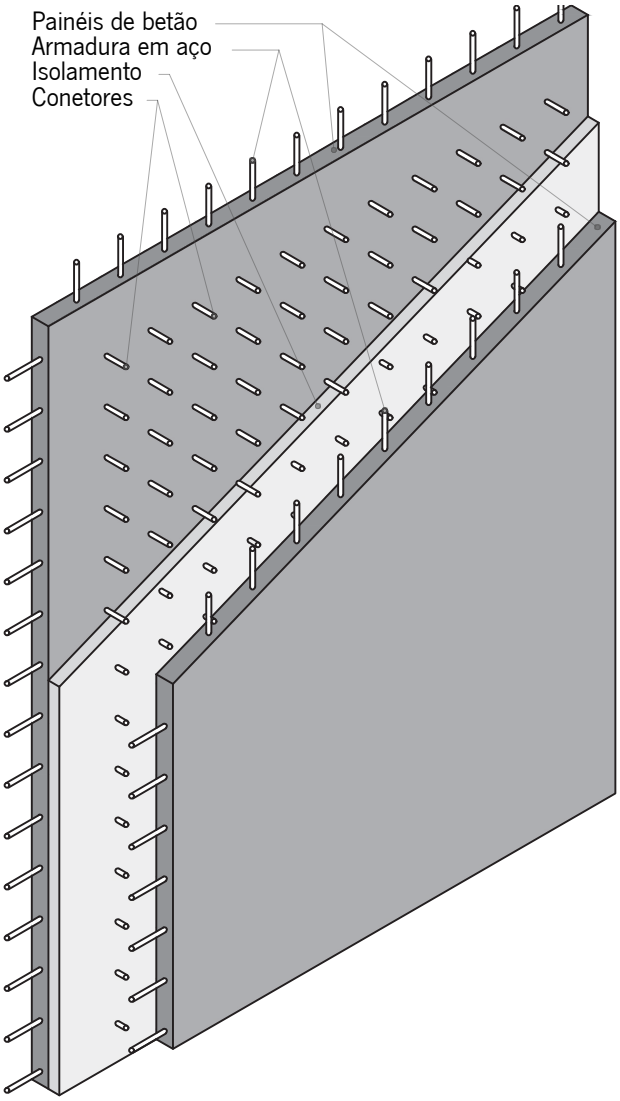
Fig. 54
Painel em *Light Steel Frame*

Entre as principais vantagens do LSF destacam-se a elevada relação resistência/peso, a precisão de fabrico, a facilidade de montagem e a resistência a agentes biológicos, como fungos e insetos (STUDCO, 2019). Estes sistemas são frequentemente utilizados como paredes estruturais em edifícios de baixa e média altura, bem como elementos não estruturais em construções de maior escala. Adicionalmente, o LSF revela grande compatibilidade com processos industriais avançados e automatizados, permitindo elevados níveis de padronização e eficiência produtiva (Sah et. al., 2024).

Apesar das suas vantagens, este sistema apresenta algumas limitações. A exposição à humidade pode originar corrosão nos perfis metálicos e nas ligações, enquanto a elevada condutividade térmica do aço contribui para a formação de pontes térmicas, exigindo soluções complementares de isolamento (Sah et. al., 2024).

Adicionalmente, o comportamento ao fogo pode ser comprometido devido ao aquecimento rápido dos perfis metálicos, o que pode reduzir a sua resistência e rigidez. Para melhorar este desempenho, têm sido, por exemplo, adotadas soluções de revestimento retardador de calor (Sah et. al., 2024).

Fig. 55
Construção em *Light Steel Frame*


Painéis de betão
Armadura em aço
Isolamento
Conetores



PRÉ-FABRICADOS DE BETÃO

O betão pré-fabricado surgiu como uma solução construtiva mais eficiente, rápida e controlada. Inicialmente, muitos destes sistemas eram constituidos por elementos maciços de betão, cuja capacidade de isolamento térmico era limitada. Com o tempo foram introduzidas camadas de isolamento nos elementos pré-fabricados de forma a melhorar o seu desempenho energético. Entre estas soluções destacam-se os *Precast Concrete Sandwich Panels* (PCSP) (Fig. 56), compostos por duas camadas de betão separadas por um núcleo isolante e ligadas através de conetores mecânicos que asseguram o comportamento estrutural do conjunto (Sah et. al., 2024)

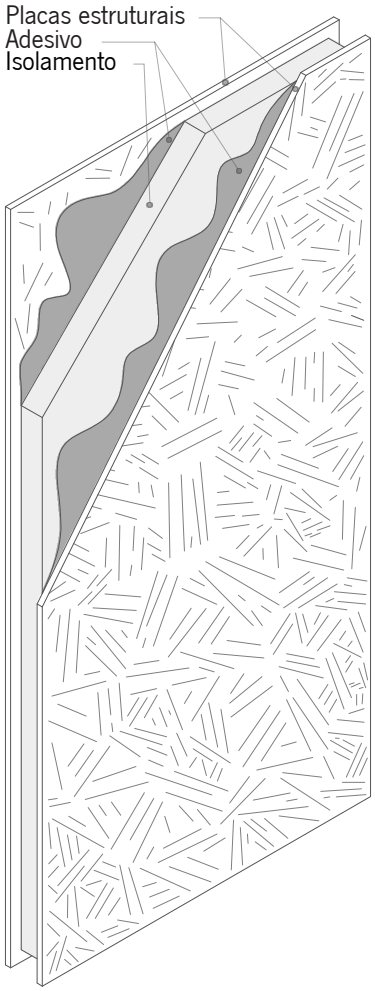
Fig. 56
Painel pré-fabricado em betão

Devido à sua elevada resistência, durabilidade e capacidade de resposta a diferentes ações, estes painéis são amplamente utilizados em fachadas de edifícios, podendo desempenhar funções estruturais ou apenas de envolvente (Fig. 57). O seu peso relativamente elevado constitui, em certos contextos, uma vantagem, contribuindo para um melhor desempenho do edifício face a vibrações (Sah et. al., 2024).

Do ponto de vista térmico, o betão pré-fabricado beneficia da elevada inércia térmica do betão, o que permite atenuar os picos de aquecimento e arrefecimento quando comparados com sistemas mais leves, como LSF ou LTF. Adicionalmente, a incorporação de materiais como cinzas volantes na produção do betão pode reduzir significativamente o impacto ambiental associado (Sah et. al., 2024).

Apesar das suas vantagens, o betão pré-fabricado apresenta alguns desafios, sendo um dos principais a falta de conhecimento acerca deste sistema. Para além disso, questões relacionadas com transporte, montagem e complexidade de execução podem limitar a sua aplicação em determinados contextos. Ainda assim, a evolução tecnológica tem permitido otimizar estes sistemas, tornando-os uma solução cada vez mais eficiente e competitiva no âmbito da construção pré-fabricada (Sah et. al., 2024).

Fig. 57
Construção com painéis pré-fabricados em betão


Placas estruturais
Adesivo
Isolamento


GRADALL

STRUCTURAL INSULATED PANELS

O sistema construtivo *Structural Insulated Panels* (SIP) apresenta uma lógica de funcionamento semelhante a outros sistemas modulares ligeiros, distinguindo-se pela utilização de painéis autoportantes que combinam integridade estrutural e desempenho térmico. Estes sistemas são compostos por um núcleo isolante rígido colado e encapsulado entre duas placas estruturais exteriores (Fig.58 e 59)(*Structural Timber Association* [STA], 2015).

Fig. 58
Structural Insulated Panel

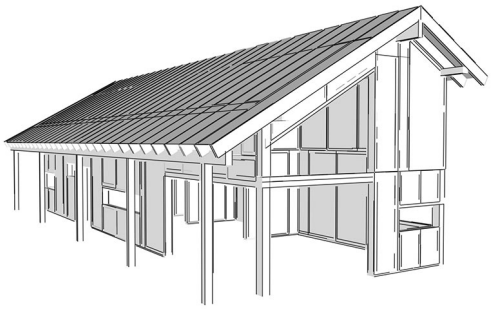
Entre as principais vantagens dos SIP destacam-se a excelente relação resistência/peso, a elevada precisão de fabrico, e a facilidade de montagem (Panjehpour et al., 2013). Adicionalmente, o sistema demonstra total compatibilidade com processos de pré-fabricação em ambiente controlado, o que minimiza o desperdício de matérias primas e otimiza a eficiência produtiva (Panjehpour et al., 2013).

Apesar das suas vantagens, este sistema apresenta limitações técnicas que requerem soluções complementares. A exposição à humidade exige estratégias rigorosas de conservação preventiva, manutenção de selagens e membranas impermeabilizantes para preservar a integridade das placas (SIPCO, 2024). No que concerne ao desempenho térmico, embora o núcleo contínuo minimize a formação de pontes térmicas na envolvente, a introdução de aberturas de vãos e passagens de infraestruturas pode comprometer a capacidade portante do painel, exigindo cortes precisos e reforços estruturais locais com vigas ou perfis de madeira (STA, 2015).

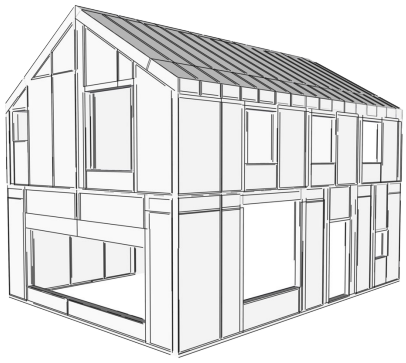
Adicionalmente, o comportamento ao fogo, embora beneficiado pela estrutura monolítica que elimina caixas de ar e limita o oxigénio interior, depende da aplicação de revestimentos retardantes de chama para mitigar a exposição térmica e garantir a segurança do sistema (SIPCO, 2024).

Fig. 59
Construção com SIP









Casos práticos

Além da ampla utilização deste sistema nos Estados Unidos da América, os painéis SIP têm vindo a ter uma tendência crescente de utilização na América Latina.

Em termos gerais, na Europa o uso dos painéis SIP encontra-se em crescimento, embora ainda de forma desigual entre países. Nos países nórdicos, a adoção é mais expressiva, sobretudo por priorizarem padrões de construção passiva e de baixo consumo energético, que se alinham com este sistema construtivo (*Strategic Market Research*, 2022). Contudo, grande parte dos projetos europeus associados a este sistema é promovida por empresas especializadas, como por exemplo a SIP-EUROPE (Fig. 60 e 61), que trabalham exclusivamente com soluções SIP. Em contraste, em países como o Chile, observa-se uma maior integração do sistema no processo de projeto arquitetónico, sendo frequentemente os arquitetos a selecionar os painéis SIP como solução construtiva.

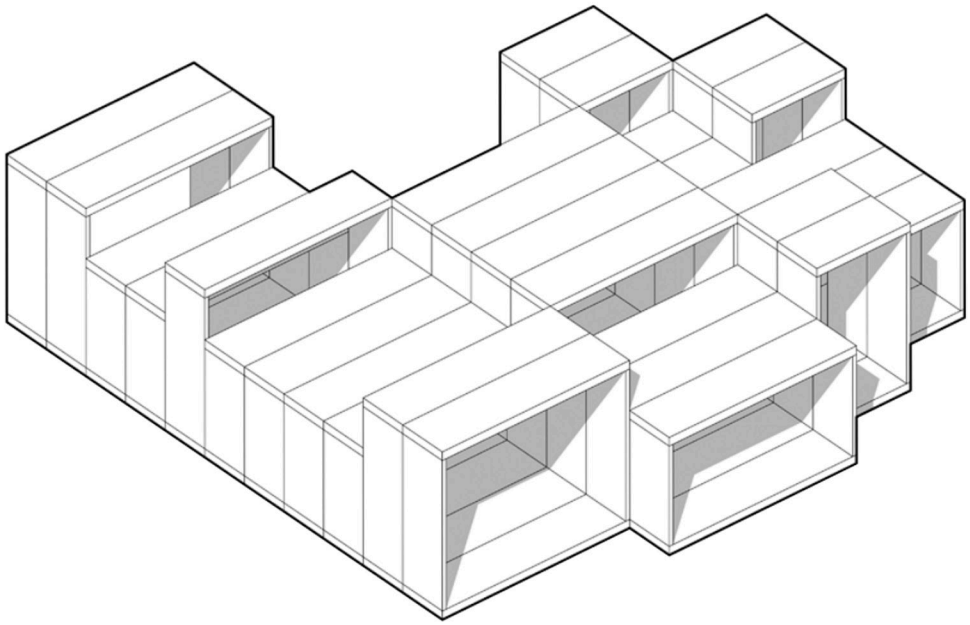
Fig. 60 e 61
Casa na Noruega, projetada e construída pela SIP-EUROPE

Em Portugal, a utilização de SIP ainda é bastante limitada, existindo pouca informação. Além disso, não foi encontrado nenhum projeto documentado em que este o sistema SIP seja utilizado de forma estrutural. No entanto, encontram-se alguns exemplos em que os painéis são utilizados sobretudo como solução de envolvente, funcionando como elemento de fachada e isolamento, sem desempenharem um papel estrutural principal, a título de exemplo é apresentado um projeto nos Açores (Fig. 62 e 63), desenvolvido pela empresa préviamente mencionada, a SIP-EUROPE.

Posteriormente, serão analisados diferentes casos práticos, com maior ênfase no Chile, devido à maior disponibilidade de informação sobre projetos realizados com este sistema construtivo, com o objetivo de compreender diferentes soluções adotadas e processos construtivos.

Fig. 62 2 63
Casa nos Açores, projetada e construída pela SIP-EUROPE





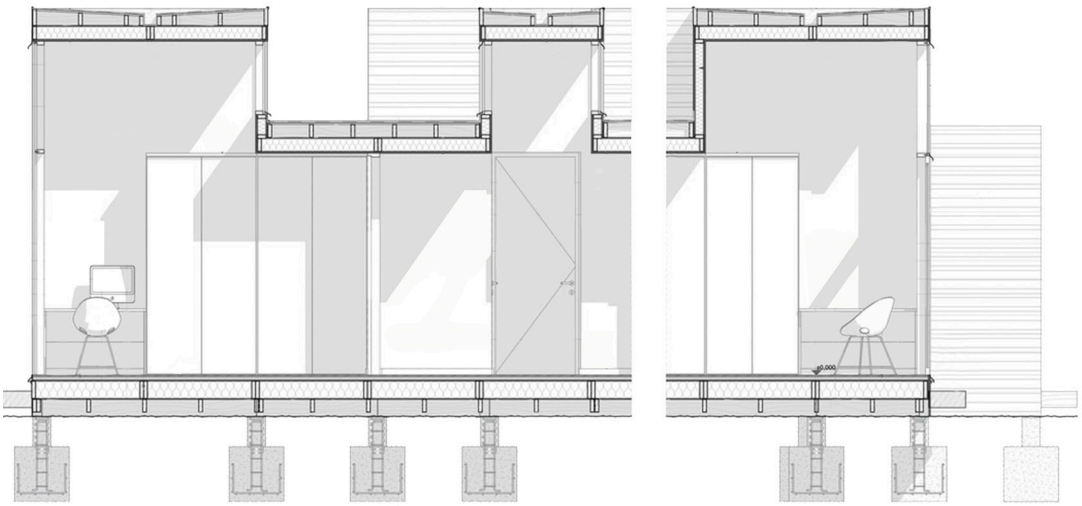


Fig. 64
Casa SIP M3

Casa SIP M3

A Casa SIP M3 (Fig. 64), projetada por Gabriel Rudolphy e Ian Hsü, construída em 2014 na cidade de Colina, no Chile, resulta da necessidade de desenvolver uma habitação com um prazo e orçamento reduzidos. Com uma área aproximada de 155 m², o projeto adotou o sistema construtivo SIP, tirando partido da sua rapidez de montagem e racionalização no processo de obra. O nome do projeto deriva do sistema estrutural utilizado, e da composição volumétrica cúbica que caracteriza o projeto (Rudolphy & Hsü, 2014).

Fig. 65
Módulos que definem a Casa SIP M3

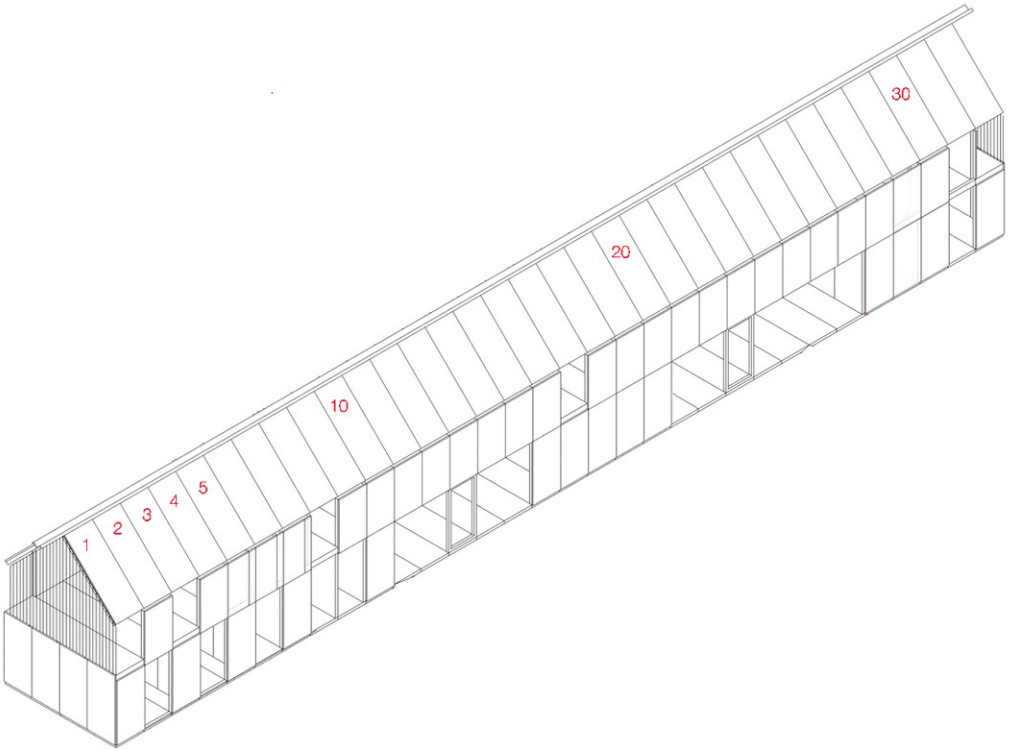
A habitação organiza-se a partir de um volume principal articulado com quatro volumes secundários dispostos paralelamente, com os espaços sociais localizados no centro da planta e as restantes divisões distribuídas em seu redor, reduzindo as áreas de circulação (Rudolphy & Hsü, 2014).

A configuração baseia-se em módulos tridimensionais definidos pelas dimensões dos próprios painéis SIP (Fig. 66), implantados sobre uma grelha de fundações que minimiza a intervenção no terreno e permite otimizar o uso de materiais (Rudolphy & Hsü, 2014).

Do ponto de vista construtivo, a estrutura é elevada em relação às fundações através de vigas de madeira, evitando o contacto direto com o solo e protegendo os elementos da humidade, sendo ainda aplicada uma membrana impermeável entre ambos. Os painéis SIP desempenham simultanemanete funções estruturais e de envolvente sendo aplicados nos pavimentos, paredes e cobertura, sendo esta última complementada por uma estrutura que garante a pendente necessária para o correto escoamento das águas pluviais (Fig. 78) (Rudolphy & Hsü, 2014).

Fig. 66
Corte Casa SIP M3




1
2
3
4
5
10
20
30

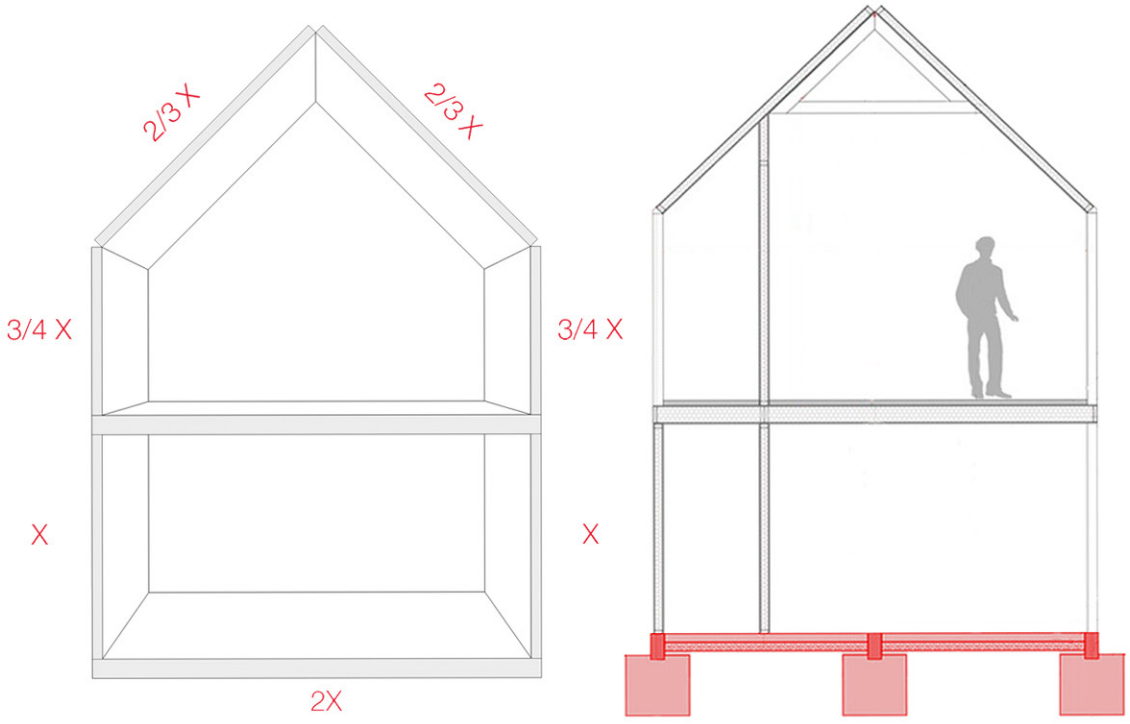

2/3 X
2/3 X
3/4 X
3/4 X
X
X
2X

Fig. 67
Casa Shotgun

Casa Shotgun

Fig. 68
Repetição longitudinal dos SIP

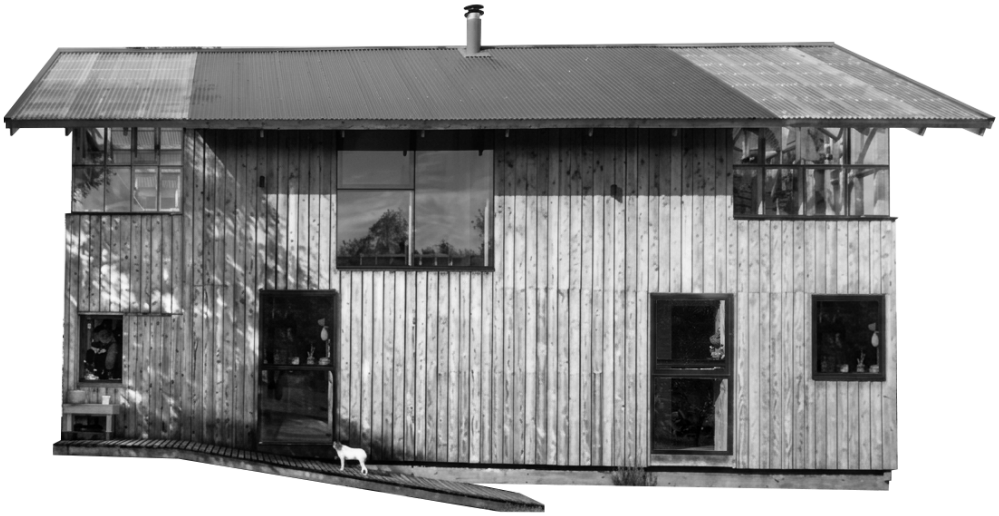
A Casa Shotgun (Fig. 67), projetada por Alejandro Soffia e construída em 2017 na cidade de Cachagua, no Chile, corresponde a um edifício habitacional com uma área aproximada de 427 m² distribuída por dois pisos, integrando uma série experimental desenvolvida pelo arquiteto com recurso ao sistema construtivo SIP. O projeto resulta da divisão do edifício em duas frações independentes, destinadas a diferentes núcleos familiares (Soffia, 2017).

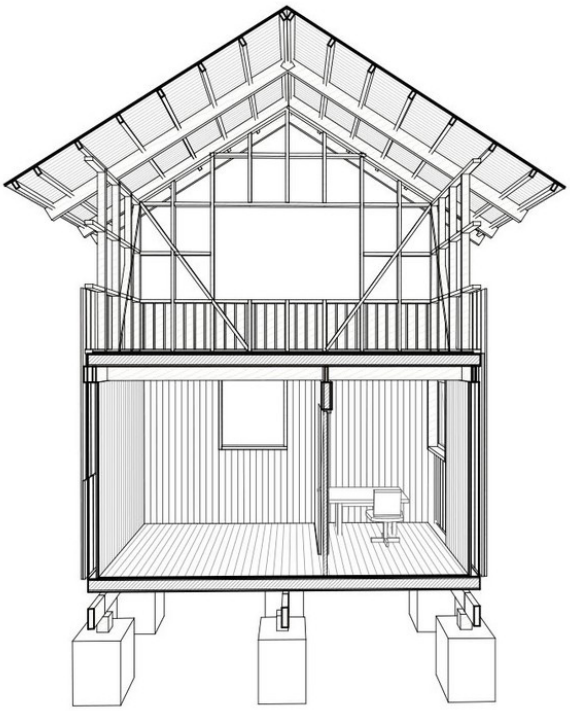
Os painéis SIP são utilizados como base de modulação do projeto, influenciando diretamente a definição dimensional e a organização espacial da habitação (Soffia, 2017).

A modulação do projeto desenvolve-se através da repetição de um módulo no sentido longitudinal, repetido 33 vezes ao longo de aproximadamente 40 metros (Fig. 68). Apesar desta regularidade, verificam-se algumas adaptações em elementos como as paredes do piso superior e a cobertura que não seguem a métrico do painel (Fig. 69) (Soffia, 2017).

Em contraste com o projeto anteriormente analisado, a Casa Shotgun não recorre aos painéis SIP como solução de pavimento do rés-do-chão, optando pela utilização de uma laje de betão (Fig. 70). Esta solução poderá estar relacionada com a necessidade de conferir maior estabilidade e ancoragem ao conjunto edificado, aumentando a massa da construção e melhorando o seu comportamento estrutural em relação ao terreno.

Fig. 69 e 70
Cortes transversais Casa Shotgun





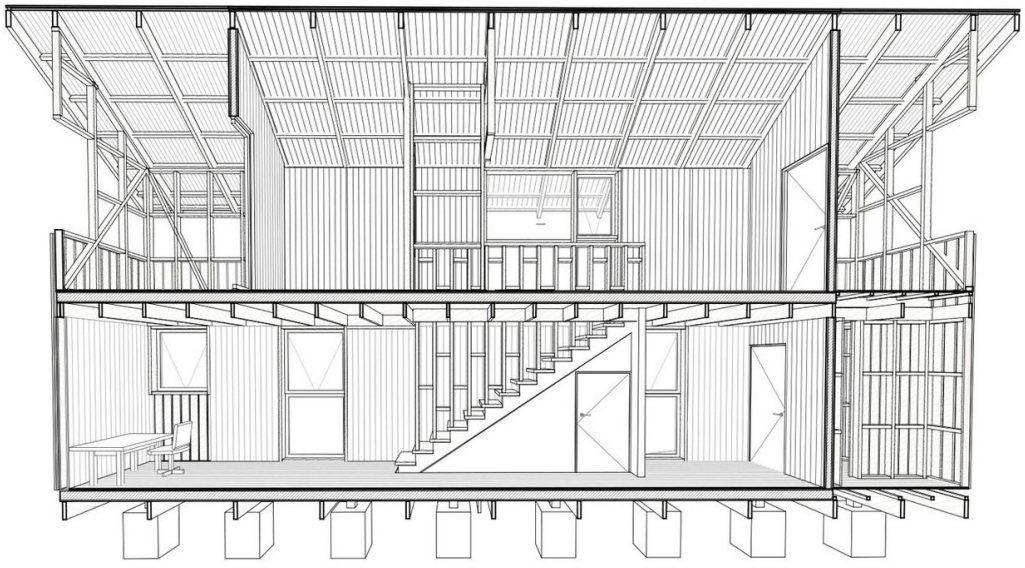


Fig. 71
Residência El Tume

Residência El Tume

A Residência El Tume (Fig. 71) foi projetada pelo atelier Abarca Palma Arquitectos e construída em 2017 na região de Villarrica, no Chile, corresponde a uma moradia unifamiliar com cerca de 128 m² distribuídos por dois pisos. O projeto insere-se num contexto natural, sendo concebido de forma a articular a solução arquitetónica com as características do local, neste sentido, os arquitetos desenharam as duas extremidades do piso superior de forma a estabelecer uma relação direta com as copas das árvores envolventes, transformando estes espaços em zonas de maior abertura e ligação ao exterior. Para tal, optaram pela utilização de materiais translúcidos, como o vidro e o policarbonato alveolar, permitindo uma maior permeabilidade visual e a entrada de luz natural, ao mesmo tempo que reforçam a integração da habitação na paisagem. (Abarca Palma Arquitectos, 2017).

Fig. 72
Corte transversal Residência El Tume

A habitação recorre a um sistema construtivo misto, combinando uma estrutura principal em madeira, composta por pilares e vigas, com a utilização de painéis SIP aplicados nos pavimentos, paredes perimetrais e divisórias interiores (Fig. 73) (Abarca Palma Arquitectos, 2017). Desta forma, os painéis SIP, apesar das suas capacidades estruturais, não são utilizados de forma isolada, sendo usados para funções estruturais, envolvente e compartimentação.

Fig. 73
Corte longitudinal Residência El Tume

3.
STRUCTURAL INSULATED PANELS

O QUE SÃO PAINÉIS SIP?

O sistema construtivo SIP (*Structural Insulated Panels*) é composto por painéis autoportantes que combinam eficiência estrutural e desempenho térmico (Fig. 58). Cada painel é constituído por um núcleo isolante rígido, responsável por minimizar significativamente as perdas de calor e por promover o conforto térmico, encapsulado entre duas placas estruturais. Estas superfícies exteriores desempenham um papel determinante na rigidez total do sistema, bem como na sua resistência à tração, compressão e ao impacto (STA, 2015).

Este sistema construtivo permite a criação de um envelope construtivo contínuo e hermético (Fig. 59), assegurando um desempenho térmico e acústico eficiente.

As origens deste sistema remontam ao início do século XX, tendo evoluído progressivamente até à atualidade, impulsionadas pela crescente procura e necessidade de soluções construtivas mais eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis.

Segundo Lstiburek (2008) as primeiras experiências datam da década de 1930, nos Estados Unidos, com estudos pioneiros feitos pelo *Forest Products Laboratory* (FPL), um laboratório nacional de investigação associado ao Serviço Florestal dos Estados Unidos, parte do Departamento de Agricultura dos EUA. Esta instituição desempenhou um papel fundamental na investigação científica da madeira e dos seus derivados, promovendo ativamente a utilização eficiente e sustentável dos recursos florestais (FPL, sem data).

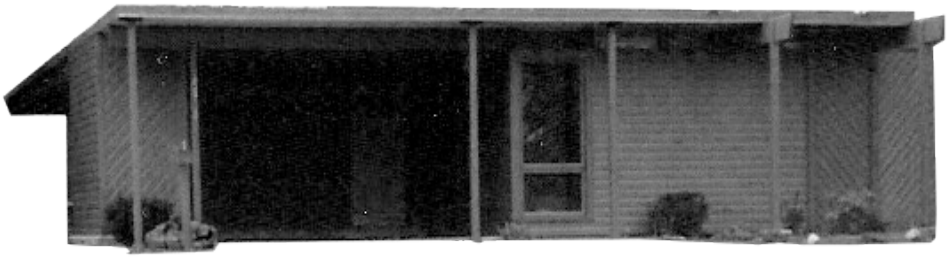
Durante esse período, o laboratório desenvolveu o primeiro protótipo do painel SIP, aplicado na construção de casas experimentais destinadas a testar o seu desempenho ao longo de três décadas. Paralelamente, os engenheiros do laboratório continuaram a aperfeiçoar o sistema, explorando novos materiais e configurações construtivas com o objetivo de melhorar o desempenho global do sistema (Lstiburek, 2008).

Um dos edifícios que utilizou este primeiro protótipo de painel SIP foi uma pequena casa experimental, concebida com o objetivo de demonstrar a eficiência e durabilidade dos painéis em contexto real. A estrutura foi inaugurada pela primeira-dama Eleanor Roosevelt, e resistiu às condições climatéricas rigorosas do estado de Wisconsin. Posteriormente, foi utilizada como centro de dia para a Universidade de Wisconsin-Madison até 1998, ano em que acabou por ser demolida para dar lugar a um novo edifício da Escola de Farmácia (*BSC Solutions Group*, 2022).









Nas décadas de 1930 e 1940, Frank Lloyd Wright usou painéis em algumas das suas casas *Usonian* (Fig. 74). Estes eram compostos por três camadas de contraplacado e duas de papel betumado, criando uma estrutura leve, mas com um deficiente desempenho térmico por falta de isolamento, o que limitou a sua difusão e produção em larga escala (Morley, 2000).

Fig. 74
Herbert Jacobs House, de Frank Lloyd Wright

No total, foram construídas cerca de 60 casas *Usonian*, caracterizadas por serem térreas, de dimensões reduzidas e economicamente acessíveis, refletindo a filosofia de Wright, de uma arquitetura democrática e adaptada às necessidades de todos (Hawkins, 2021).

Estes princípios influenciaram o desenvolvimento da tecnologia SIP, estabelecendo as bases para os sistemas contemporâneos de construção com painéis estruturais isolados. Um exemplo disso é a utilização de materiais que combinam simultaneamente isolamento térmico e integridade estrutural.

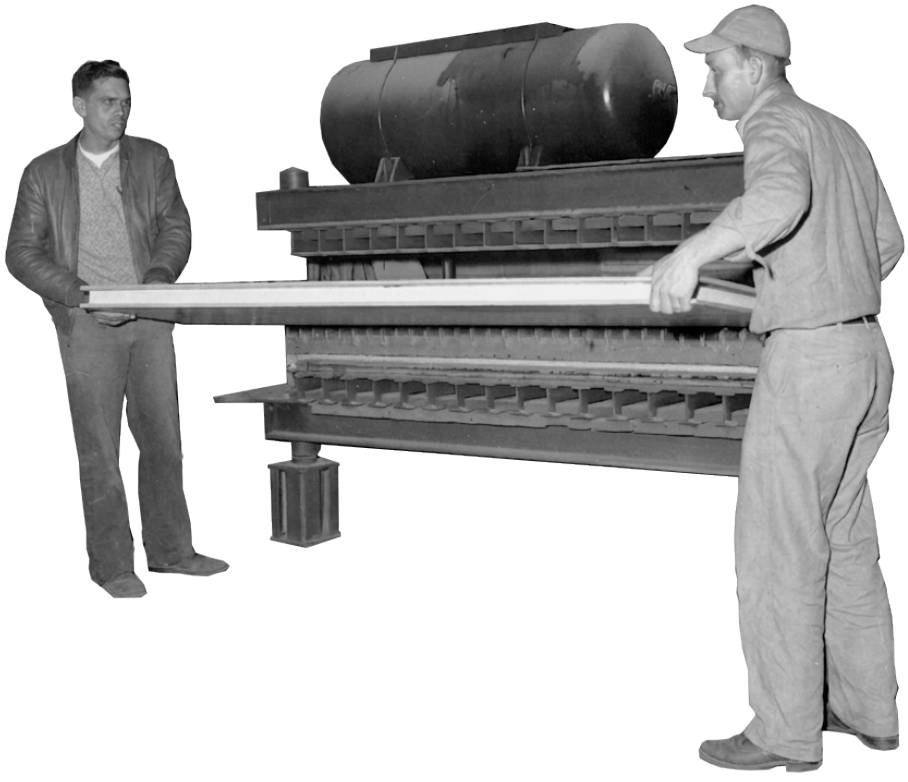
Alden B. Dow, antigo aluno de arquitetura de Wright e filho do fundador da *Dow Chemical Company*, desempenhou um papel decisivo na evolução do sistema. Interessado na aplicação de espumas rígidas como material isolante, Dow foi responsável por introduzir a espuma como componente central dos painéis, otimizando o seu desempenho térmico e estrutural. É-lhe creditada a produção dos primeiros painéis estruturais isolantes (Morley, 2000).

Motivado pela insuficiência de isolamento térmico das casas *Usonian*, Dow experimentou pela primeira vez, em 1946, o uso dos painéis sanduíche na construção de habitações de baixo custo, culminando em 1952 na criação do primeiro SIP com núcleo de poliestireno (*Styrofoam*), fabricado pela empresa da sua família. Este painel apresentava um núcleo de EPS com de 41 mm de espessura, colados com adesivos impermeáveis a placas de contraplacado, neste caso de abeto de 6 mm, constituindo desta forma o primeiro painel estrutural isolante (Morley, 2000).

As primeiras obras de Dow foram erguidas em Midland, Michigan, utilizando os seus painéis. O objetivo era demonstrar a viabilidade técnica e económica do sistema, refletindo novamente a visão de Wright de uma arquitetura acessível e eficiente. Segundo Morley algumas das casas ainda se encontravam ocupadas à data de lançamento do seu livro *Building with Structural Insulated Panels (SIPS) - Strength and Energy Efficiency Through Structural Panel Construction* (2000).

De acordo com a *Journal of Homebuilding*, entre 1952 e 1953, foram construídas três casas com o sistema desenvolvido por Dow (Fig. 75 a 77). A primeira foi erguida em três meses, enquanto a terceira foi concluída em apenas seis semanas, evidenciando a rapidez e racionalização do processo construtivo (Alden B. Dow - *Home & Studio*, 2019).

Fig. 75 a 77
Três casas com o sistema desenvolvido por Dow



As habitações apresentavam um perfil térreo com cobertura plana, integrando um alpendre e um passadiço coberto até à entrada principal. O *layout* interior, com uma simples planta retangular, incluía uma sala de estar e jantar combinada, cozinha, lavandaria, três quartos e uma casa de banho. Os pavimentos eram revestidos com ladrilhos asfálticos, e as paredes e tetos executados em madeira (Alden B. Dow – *Home & Studio*, 2019)

Segundo o próprio Dow,

"a única objeção que vejo a este método de construção é a transmissão de som através das paredes. Estes painéis são demasiado leves para impedir a transmissão sonora. No entanto, essa leveza é uma grande vantagem na construção, pois um único homem pode manusear facilmente um painel de 1200mm por 2400mm"

(Tradução própria)

Apesar dessa limitação, as casas mantêm-se habitadas até aos dias de hoje, o que comprova a sua longevidade e bom desempenho estrutural ao longo do tempo (Alden B. Dow – *Home & Studio*, 2019).

A partir da década de 1960, a comercialização de produtos de espuma rígida tornou-se mais acessível (Lstiburek, 2008).

Já no decorrer dos anos 90, com o surgimento da *The Structural Insulated Panel Association* (SIPA) o sistema conheceu uma expansão significativa na América do Norte e na Europa, impulsionada simultaneamente pelo desenvolvimento de novos materiais e tecnologias de fabrico. A introdução de sistemas CAD/CAM e de processos de produção automatizados permitiu converter desenhos arquitetónicos digitais diretamente em modelos de corte, otimizando a precisão, a rapidez de produção e padronização dos elementos construtivos (Lstiburek, 2008).

Fig. 78
Produção dos painéis de Dow

Material	Vantagens	Desvantagens
OSB (Jular, 2025) (STA, 2015)	- Custo - Disponibilidade - Fácil manuseamento - Resistência mecânica - Rigidez - Relação peso/resistência - Mantém o desempenho	- Necessita de acabamento exterior e tratamento em ambientes húmidos - Exposição prolongada a altos níveis de humidade pode causar instabilidade geométrica e degradação
Contraplacado (Jular, 2025) (Leroy Merlin, s.d.) (Garay et, al., 2009)	- Melhor desempenho contra a humidade que o OSB - Mais leve que o OSB - Fácil de trabalhar e movimentar - Superfície lisa e homogénea - Elevada resistência à degradação, desgaste e ao choque - Resistente à propagação de chamas	- Pode apresentar variações de qualidade conforme o tipo de madeira - Mais caro que o OSB - Pode perder as propriedades mecânicas com calor extremo e humidade
MDF/HDF (Misha, 2021)	- Superfície lisa e homogénea - Facilidade de manuseamento - HDF apresenta maior densidade e é mais resistente a impactos	- Sensível a humidades podendo deformar - Menor resistência mecânica quando comparado com outras opções
Fibras cimentícias/ MgO (STA, 2015)	- Melhor resistência mecânica incluindo contra impactos - Melhor comportamento contra humidades e intempéries - Funciona como acabamento exterior - Melhor desempenho ao fogo	- Elementos mais pesados que resultam em maior dificuldade de manuseamento - Elementos mais frágeis para transporte - Custo

Tal como já referido, os painéis SIP são compostos a partir de duas placas estruturais e um núcleo interior isolante. De seguida, são apresentadas algumas das possíveis variações destes elementos constituintes bem como as suas principais diferenças.

As extremidades dos painéis SIP são constituídas por duas **placas estruturais** rígidas, fundamentais para o seu comportamento estrutural. Estas faces podem ser produzidas a partir de diversos materiais, entre os quais se destacam os painéis de OSB (*Oriented Strand Board*), os painéis de contraplacado, os painéis de MDF ou HDF (*Medium/High Density Fiberboard*), bem como painéis de fibras cimentícias, como os painéis de óxido de magnésio (MgO). Cada um destes materiais apresenta características específicas no que diz respeito à resistência mecânica, durabilidade e comportamento perante a humidade.

Tab. 2
Vantagens e desvantagens dos diferentes materiais

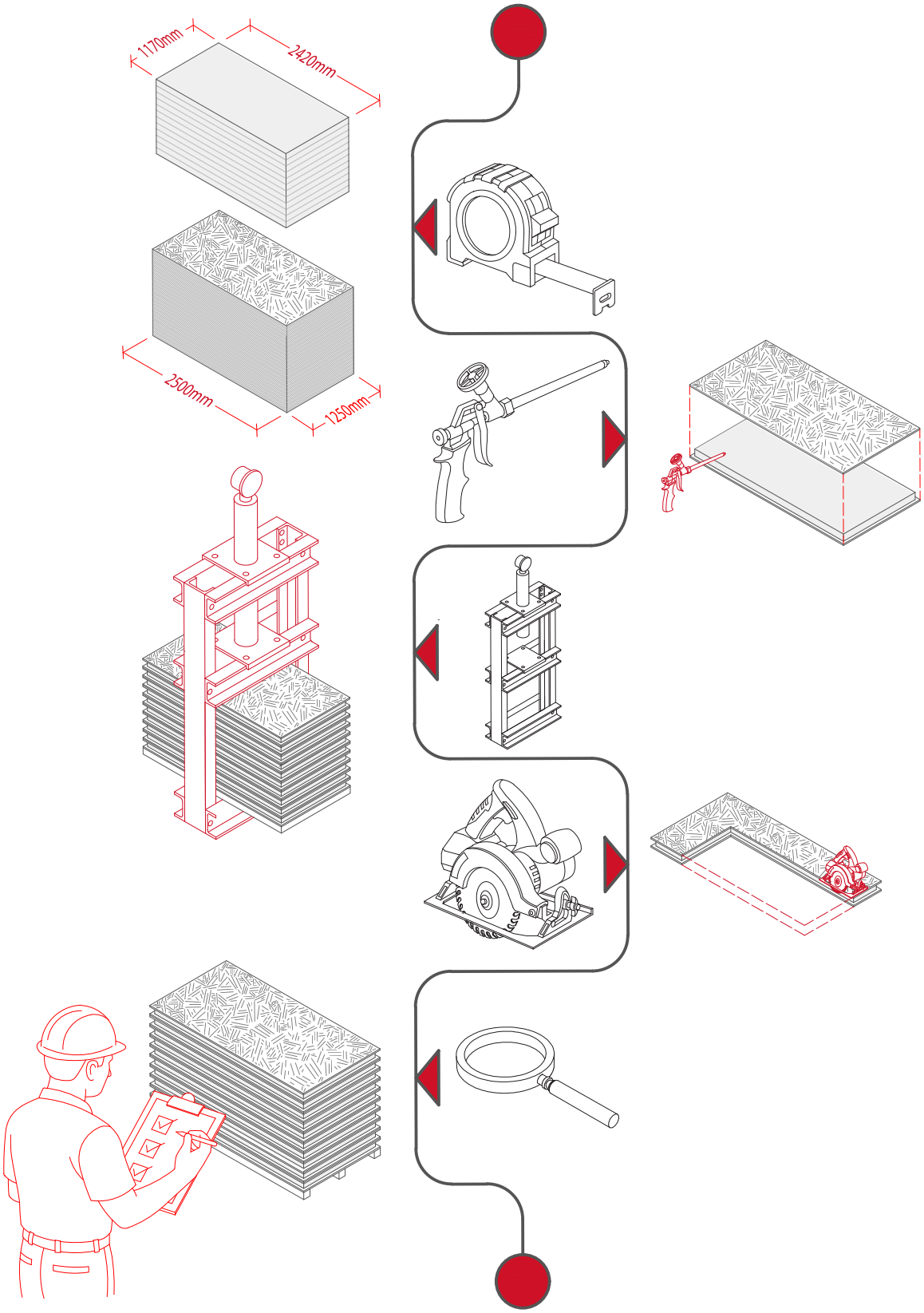
A seleção do material das faces depende de um conjunto de fatores determinantes, nomeadamente as exigências estruturais do projeto, o nível de desempenho térmico pretendido e a durabilidade ao longo do tempo. Estes parâmetros condicionam diretamente a capacidade funcional do painel, tanto no que respeita ao seu comportamento estrutural como ao desempenho térmico e energético (STA, 2015).

Entre estas opções, o OSB destaca-se como o material mais utilizado sobretudo devido à sua relação custo-benefício, oferecendo boa resistência estrutural adequada a um custo acessível. A sua facilidade de produção, disponibilidade no mercado e simplicidade de aplicação contribuem para a sua ampla difusão no mercado.

A tabela 2 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos diferentes materiais mencionados que podem compor as faces externas do painel.

Nos painéis SIP, os **isolantes térmicos** mais utilizados no interior dos painéis são: (i) poliestireno expandido (EPS), (ii) poliestireno extrudido (XPS) e (iii) derivados de poliuretano (PIR e PUR). Além destes, podem ser utilizados outros tipos de isolamento, desde que apresentem rigidez suficiente para o sistema, sendo que a principal diferença reside na necessidade ou não de um adesivo ligante para a sua aplicação.

Embora os derivados de poliuretano apresentem normalmente melhores valores para condutibilidade térmica, o EPS e o XPS continuam a ser os mais utilizados neste sistema construtivo, sobretudo devido à sua melhor relação custo-benefício (STA, 2015).


1170mm
2420mm
2500mm
1250mm

A produção dos painéis SIP (Fig. 79) envolve diversas etapas que asseguram a qualidade final. Após a seleção dos materiais constituintes, para as faces e para o núcleo isolante, o processo pode ser organizado em cinco fases principais:

1. Corte e Preparação dos Materiais

O núcleo que forma o isolamento é cortado consoante o formato imposto pelo projeto. As placas externas, se necessário, são também cortadas de forma que fiquem com dimensões ligeiramente superiores em relação ao isolamento.

2. Aplicação do Adesivo e Montagem

Posteriormente, uma das placas é colocada numa máquina que aplica um adesivo de alta resistência, como cola de poliuretano ou resinas especiais, que posteriormente irá garantir a aderência ao isolamento escolhido. De seguida será feito o mesmo processo com o isolamento e a placa exterior restante.

3. Prensa e Cura

Após a montagem, os painéis são sujeitos a um processo de prensagem que pode ser feito de forma mecânica ou por vácuo, garantindo que as faces aderem totalmente ao isolamento sem bolhas de ar ou falhas de colagem. Esse processo assegura a resistência estrutural do painel. Após a prensa, os painéis são curados para garantir a máxima aderência entre os materiais.

4. Corte e Ajuste Final

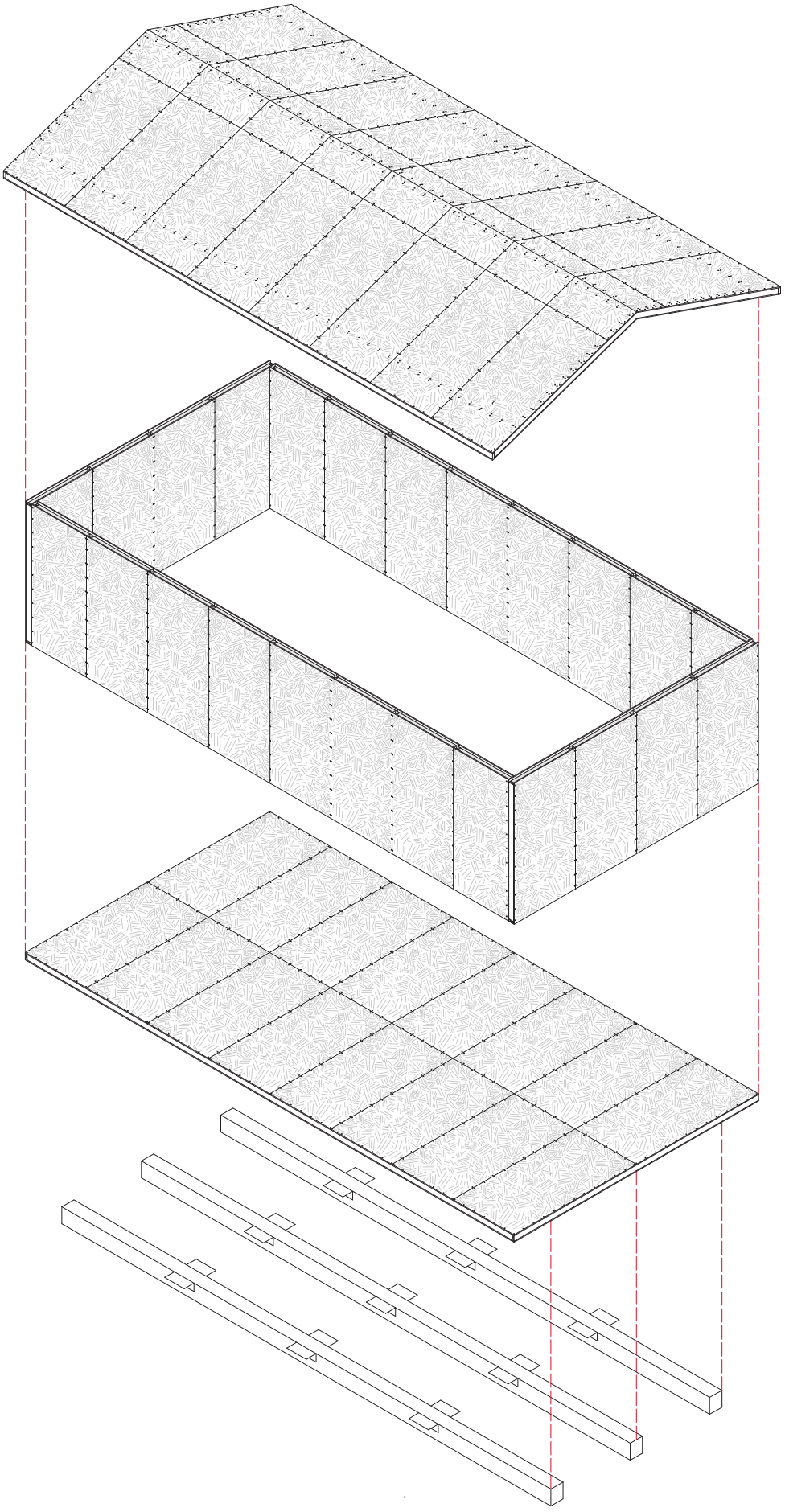
De seguida, os painéis são encaminhados para uma serra de corte industrial, assegurando uma geometria uniforme e acabamento preciso. Além do corte para ajuste de medidas, podem ser realizadas aberturas específicas para portas, janelas ou passagens para infraestruturas.

5. Acabamento e Inspeção de Qualidade

Depois deste processo, os painéis passam por um controlo de qualidade, onde são verificadas dimensões, resistência e integridade estrutural. Os painéis são então armazenados.

Este processo permite que os SIP sejam altamente padronizados, garantindo uniformidade dimensional e qualidade consistente dos painéis.

Fig. 79
Processo industrial dos SIP



MONTAGEM EM OBRA

A estrutura dos edifícios construídos com painéis SIP é geralmente assente sobre uma fundação em betão. Para evitar problemas relacionados com a capilaridade e a absorção de humidade, é aplicada uma membrana impermeável selante entre a fundação e os elementos de madeira, impedindo a ascenção da humidade contribuindo para a durabilidade da estrutura, reduzindo o risco de degradação dos materiais ao longo do tempo.

Quando o pavimento também é constituído por painéis SIP, a membrana impermeável não precisa de ser contínua, uma vez que a estrutura de suporte incluirá vigas dispostas em zonas pontuais da fundação. Estas vigas servem como base para a instalação dos painéis SIP do pavimento.

Os painéis são cortados previamente em fábrica com uma borda perimetral que permite o encaixe com os barrotes de madeira, seja para ligar ao piso, cobertura ou de forma a encaixar com outros painéis adjacentes.

Um elemento comum a todas as juntas do sistema é a utilização de espuma de poliuretano, aplicada na união dos painéis aos barrotes, melhorando o desempenho térmico e acústico, preenchendo eventuais folgas e assegurando a estanquidade ao ar e à humidade.

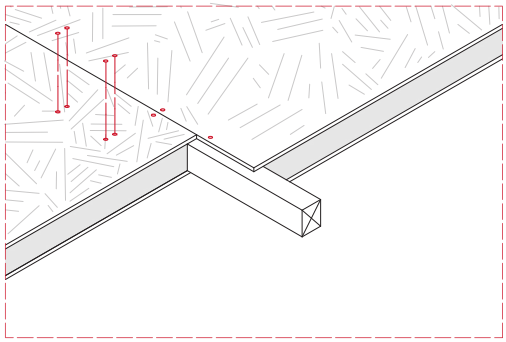
Para garantir a impermeabilização das juntas entre os painéis, é aplicada uma membrana impermeável na zona das uniões. Dependendo do revestimento final da fachada, esta membrana pode ser aplicada apenas nas juntas ou cobrir toda a superfície exterior dos painéis. Após a montagem das paredes, uma nova viga perimetral é instalada no topo para reforçar a estrutura e permitir a continuidade da construção.

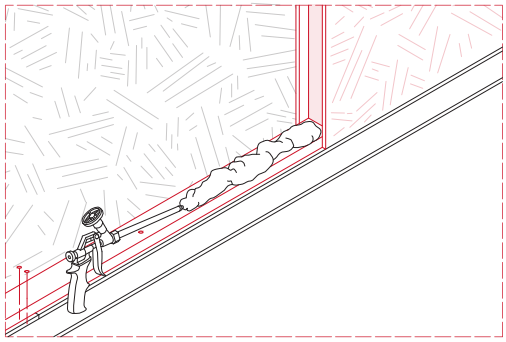
A cobertura ou um eventual piso superior são suportados por vigas que reforçam a estrutura. As coberturas tanto podem ser planas, desde que apresentem inclinação suficiente para não haver acumulação de águas, como inclinadas. A instalação dos painéis SIP na cobertura segue o mesmo princípio de montagem das paredes, com encaixes adequados e membranas de selagem para garantir a estanqueidade e o isolamento térmico.

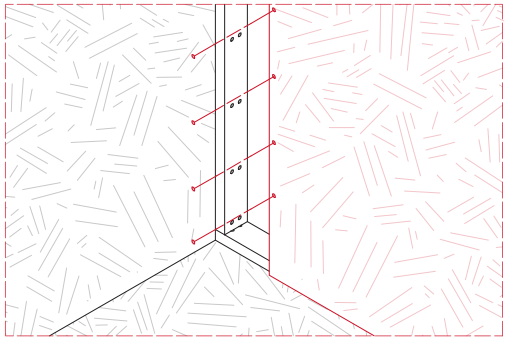
Concluída a estrutura base, os acabamentos podem ser aplicados de acordo com as preferências estéticas e funcionais do cliente. Os painéis SIP permitem a utilização de diversos revestimentos interiores e exteriores, como gesso cartonado, madeira, cerâmica ou sistemas de fachada ventilada.

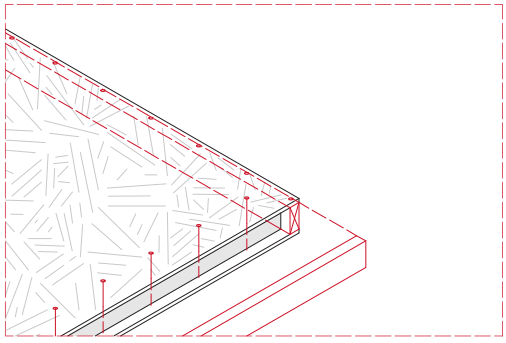
Neste sistema construtivo existe uma ampla variedade de possibilidades de ligações entre painéis. No entanto, posteriormente serão apresentadas as soluções mais recorrentes, representativas das práticas mais usuais na implementação deste sistema.

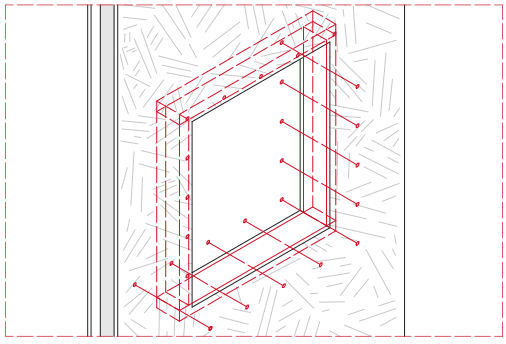
Fig. 80
Representação de montagem em obra











A **ligação entre painéis** (Fig. 81) é realizada através de um barrote de madeira (100x80 mm), que atua como elemento de união e reforço estrutural, aproveitando o rebordo de 40 mm dos painéis. A fixação é garantida por parafusos dispostos ao longo da junta e pela espuma de poliuretano nas superfícies de contacto, com o objetivo de melhorar a estanqueidade da ligação e otimizar o desempenho térmico e acústico do conjunto.

Fig. 81
Ligação painel/painel

A **ligação painel/piso** (Fig. 82) inicia-se com a fixação de um barrote de madeira de 40x100 mm diretamente ao pavimento estrutural. Este barrote é ancorado à fundação através de parafusos. Após a sua fixação, aplica-se espuma de poliuretano na zona de contacto entre o barrote e o painel.

A **ligação entre painéis nos cantos** (Fig. 83) é realizada através da colocação de um barrote de madeira de 40x100 mm, posicionado de forma a respeitar o afastamento correspondente à espessura do painel exterior. Cada painel é fixo simultaneamente ao barrote de base, previamente instalado no piso, e ao barrote de canto. O mesmo princípio construtivo é aplicado na ligação entre paredes interiores.

Fig. 82
Ligação painel/piso

Os **remates dos painéis** (Fig. 84) são executados de forma a garantir a continuidade estrutural e o correto acabamento das extremidades. Para esse efeito, é utilizado um barrote de madeira com 40x100 mm, que é aparafusado diretamente através da face do painel de OSB.

Fig. 83
Ligação painel/painel (canto)

As **aberturas**, após a execução do corte com as dimensões pretendidas, procede-se à criação de um novo rebordo de 40 mm no isolamento, o qual permite a introdução de uma estrutura complementar em madeira (Fig. 85). Esta estrutura reforça o perímetro da abertura, assegurando a continuidade da resistência mecânica e da rigidez do painel.

Fig. 84
Remate de painéis

Fig. 85
Aberturas

VANTAGENS E DESVANTAGENS DO SISTEMA SIP

A adoção de sistemas construtivos baseados em SIP tem vindo a assumir uma importância crescente no contexto da construção contemporânea, impulsionada sobretudo pela necessidade cada vez mais evidente de recorrer a soluções construtivas mais eficientes, sustentáveis e industrializadas.

Neste sentido, é fundamental analisar de forma crítica o desempenho deste sistema construtivo, não apenas evidenciando as suas potencialidades e vantagens em comparação com os métodos construtivos convencionais, mas também procurar identificar as suas limitações, condicionantes e desafios que a sua aplicação pode apresentar em diferentes contextos.

Assim, posteriormente, será realizada uma avaliação dos SIP segundo diversos parâmetros de análise, nomeadamente ao nível da eficiência térmica e energética, da resistência estrutural, da sustentabilidade e do impacto ambiental, bem como da eficiência construtiva e da otimização de recursos, culminando numa crítica que permite identifica as principais condicionantes, limitações e potencialidades associadas à utilização deste sistema em diferentes contextos de aplicação.

A **eficiência energética e térmica** dos SIP, tal como referido anteriormente, é elevada, contribuindo de forma significativa para o desempenho energético dos edifícios. À semelhança da construção convencional, estes sistemas proporcionam um bom comportamento térmico, no entanto, em diversas situações, apresentam vantagens adicionais face aos métodos construtivos convencionais.

Uma das principais vantagens dos SIP é a redução das pontes térmicas, resultante da existência de um núcleo isolante contínuo que minimiza as perdas de calor, ao contrário dos sistemas construtivos convencionais que dependem de múltiplas camadas e elementos estruturais que frequentemente interrompem a barreira térmica. Além disso, possuem o isolamento permite manter temperaturas interiores mais estáveis reduzindo a necessidade de recurso a sistemas de climatização, o que se traduz numa diminuição global do consumo energético ao longo da vida útil do edifício (SIPA, sem data).

Uma das principais contribuições dos SIP para a **sustentabilidade** reside na significativa redução do desperdício de materiais ao longo do processo construtivo. Por se tratarem de elementos pré-fabricados, os painéis são produzidos em ambiente controlado, existindo um maior rigor no corte, o que permite minimizar o desperdício frequentemente associado aos métodos

construtivos convencionais. Este nível de pré-fabricação contribui da mesma forma para a diminuição de resíduos gerados durante a fase de construção e demolição (Panjehpour, et.al., 2013).

Contudo, o impacto ambiental dos SIP depende diretamente dos materiais utilizados na sua composição. Por exemplo, os painéis faceados com OSB tendem a ser mais sustentáveis, por serem produzidos a partir de madeiras certificadas de crescimento rápido e com menor impacto associado à extração (Hizirohlu, 2017), enquanto, os painéis revestivos em fibras cimentícias implicam processos mais intensivos em energia e com maiores emissões de CO_2.

A **eficiência construtiva e a otimização de recursos** no sistema construtivo baseado em SIP distinguem-se de forma significativa ao longo de todo o processo edificatório, uma vez que permite uma redução significativa do tempo de construção quando comparado com os métodos convencionais. A pré-fabricação dos painéis possibilita a diminuição do número de fases de execução em obra, ao mesmo tempo que reduz a exposição dos trabalhadores a condições climatéricas adversas, contribuindo, desta forma, para um processo com maior qualidade global de construção e previsibilidade do resultado final (Panjehpour, et.al., 2013).

Esta celeridade construtiva não só permite antecipar a conclusão da obra, como também contribui para a redução dos custos globais do processo construtivo. A diminuição do tempo de execução em estaleiro reduz os encargos associados à permanência prolongada de equipamentos, de mão de obra e de estruturas temporárias de apoio, tornando a construção mais eficiente e economicamente competitiva (Panjehpour, et.al., 2013).

Adicionalmente, os SIP caracterizam-se pela racionalização dos componentes construtivos e simplicidade das suas ligações, o que reduz a necessidade de mão de obra especializada (ao contrário de outros sistemas pré-fabricados com ligações mais complexas), desta forma, a montagem pode ser realizada por equipas reduzidas, sem comprometer a precisão e a qualidade de execução (Panjehpour, et.al., 2013).

Apesar das diversas vantagens dos painéis SIP, este sistema construtivo apresenta algumas **dificuldades e limitações** que devem ser consideradas na sua adoção e aplicação prática.

Uma das principais limitações deste sistema construtivo é a **restrita flexibilidade arquitetónica**. Sendo um sistema pré-fabricado, apresenta

rigidez inerente aos formatos e dimensões, o que pode limitar a adaptação a projetos com geometrias complexas ou a soluções arquitetónicas menos convencionais. A customização fora dos padrões industriais implica, frequentemente, custos adicionais e prazos de produção mais tardios, reduzindo a viabilidade económica e a competitividade do sistema em determinados contextos. Além disso, a natureza pré-fabricada do sistema dificulta alterações drásticas em obra, já que os elementos são produzidos segundo especificações rigorosas previamente definidas em projeto. Assim, a correspondência entre projeto e execução é praticamente absoluta, materializando-se em obra exatamente o que é definido em desenho, sem margem relevante para alterações posteriores (Panjehpour, et.al., 2013).

Em seguimento ao ponto anterior, nos SIP as portas, janelas e passagens de infraestruturas exigem especial atenção. Como os painéis são elementos estruturais, a introdução de aberturas pode comprometer a sua resistência, por isso estas áreas devem ser reforçadas com vigas ou perfis de madeira. Além disso, a execução das aberturas deve ser planeada de forma que o corte seja preciso e evitar que haja infiltrações (STA, 2015).

A **logística e o transporte** constituem outro desafio relevante. Devido ao seu tamanho e rigidez, os painéis ocupam mais espaço no transporte do que materiais de construção convencionais, o que pode representar um desafio em locais de difícil acesso ou obras situadas em zonas urbanas densas. Além disso, a necessidade de equipamentos específicos para manuseamento e montagem pode aumentar os custos iniciais (Navaratnam et. al., 2018).

Em **termos estruturais**, os SIP desempenham bem funções de vedação e suporte de cargas verticais uniformemente distribuídas, mas podem ter limitações face a cargas pontuais elevadas ou esforços horizontais intensos. Por este motivo, em edifícios maiores ou em zonas com condições climáticas extremas, podem ser necessário reforços estruturais adicionais, como vigas/pilares (SIPA, sem data).

Deste modo, apesar das vantagens dos SIP, deve-se avaliar as suas limitações e desafios antes de optar por este sistema, garantindo a adequação às exigências específicas do projeto e às condições do local de construção.

COMPORTAMENTO DO SISTEMA SIP

Os sistemas construtivos em painéis SIP distinguem-se não apenas pelo seu desempenho térmico e estrutural, mas também pela forma como se comportam ao longo do seu ciclo de vida. A durabilidade destes sistemas resulta essencialmente da sua constituição monolítica e da forte integração entre os diferentes materiais que o compõe como um todo, fator determinante que contribui para a estabilidade, longevidade e resistência global da solução construtiva

Neste contexto, torna-se essencial analisar não apenas a sua longevidade esperada, mas também os requisitos de manutenção associados, bem como o seu desempenho sísmico e acústico e o seu comportamento face a agentes de degradação comuns, como pragas biológicas e o fogo. Estes fatores permitem avaliar de forma mais abrangente a sua fiabilidade, desempenho e adequação do sistema SIP enquanto solução construtiva contemporânea e sustentável.

Os painéis SIP são reconhecidos pela sua elevada **durabilidade** e robustez estrutural. A ligação contínua entre o núcleo de espuma isolante e as placas de revestimento confere ao conjunto uma integração eficiente, capaz de assegurar uma rigidez e estabilidade estrutural comparáveis às dos sistemas construtivos convencionais. Adicionalmente, a natureza monolítica e compacta que caracteriza os painéis proporciona uma maior resistência a impactos e esforços mecânicos, reduzindo de forma significativa o risco de surgirem deformações ou danos ao longo do tempo. Desta forma, estas características contribuem para a longevidade e desempenho sustentável das edificações (SIPCO, 2024).

Como referido previamente, existem registos documentados de edificações em painéis SIP com várias décadas que se mantêm em bom estado de conservação, evidenciando a durabilidade a longo prazo deste sistema. Relatos de utilizadores e profissionais do setor, aliados a dados empíricos provenientes da prática construtiva, demonstram que a vida útil das edificações realizadas com este sistema pode ser equiparável ou, mediante manutenção adequada e regular, até superior à das construções convencionais (SIPCO, 2024).

Esta durabilidade comprovada reforça o potencial do sistema SIP enquanto solução construtiva sustentável, evidenciando a sua capacidade de assegurar desempenho prolongado e estabilidade estrutural ao longo do tempo.

A **manutenção adequada** é essencial para a preservação da integridade e do desempenho das construções com painéis SIP. Os fabricantes recomendam inspeções periódicas e a adoção de estratégias de conservação preventiva, de forma a mitigar os efeitos da exposição a agentes externos como a humidade, variações térmicas ou impactos mecânicos, prolongando a durabilidade e a estabilidade estrutural das edificações (SIPCO, 2024).

A continuidade do isolamento térmico dos painéis SIP reduz a ocorrência de patologias comuns em sistemas convencionais, como infiltrações e condensações. Entre as boas práticas de manutenção destacam-se a verificação das selagens, a substituição de membranas impermeabilizantes e a aplicação de revestimentos exteriores adequados. Estas medidas prolongam a vida útil e o desempenho estrutural e energético do sistema (SIPCO, 2024).

O sistema SIP apresenta características que lhe conferem um comportamento favorável perante **ações sísmicas**, sobretudo devido à reduzida massa estrutural e à rigidez dos painéis. Segundo Branco et al. (2017), o bom desempenho sísmico das construções em madeira está associado às propriedades do próprio material e à leveza da estrutura.

Apesar de a investigação sobre o comportamento sísmico dos painéis SIP ainda ser limitada face aos sistemas em madeira, casos reais demonstram a sua resistência e estabilidade estrutural. Em situações sismicas como em Kobe (Japão), e Northridge (Estados Unidos), bem como em outros desastres naturais, as construções em SIP mantiveram a sua integridade estrutural sem danos significativos (Rungthonkit, 2012).

O sistema SIP apresenta, em geral, **desempenho acústico** moderado, condicionado pela sua natureza leve e reduzida massa. A baixa densidade do OSB e a utilização de isolamento térmico como o XPS, com pouca contribuição para o isolamento sonoro, limitam o desempenho face ao ruído aéreo quando comparado com sistemas construtivos mais pesados.

Assim, o comportamento acústico dos SIP tende a ser inferior ao de soluções convencionais em alvenaria, sendo frequentemente necessário recorrer a soluções construtivas complementares para otimizar o isolamento sonoro.

A resistêcia das construções em madeira a pragas xilófagas, como as **térmitas**, constitui uma preocupação relevante no contexto da durabilidade dos materiais naturais. Contudo, os SIP podem receber tratamentos inseticidas específicos durante o processo de fabrico, o que lhes confere uma resistência

acrescida à infestação por organismos biológicos degradadores.

Paralelamente, o carácter hermético e contínuo do envelope construtivo contribui para reduzir significativamente os potenciais pontos de acesso e abrigo para este tipo de pragas (SIPCO, 2024).

A **resistência ao fogo** é um fator importante na avaliação da durabilidade e segurança das construções com o sistema SIP. Embora nenhum material seja intrinsecamente à prova de fogo, os SIP podem, tal como outras soluções construtivas, ser tratados com retardantes de chama, aumentando a sua resistência à exposição térmica. Além disso, a ausência de caixas de ar no interior das paredes, própria da estrutura monolítica dos painéis, limita a presença de oxigénio no sistema, reduzindo a propagação das chamas e melhorando o comportamento ao fogo face a soluções construtivas convencionais (SIPCO, 2024).

4.
PROJETO

O projeto proposto procura explorar as potencialidades do sistema construtivo SIP, apresentado no capítulo anterior, através do desenvolvimento de uma habitação unifamiliar concebida segundo um princípio de evolução vertical. A proposta assenta na ideia de uma construção faseada, inicialmente térrea, que permite posteriormente a sua ampliação através da adição de um novo piso, de acordo com as necessidades dos utilizadores ao longo do tempo.

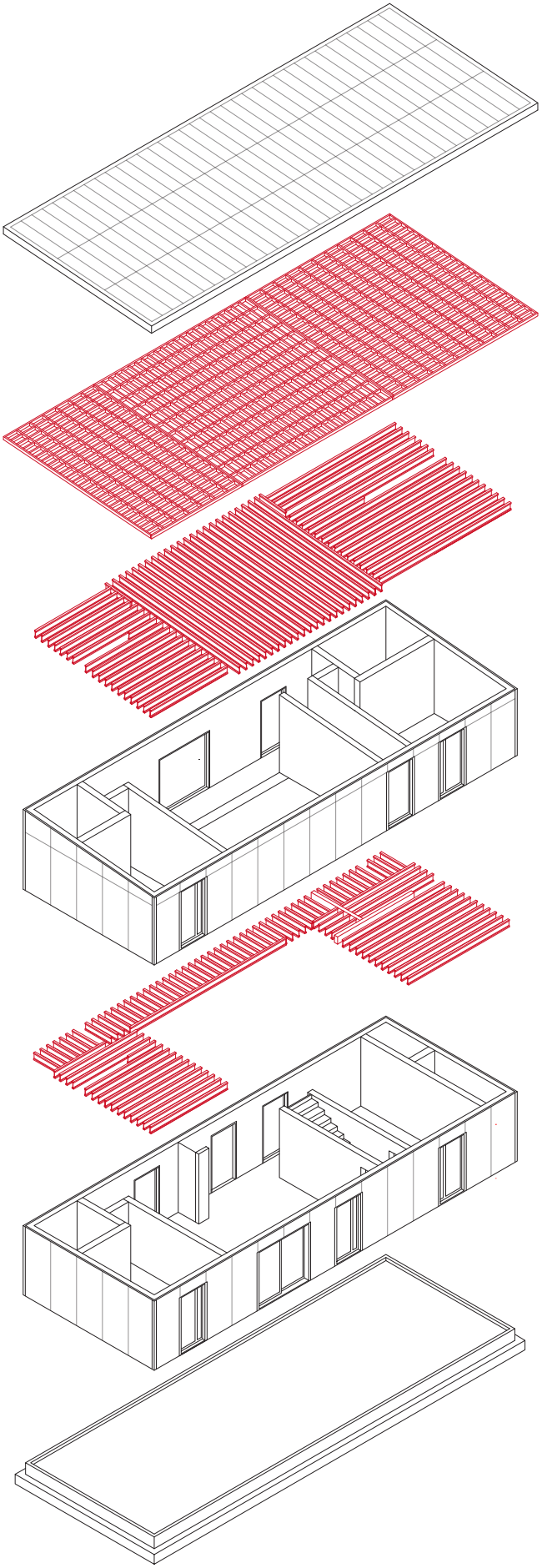
Importa salientar que, apesar da construção ocorrer em duas fases distintas, a conceção da primeira fase já prevê integralmente a futura ampliação. Desta forma, elementos fundamentais como o posicionamento das escadas, a estrutura resistente e a organização espacial são pensados desde o início para garantir uma integração do piso superior. Para além da definição antecipada das escadas, a própria estrutura necessária para suportar o futuro piso superior, bem como a execução do próprio piso em si, é igualmente executada na primeira fase, assegurando desde logo a capacidade resistente necessária para a ampliação prevista. Desta forma, também as áreas sociais são dimensionadas considerando a futura tipologia ampliada, evitando soluções provisórias ou adaptações forçadas numa fase posterior da construção.

A primeira fase da habitação, com cerca de 110 m^2, integra zona social de estar, cozinha, suíte, instalações sanitárias, lavandaria e uma área de arrumos aproveitando o espaço que fica por baixo das escadas, permitindo assegurar desde o início a plena funcionalidade da habitação.

No exterior, foi concebida uma estrutura independente da estrutura principal, destinada a criar uma zona coberta de entrada e simultaneamente possibilitar estacionamento protegido.

Numa segunda fase, o projeto prevê a ampliação vertical da habitação através da construção de um piso superior com cerca de 65 m^2. Este novo nível integra duas suítes, complementadas por áreas de circulação e acesso que contemplam um amplo varandim voltado para o pé-direito duplo da zona social.

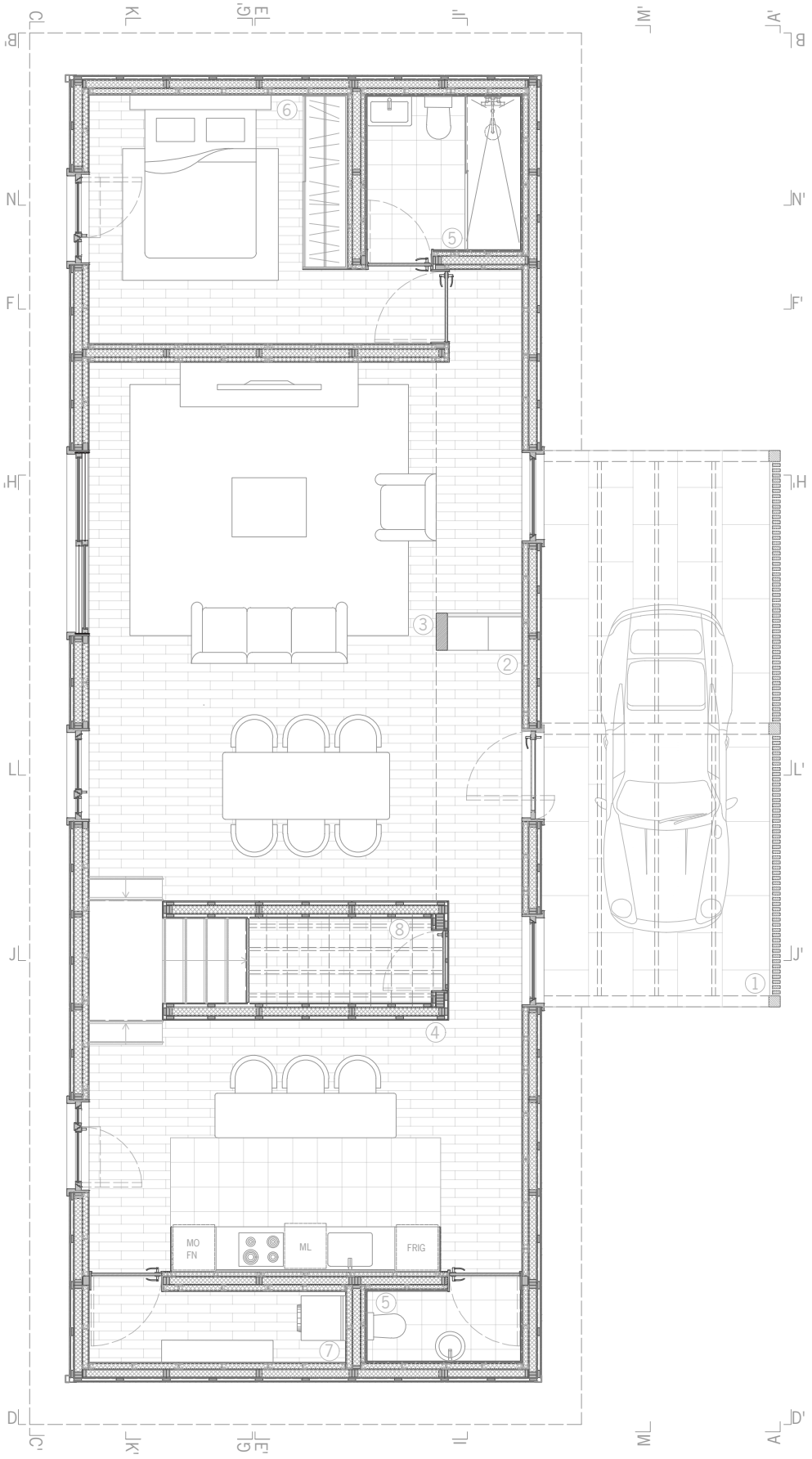
A criação deste espaço em pé-direito duplo implicou, contudo, a necessidade de resolver a estabilidade lateral da fachada, devido ao aumento da altura livre e à redução de pontos intermédios de travamento estrutural. Para garantir o contraventamento e a rigidez do conjunto, foi adotado um reforço nas juntas de união entre painéis, através da aplicação de barrotes de madeira de secção 70x100 mm no interior e de barrotes de 40x100 mm no exterior, permitindo melhorar o comportamento estrutural da fachada sem comprometer a leitura espacial e arquitetónica do espaço interior.



Relativamente ao sistema construtivo adotado, a composição dos painéis SIP segue a solução mais corrente e amplamente utilizada no setor, constituída por placas estruturais de OSB de 12 mm e núcleo isolante em XPS de 100 mm, devido ao equilíbrio entre desempenho estrutural, capacidade de isolamento térmico e relação custo-benefício. O projeto recorre ainda a uma dimensão *standard* de painéis de 1250x2500 mm. A definição dimensional da proposta procurou respeitar a modulação dos painéis *standard*, promovendo uma maior racionalização construtiva, redução de desperdício material e simplificação do processo de montagem em obra.

Devido aos vãos presentes na proposta, tornou-se necessário complementar o sistema SIP com uma estrutura principal que garanta o correto desempenho estrutural da habitação. Para esse efeito, recorreu-se à utilização de vigas do tipo I-Joist, compostas por banzos em LVL (*Laminated Veneer Lumber*) de 45x75 mm e alma em OSB de 12x230 mm com uma reentrância de 10 mm nos banzos. Estas vigas estão dispostas com um afastamento de 312,5 mm entre eixos, valor definido em função das medidas dos painéis utilizados, garantindo quatro vigas por painel. Para além desta estrutura principal, foi igualmente necessário desenvolver uma estrutura secundária destinada ao suporte da cobertura, cuja constituição e funcionamento serão abordados com maior detalhe posteriormente (Fig. 86).

Fig. 86
Axonometria explodida do projeto proposto



1. Zona de acesso coberto 2. Entrada 3. Área Social 4. Cozinha 5. Instalações Sanitárias 6. Quarto 7. Lavandaria 8. Despensa

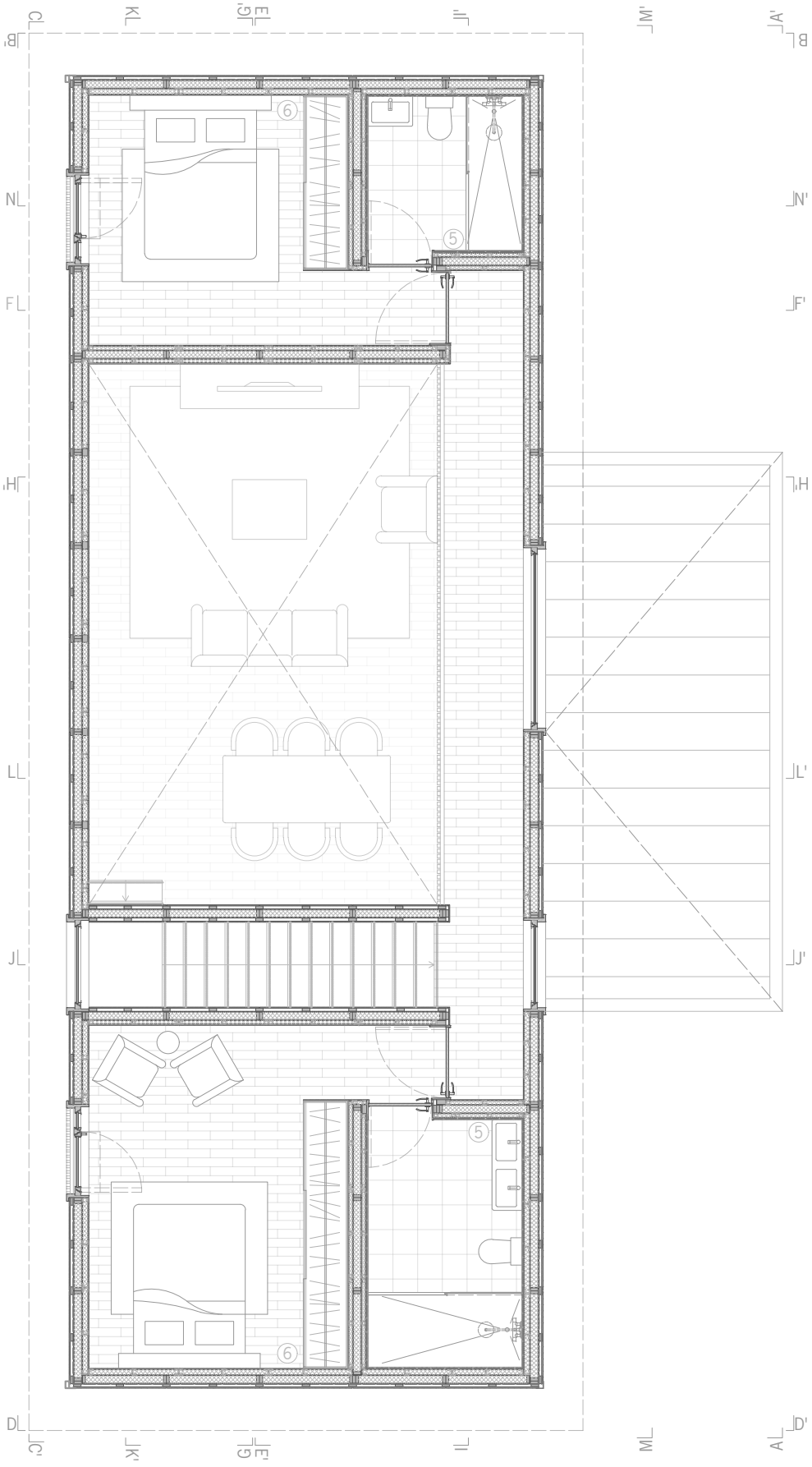
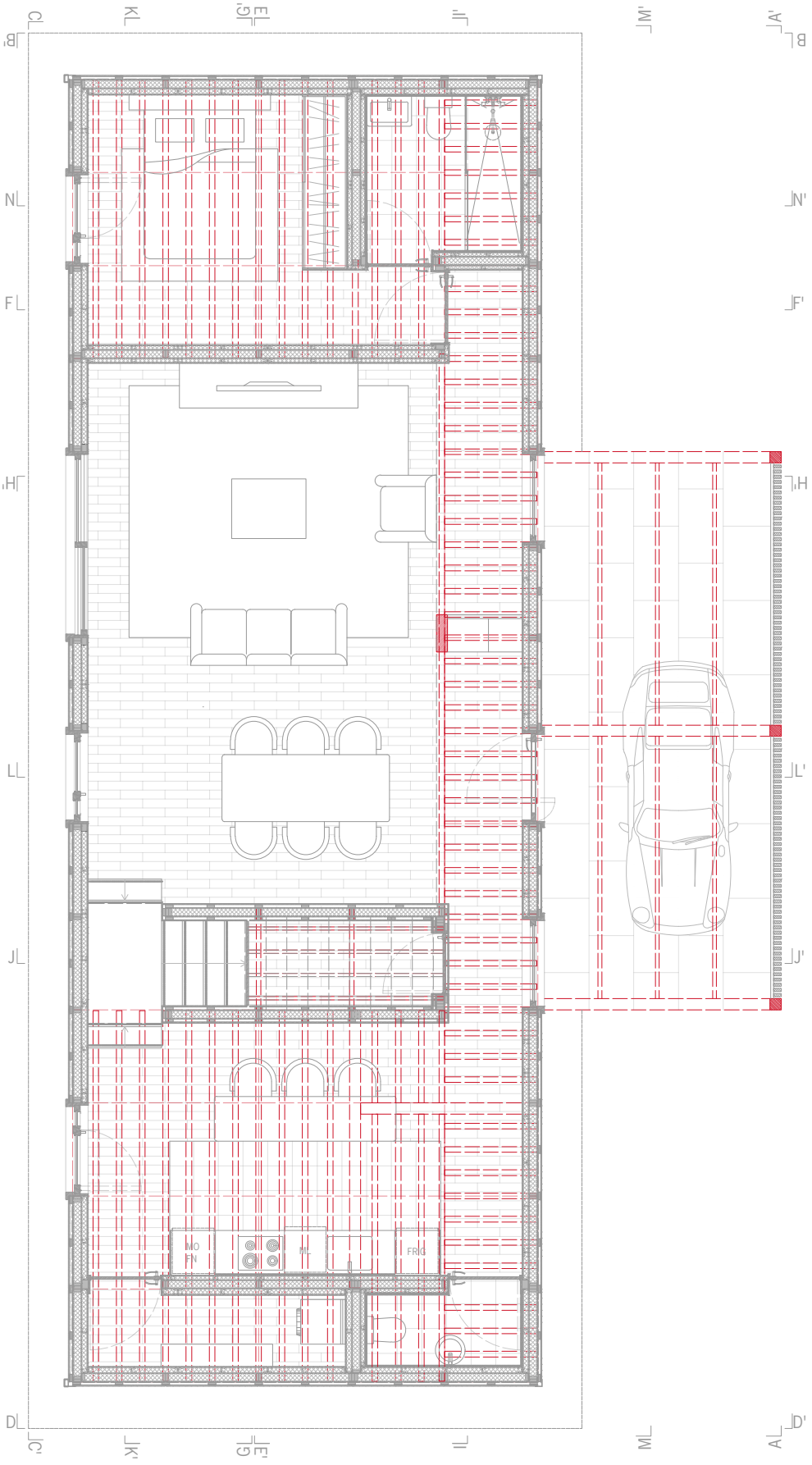


Fig. 87 e 88
Plantas piso térreo e primeiro piso

0 1 2 4m


C
K
G
E
I
M
A
B
N
F
H
L
J
D
MO
FN
FRIG

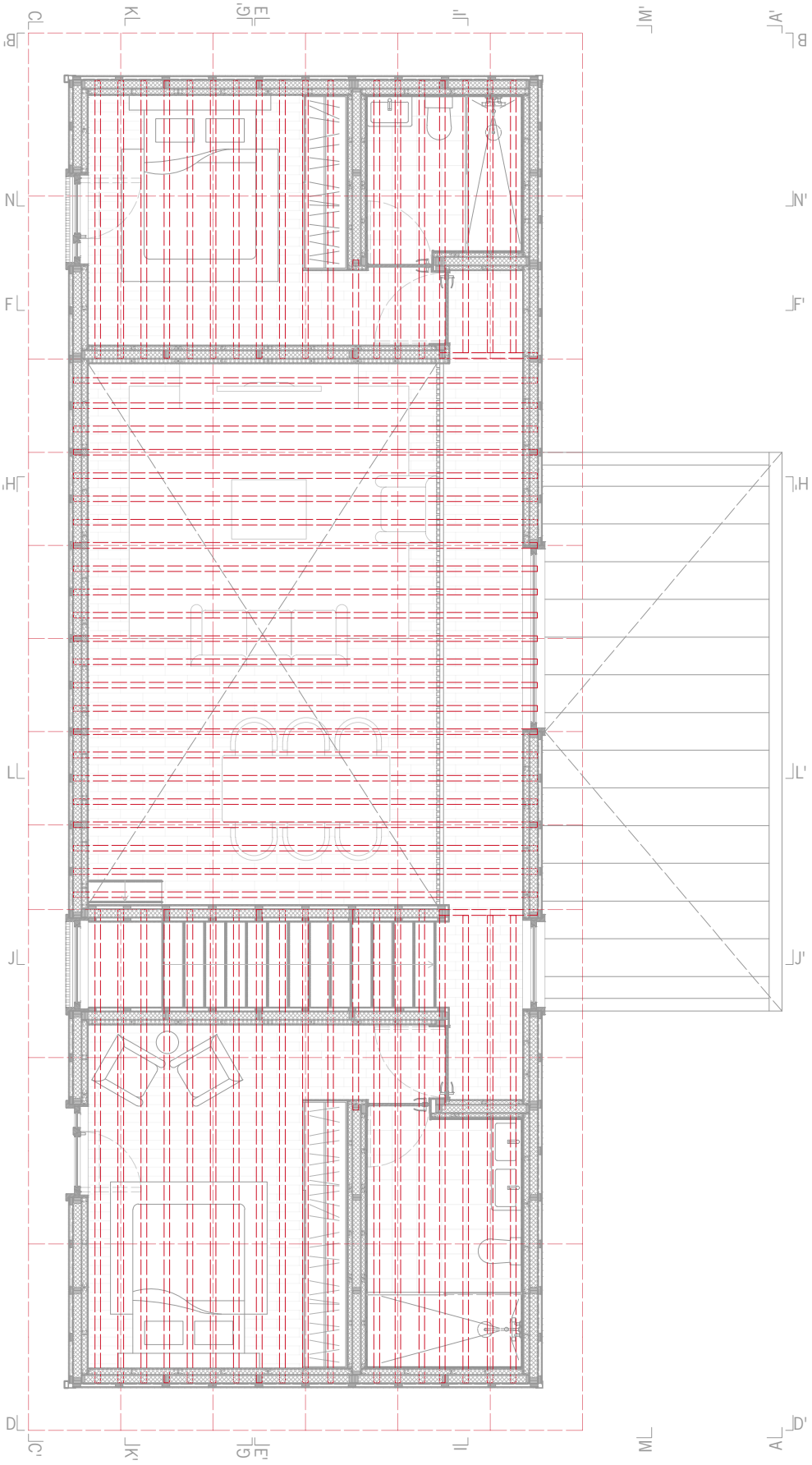
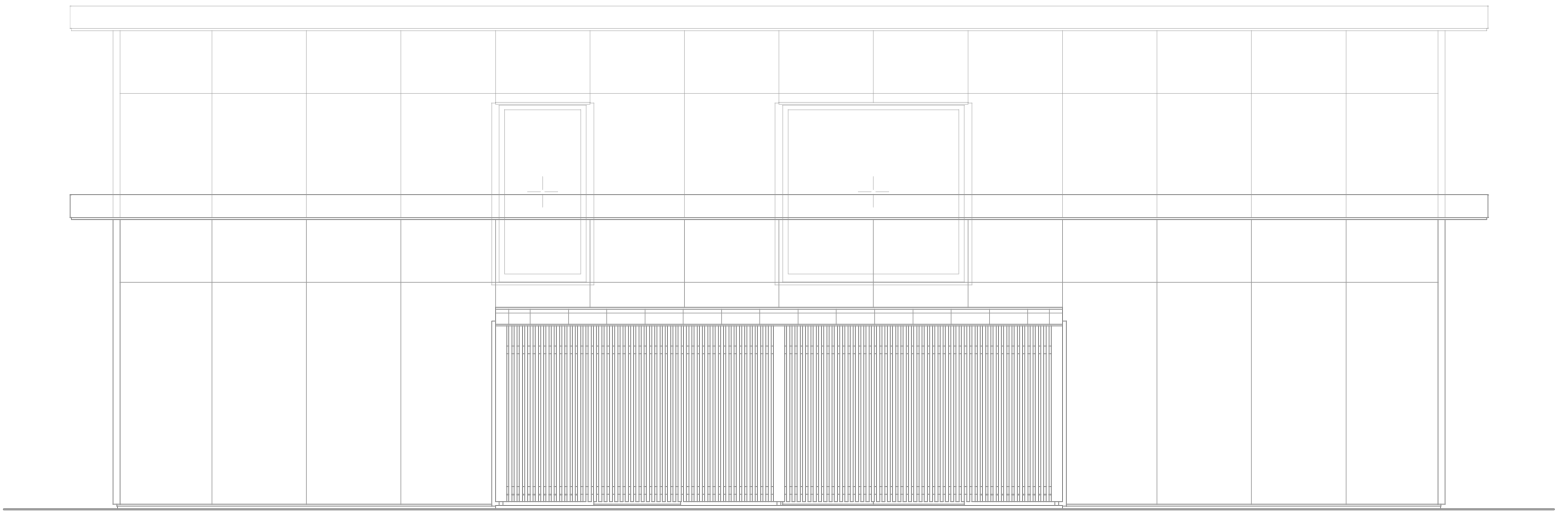
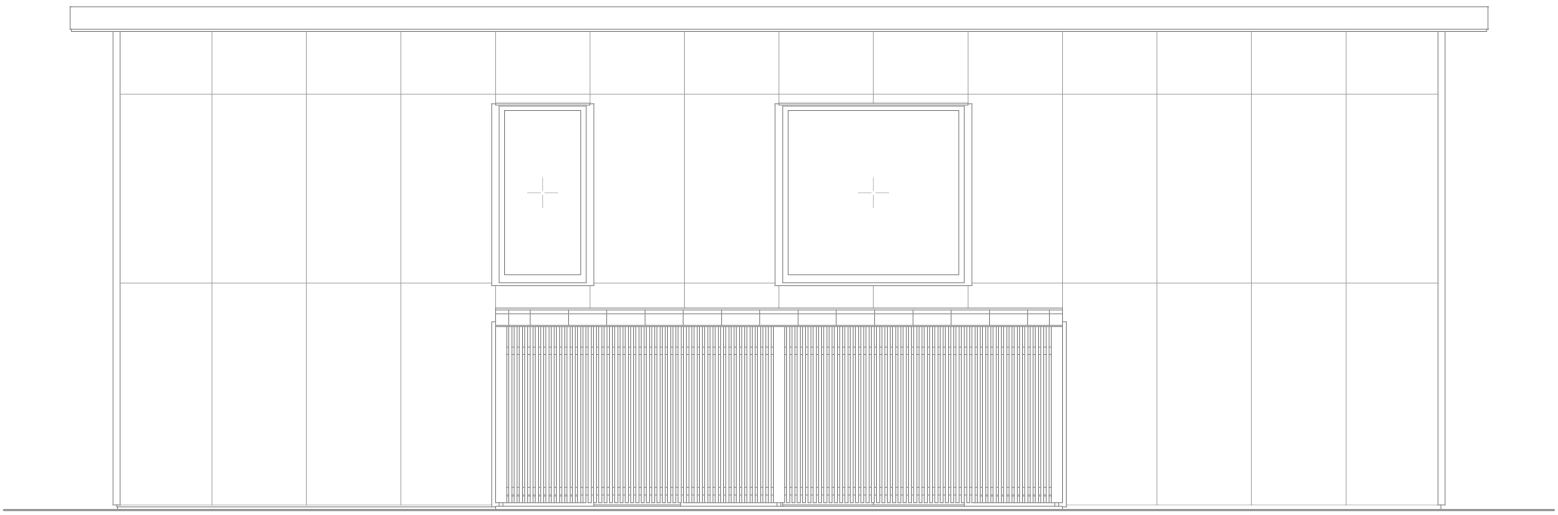
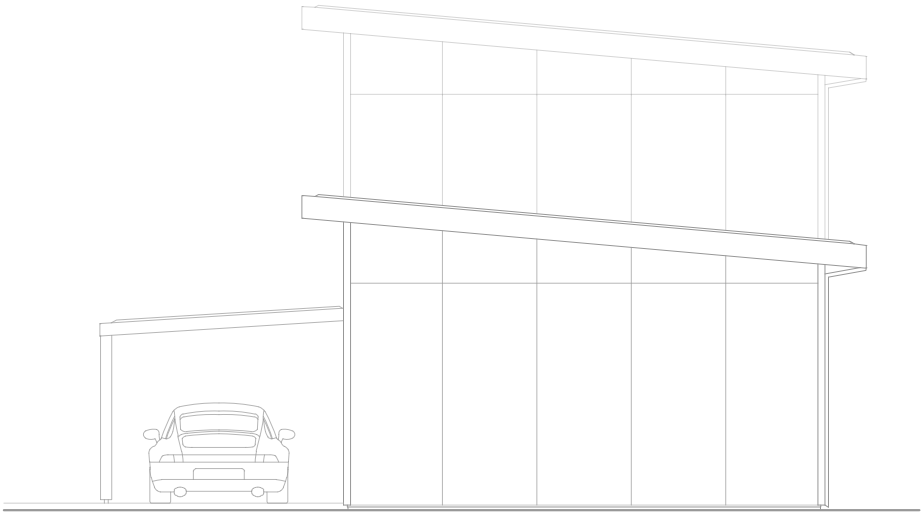


Fig. 89 e 90
Plantas estruturais piso térreo e primeiro piso

0 1 2 4m







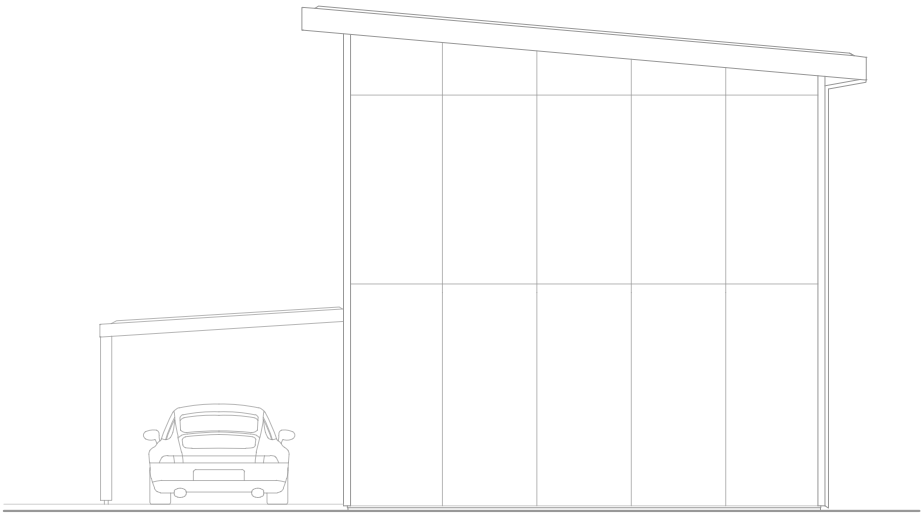
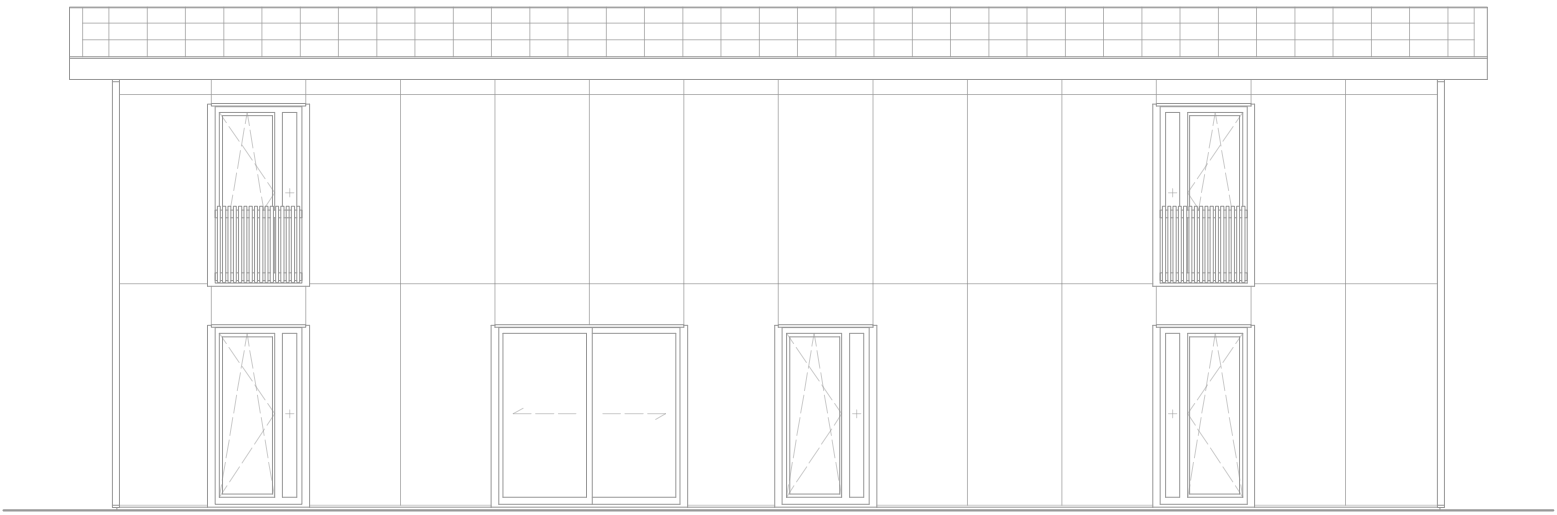
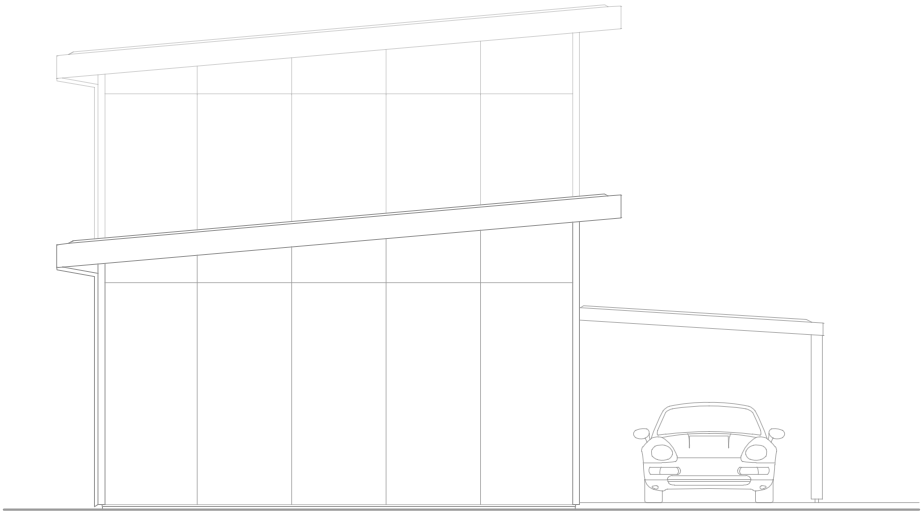


Fig. 91 e 92
Alçados AA' e BB'

0 1 2 4m







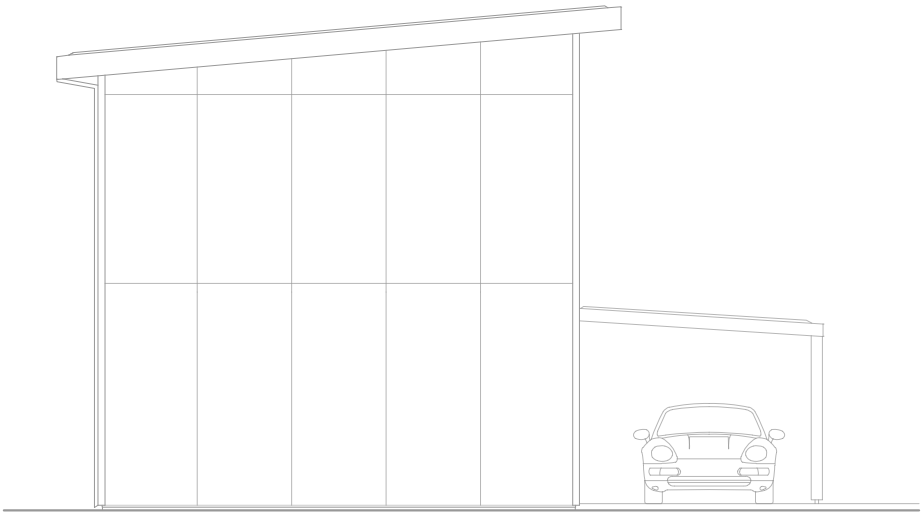
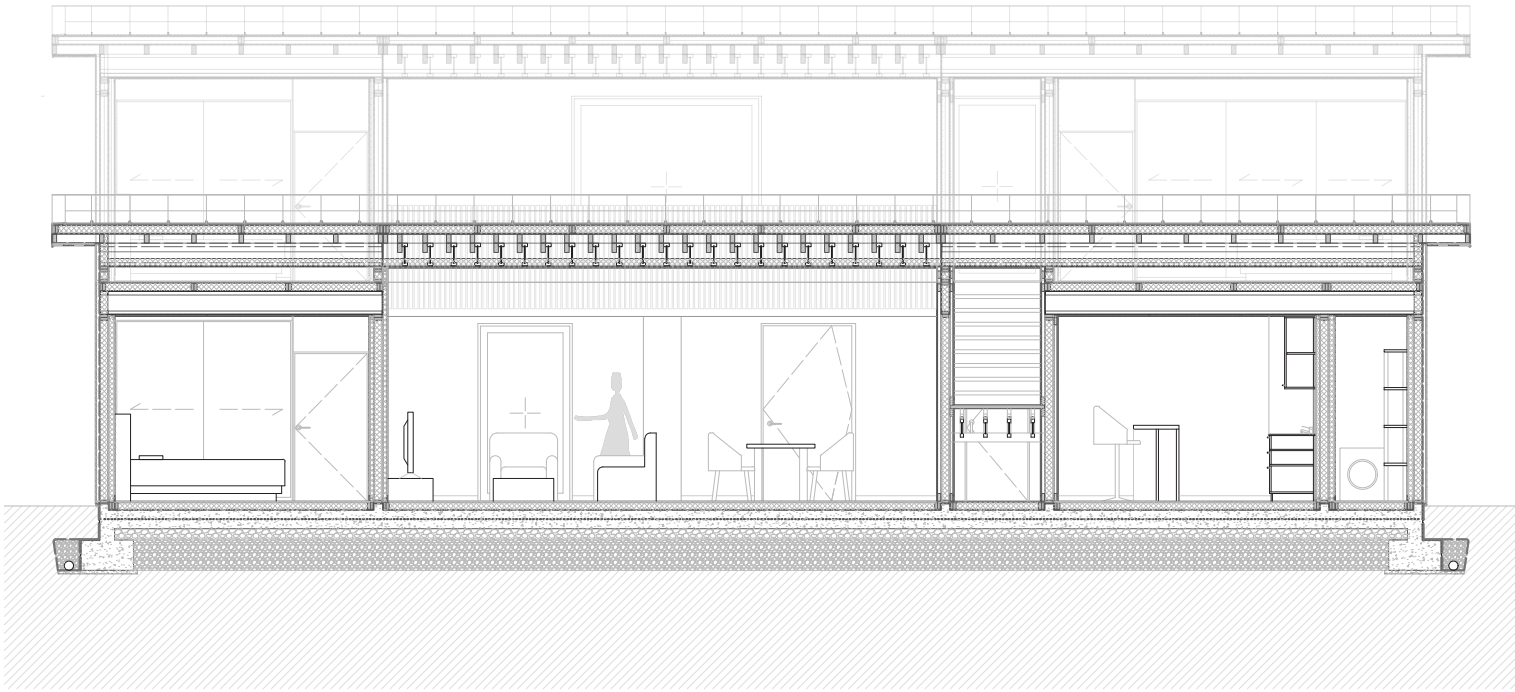
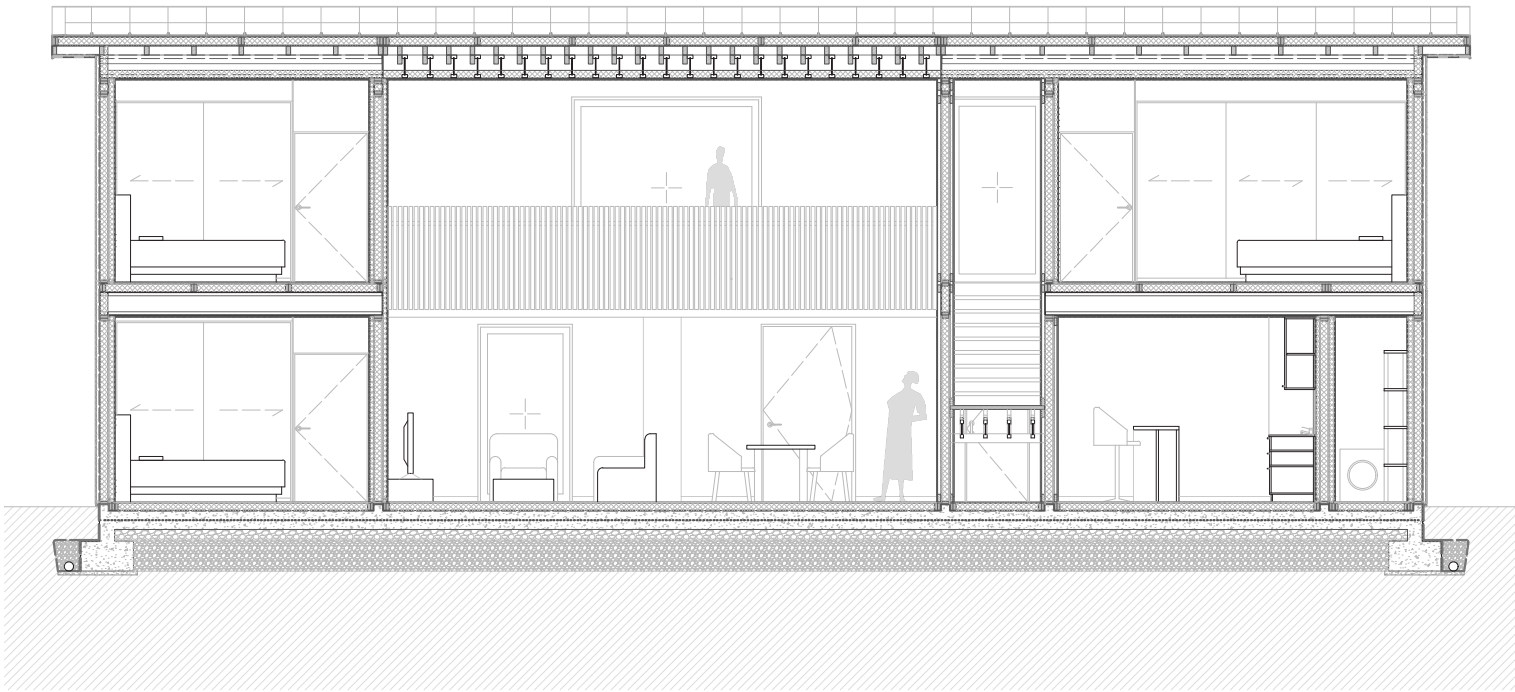
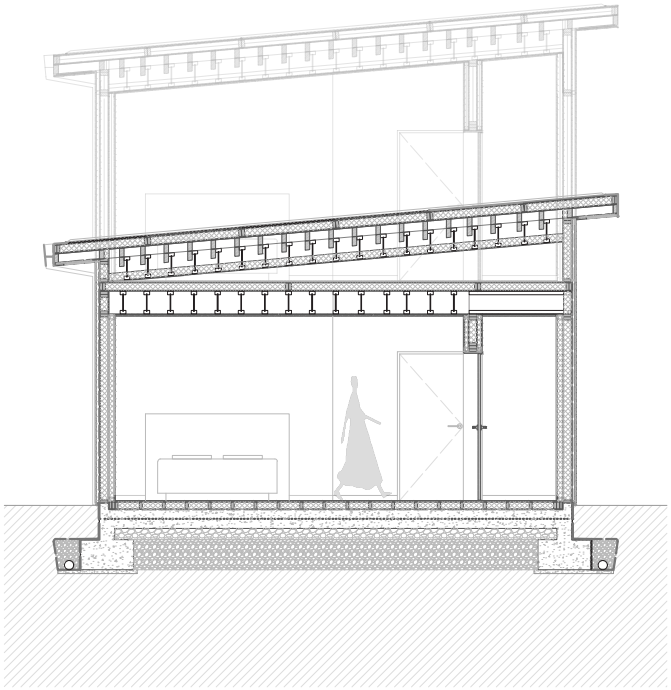


Fig. 93 e 94
Alçados CC' e DD'

0 1 2 4m







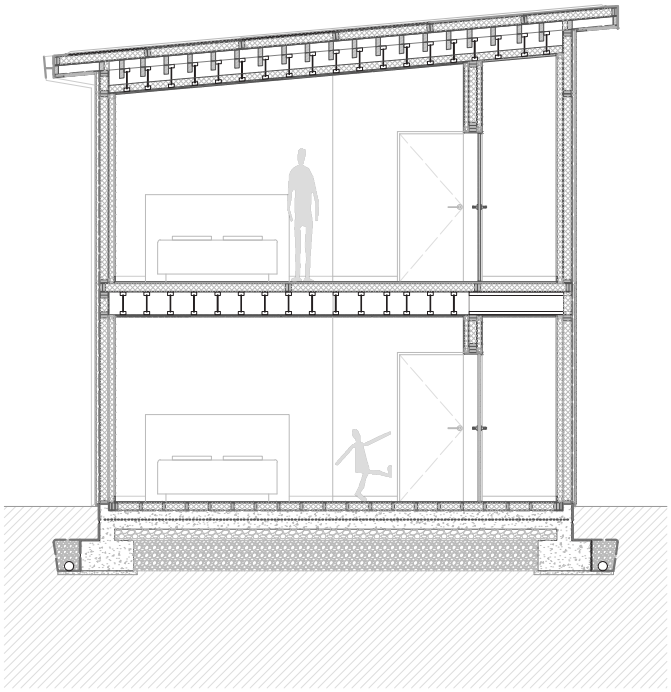
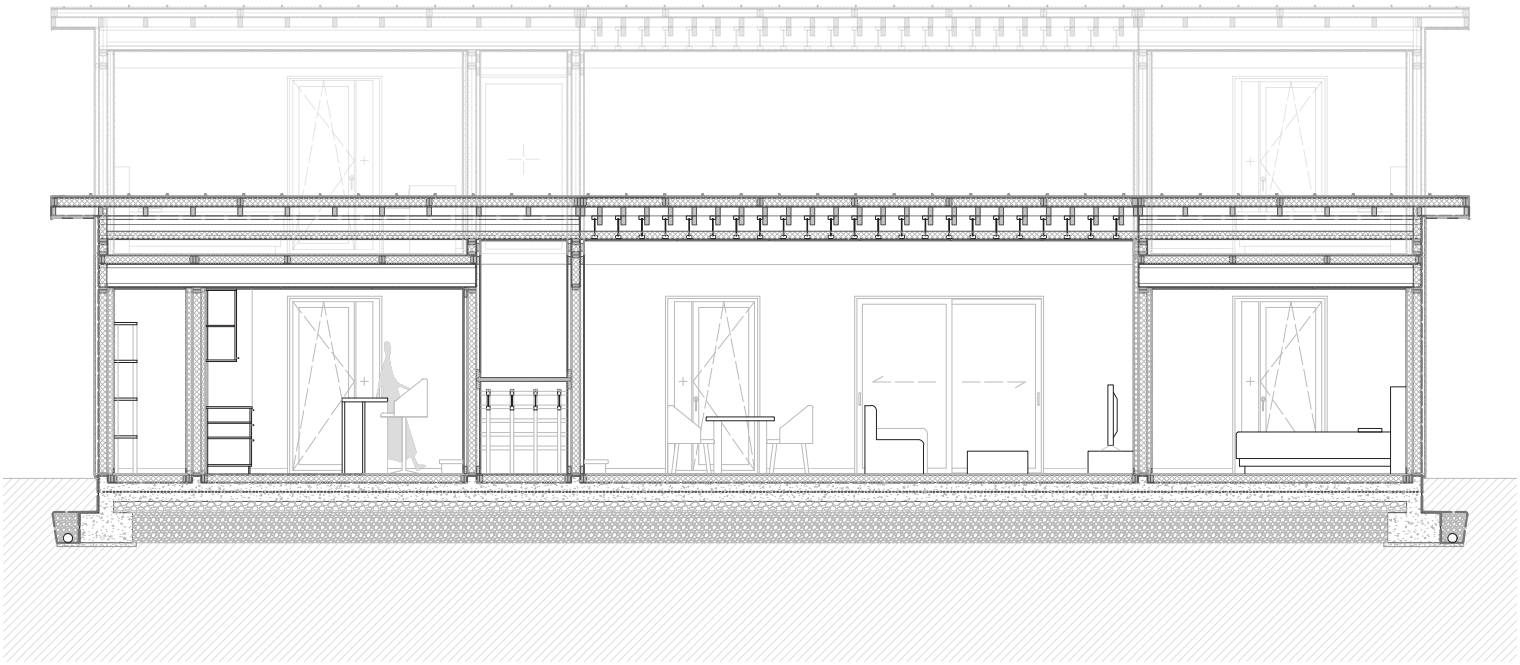
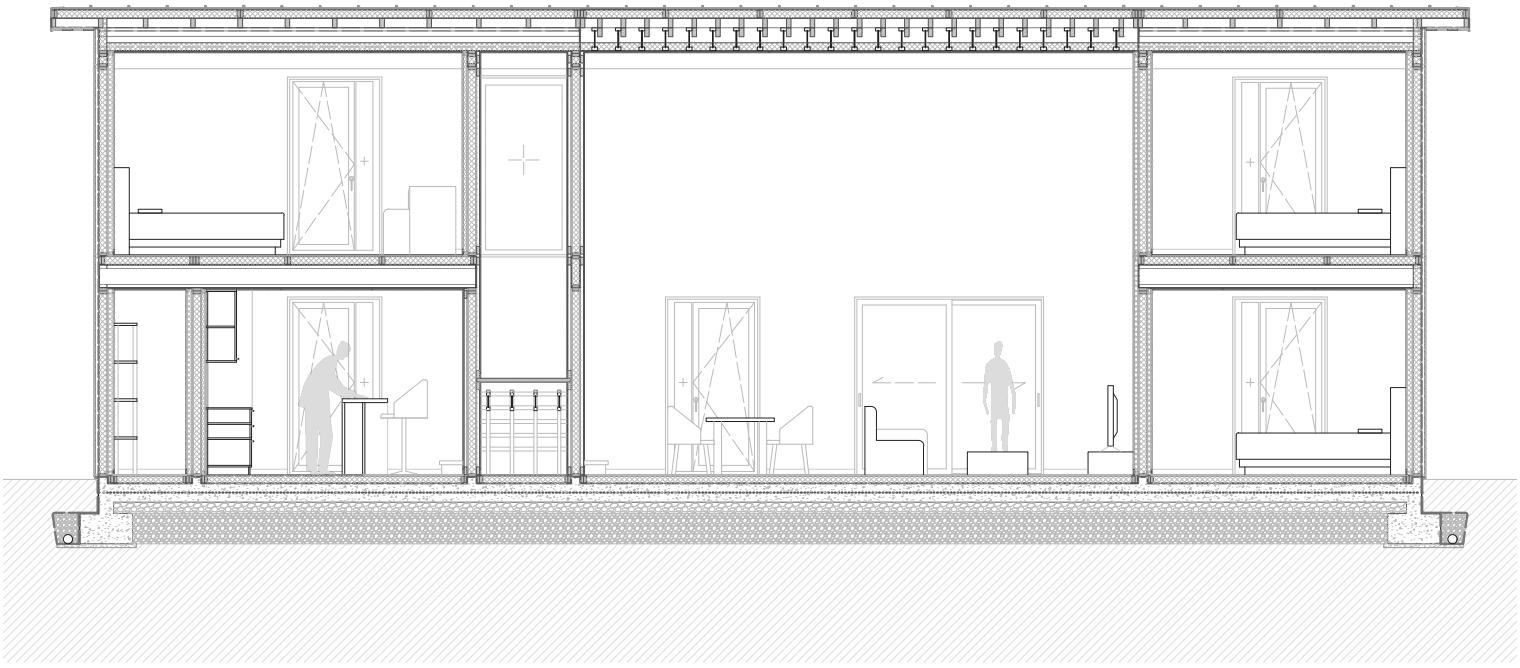
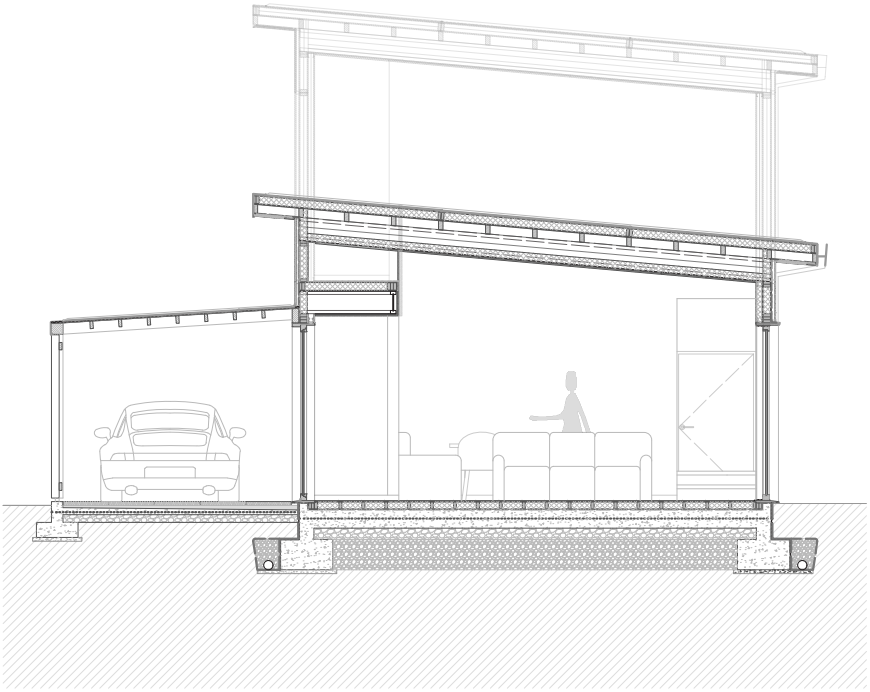


Fig. 95 e 96
Cortes EE' e FF'

0 1 2 4m







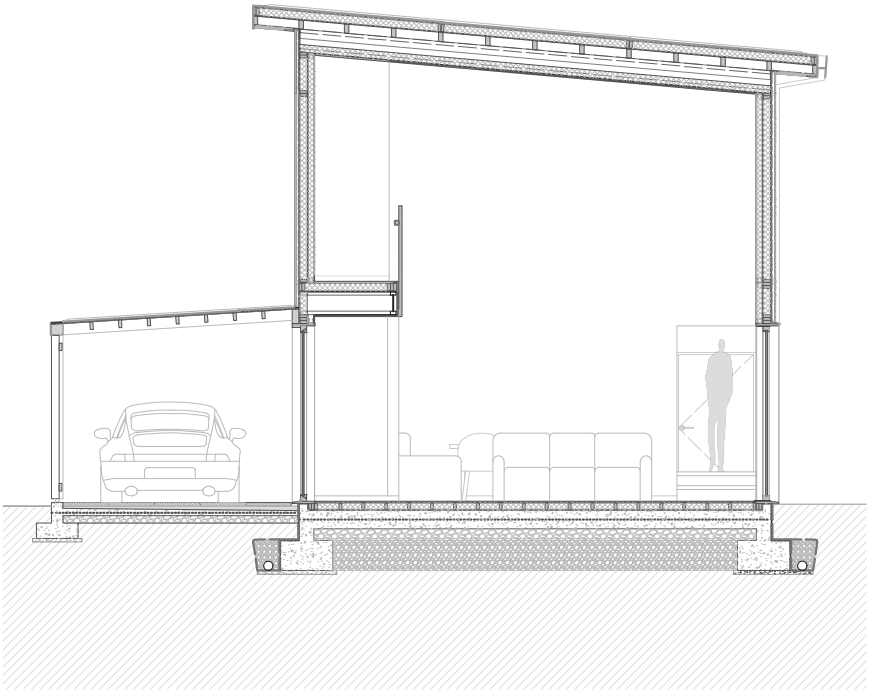
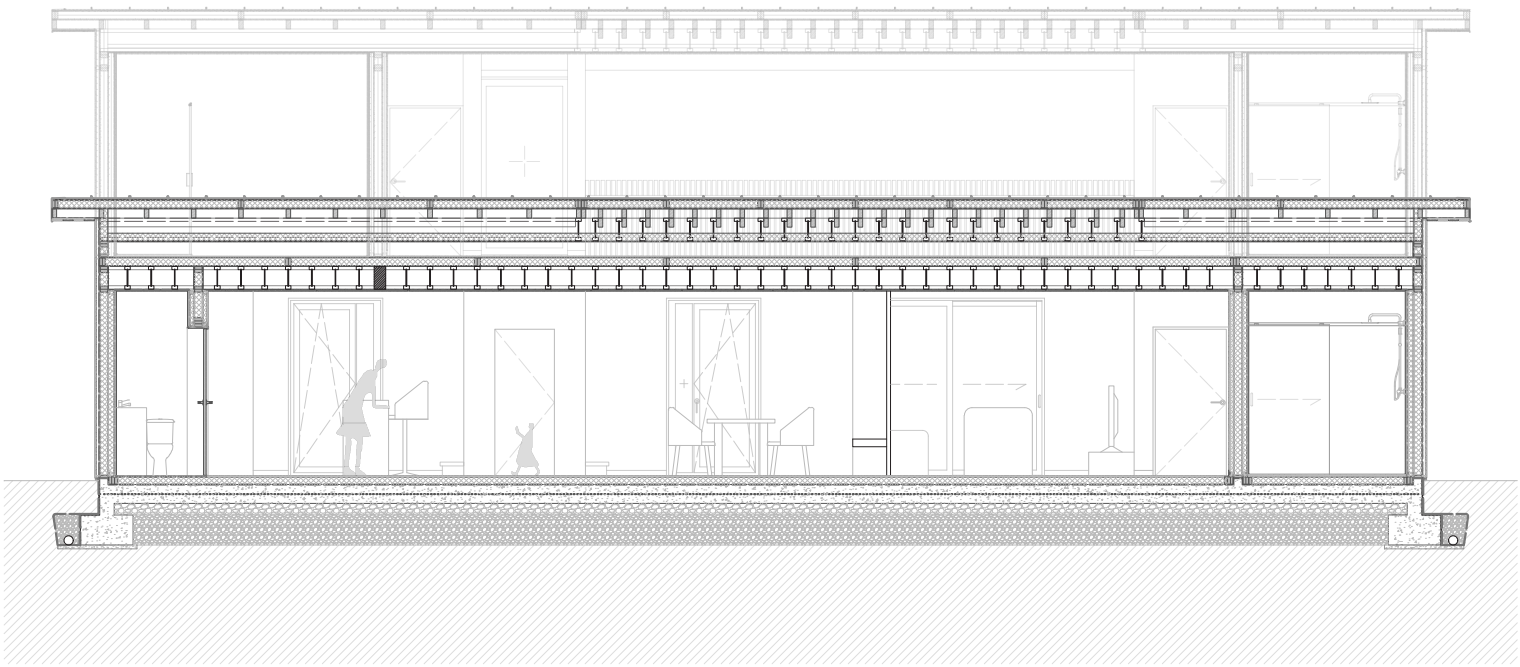
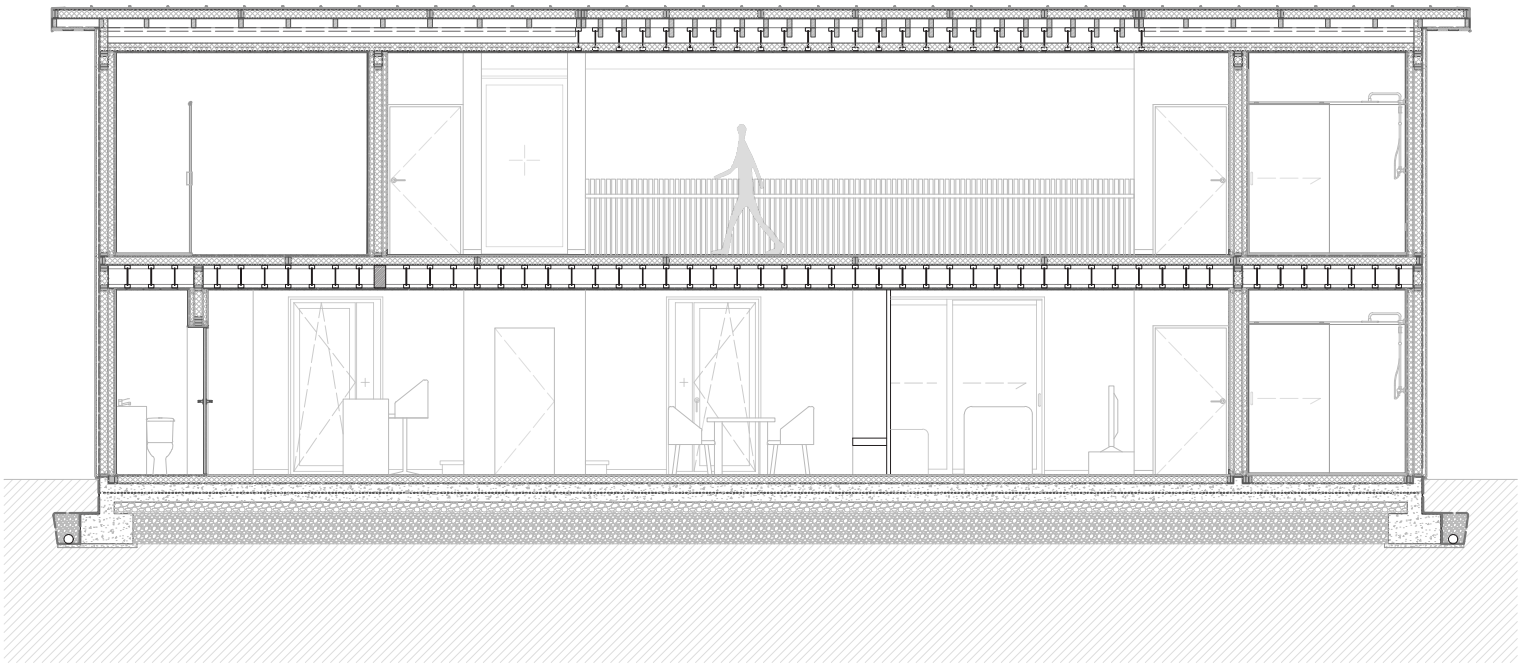
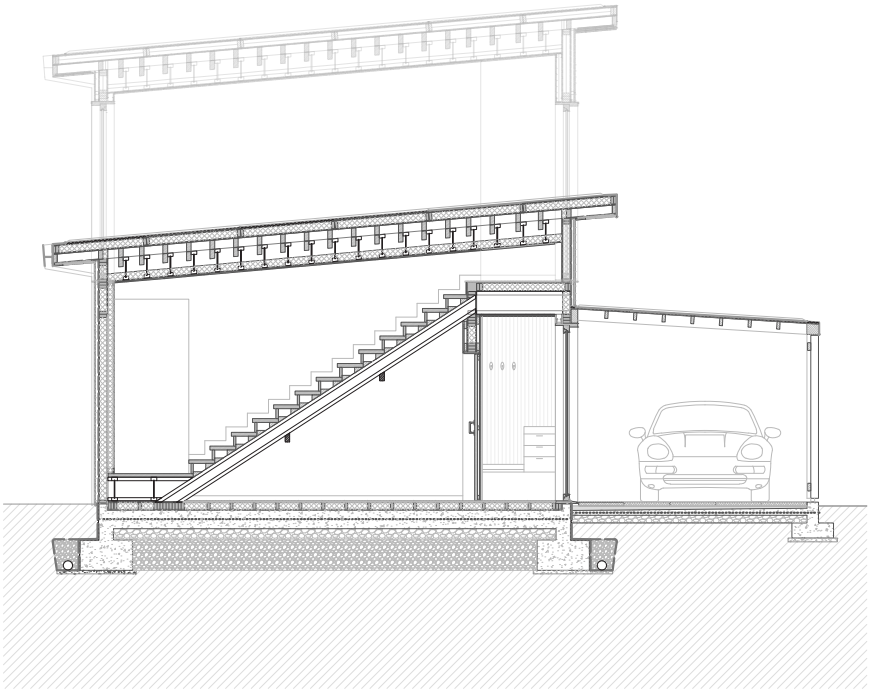


Fig. 97 e 98
Cortes GG' e HH'

0 1 2 4m







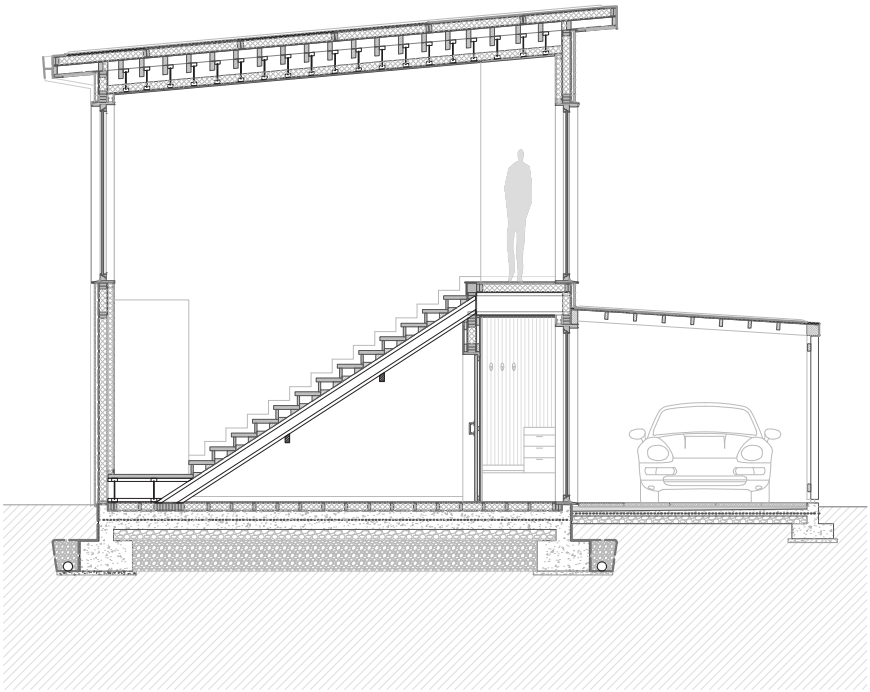
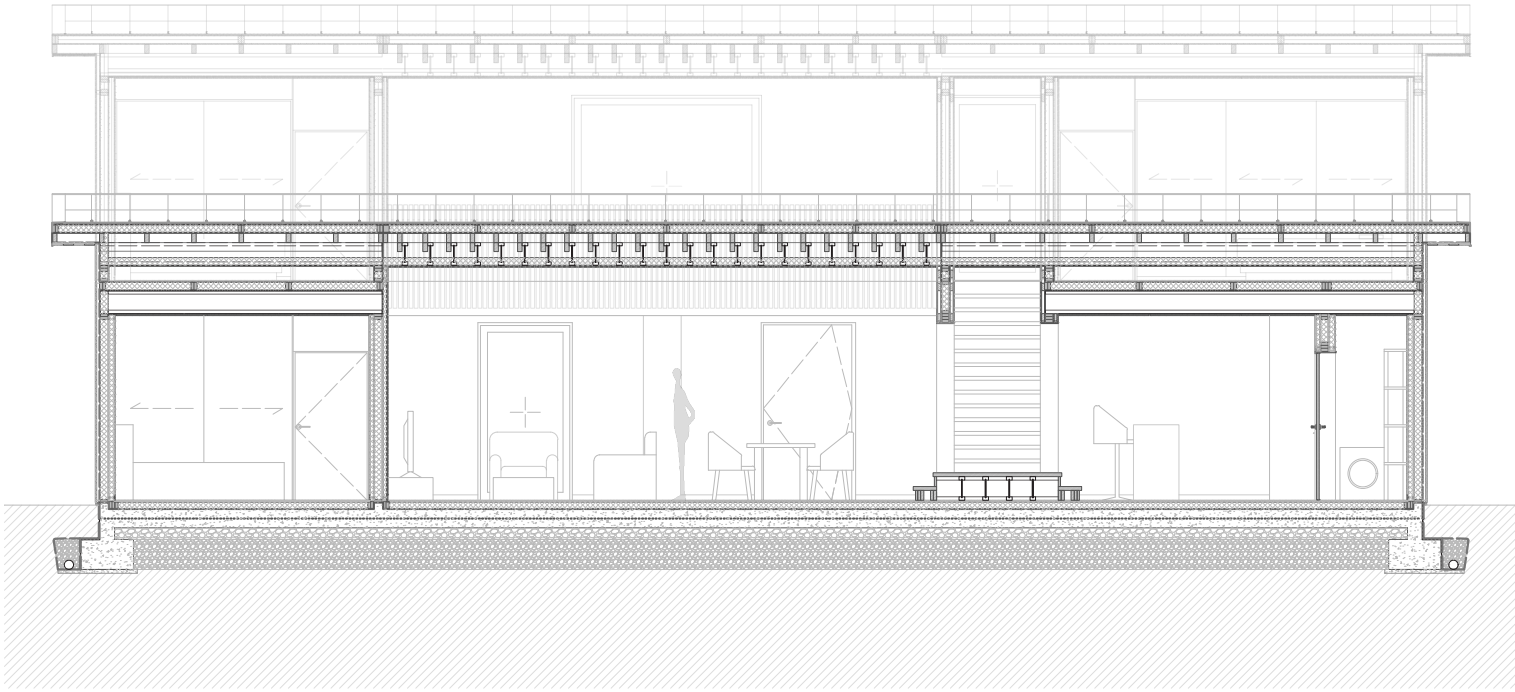
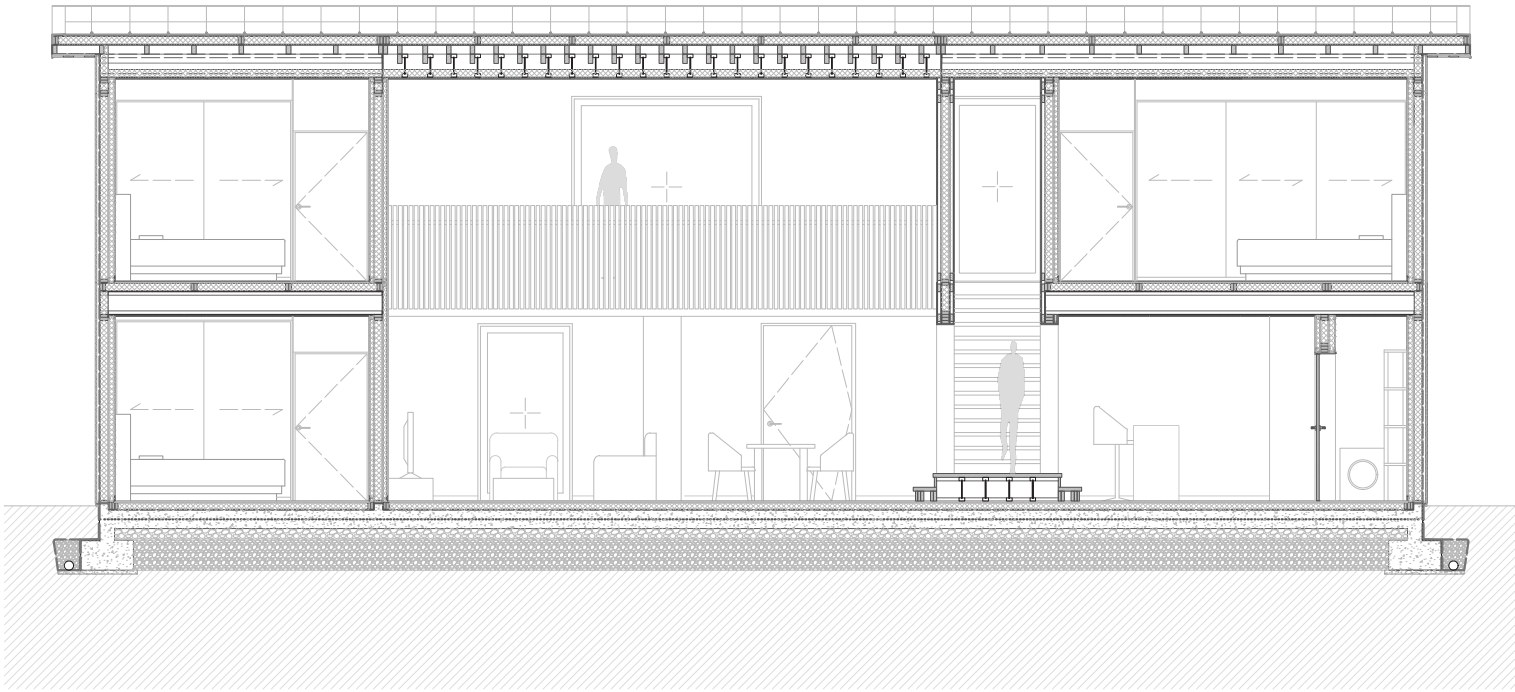
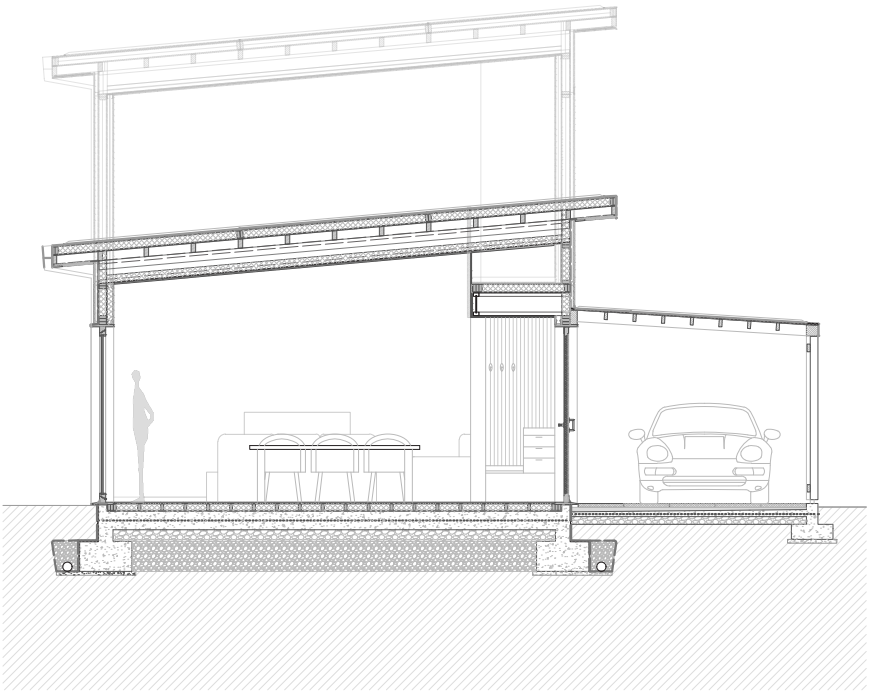


Fig. 99 e 100
Cortes II' e JJ'

0 1 2 4m







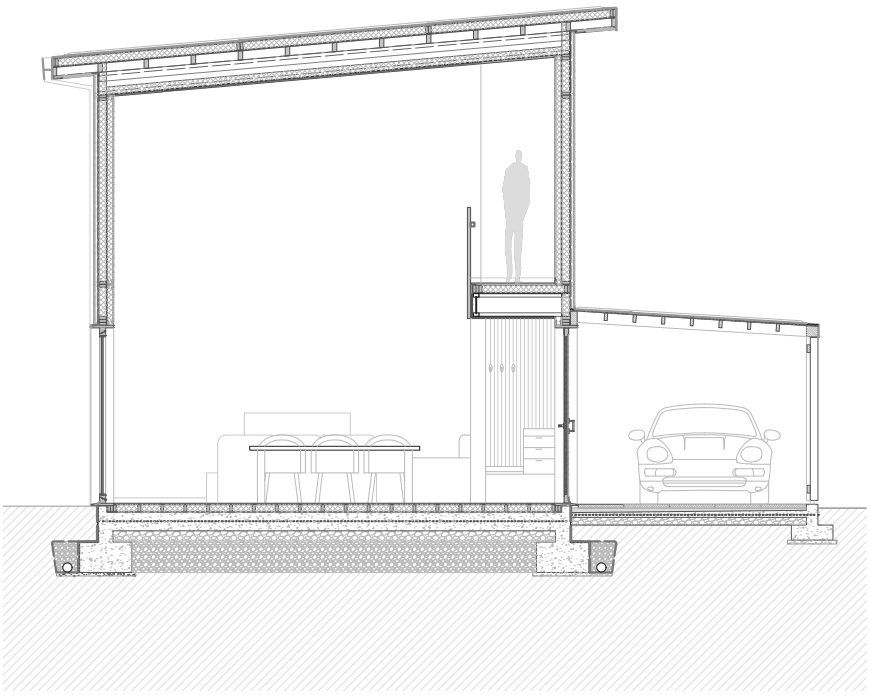
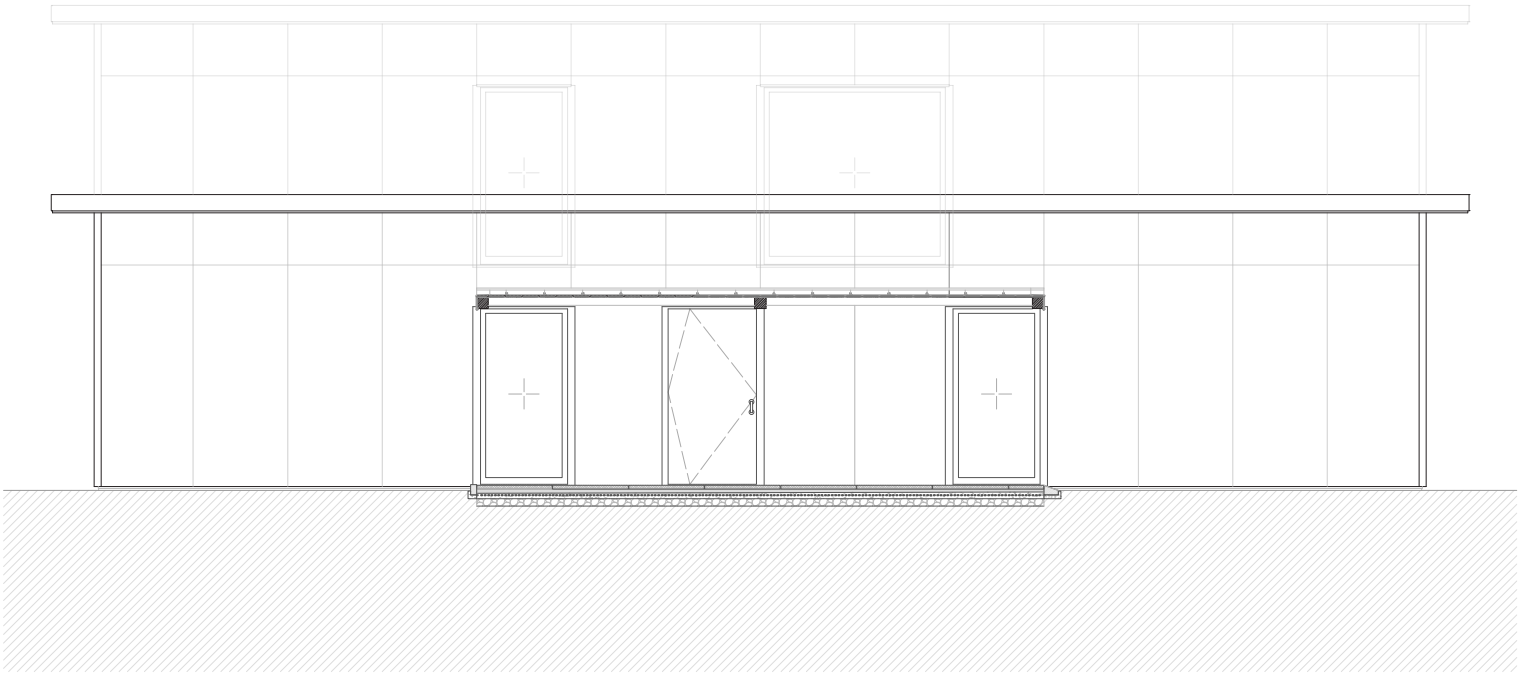
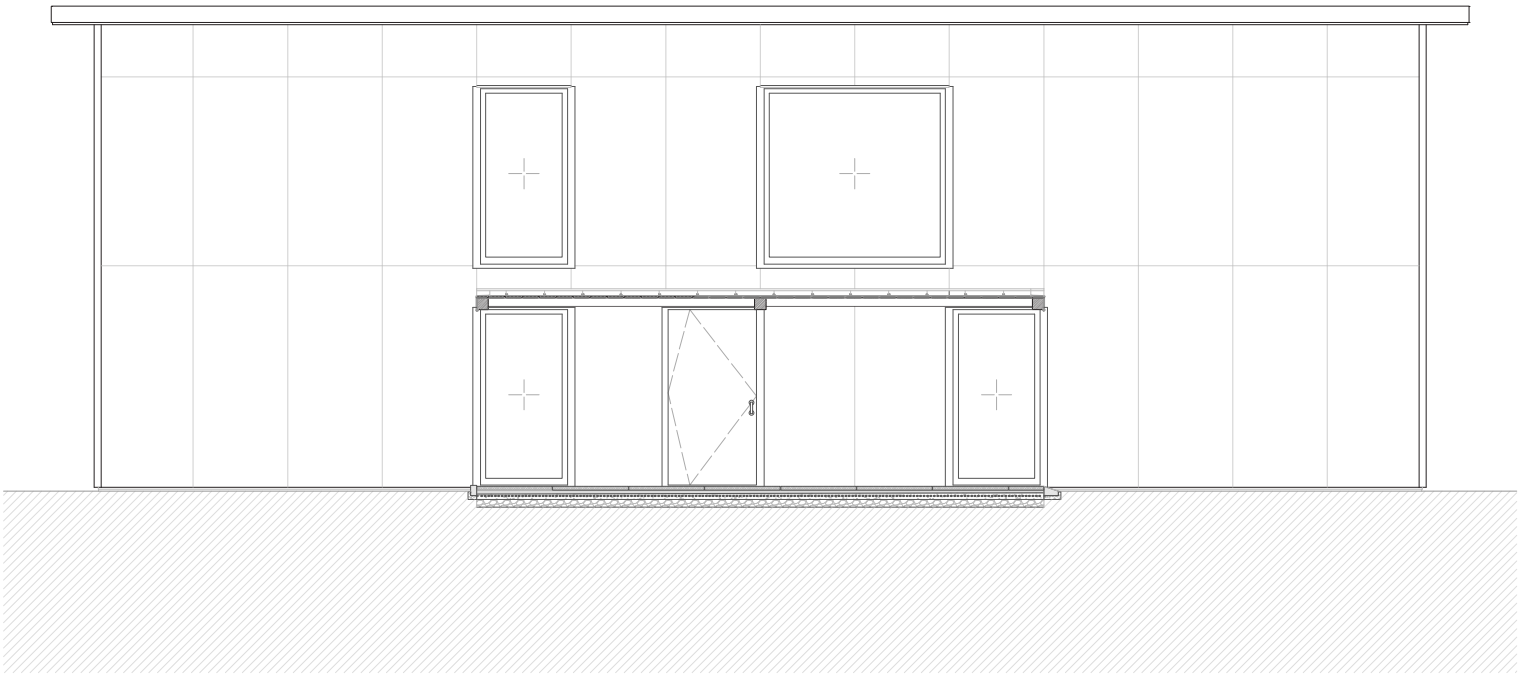
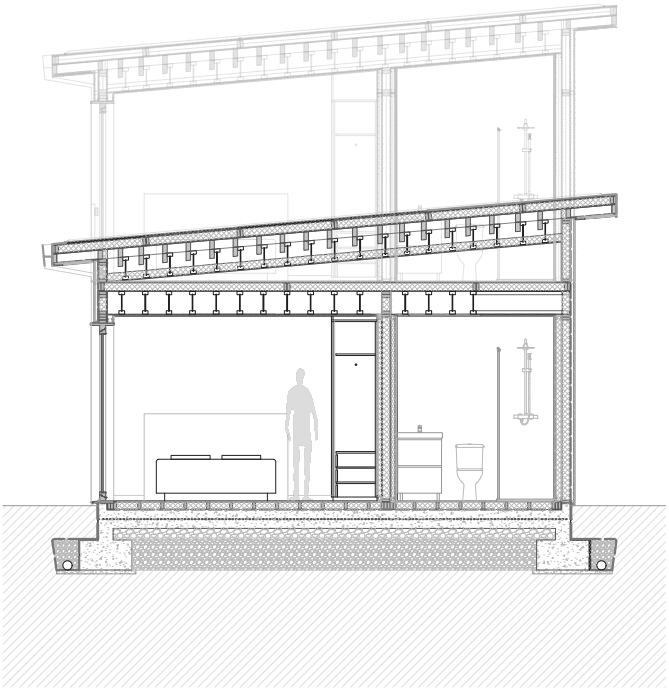


Fig. 101 e 102
Cortes KK' e LL'

0 1 2 4m







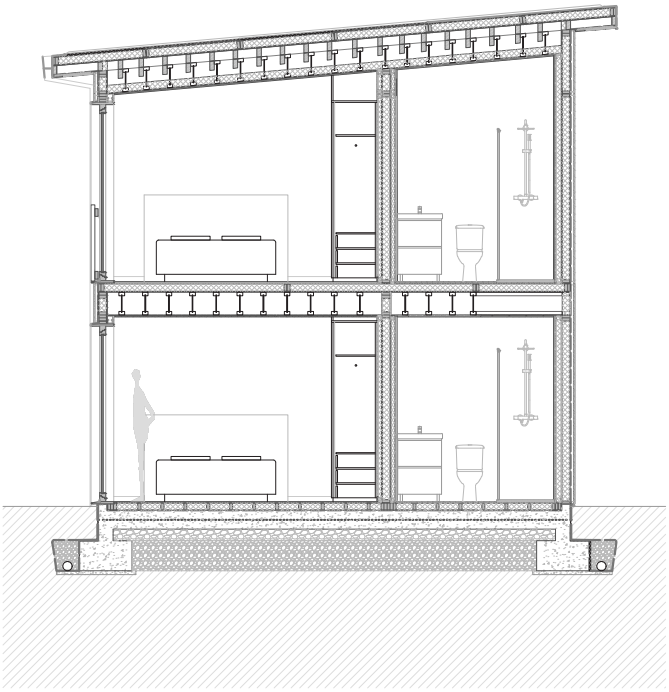
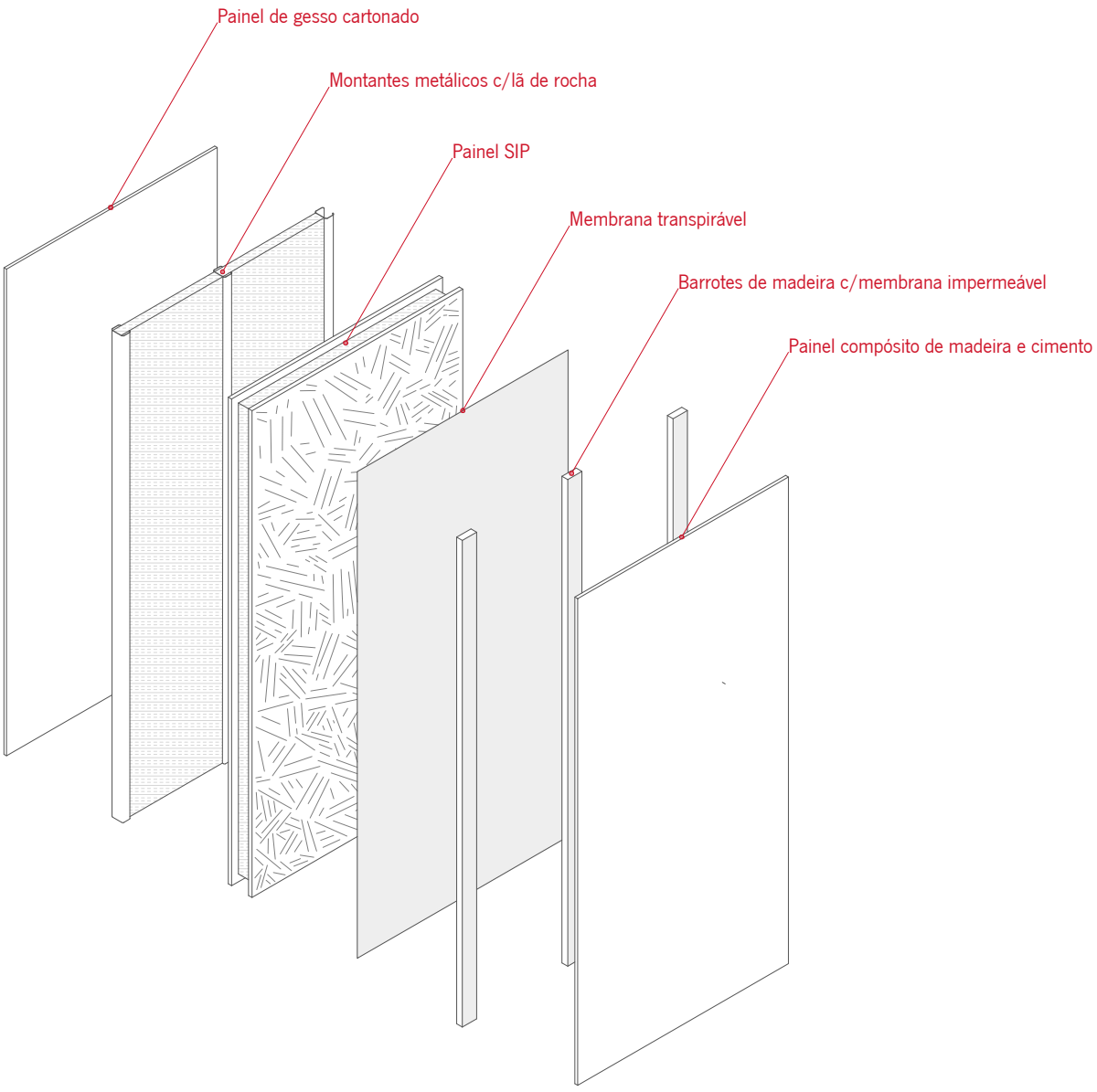


Fig. 103 e 104
Cortes MM' e NN'

0 1 2 4m


Painel de gesso cartonado
Montantes metálicos c/lã de rocha
Painel SIP
Membrana transpirável
Barrotes de madeira c/membrana impermeável
Painel compósito de madeira e cimento

A definição construtiva e a pormenorização do projeto assumem um papel fundamental na adaptação do sistema SIP às exigências funcionais, térmicas e acústicas da habitação proposta. Nesse sentido, a composição dos diferentes elementos construtivos foi desenvolvida para complementar as características do sistema, garantindo desempenho técnico, durabilidade e compatibilidade com a pré-fabricação.

A envolvente exterior (Fig. 105) é integralmente protegida por uma membrana impermeável e transpirável aplicada sobre os painéis SIP, evitando o contacto direto da humidade com as placas de OSB, mas deixa o vapor do interior da casa sair, evitando condensações. Esta camada é essencial na proteção contra infiltrações e condensações, contribuindo para a durabilidade e preservação das propriedades estruturais dos painéis.

No exterior, a solução de acabamento recorre a painéis compósitos de madeira e cimento aplicados sobre uma subestrutura de barrotes de madeira tratados com autoclave fixos à estrutura principal criando uma caixa de ar ventilada.

No interior, o revestimento é gesso cartonado, aplicados sobre montantes metálicos de 70 mm, em vez de fixação direta ao OSB. Esta solução cria um espaço técnico entre o OSB e o acabamento interior, permitindo a colocação de lã de rocha para reforço do isolamento acústico, compensando a reduzida performance do XPS dos painéis SIP, e facilitando a passagem de instalações elétricas e hidráulicas.

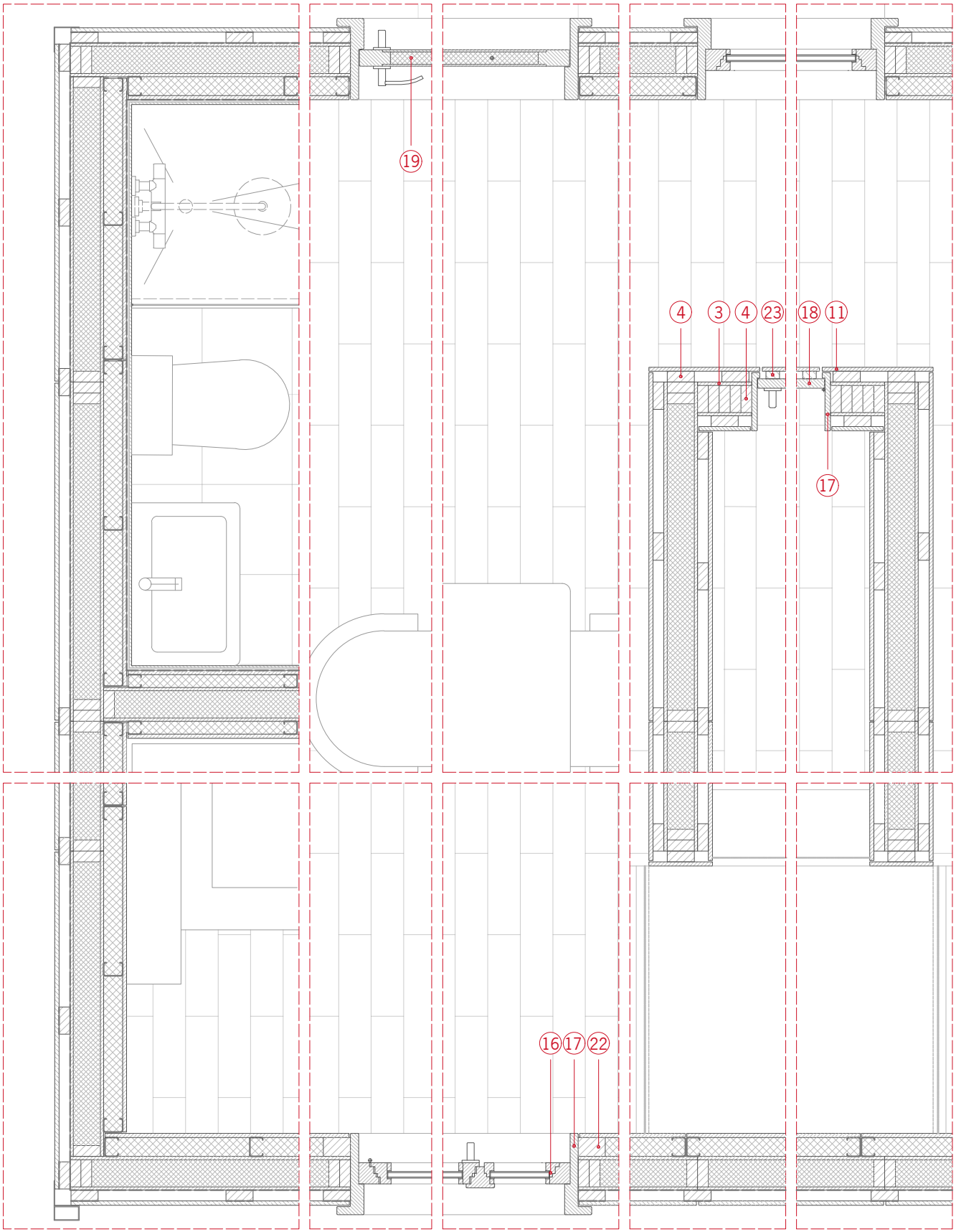
Nas zonas húmidas, como instalações sanitárias e cozinha, utilizam-se placas de gesso cartonado hidrófugo, complementadas com membranas impermeáveis, argamassas de colagem e revestimento cerâmicos nas paredes e pavimentos.

Nas divisórias interiores, onde as exigências acústicas são menores, optou-se pela utilização de montantes metálicos 48 mm.

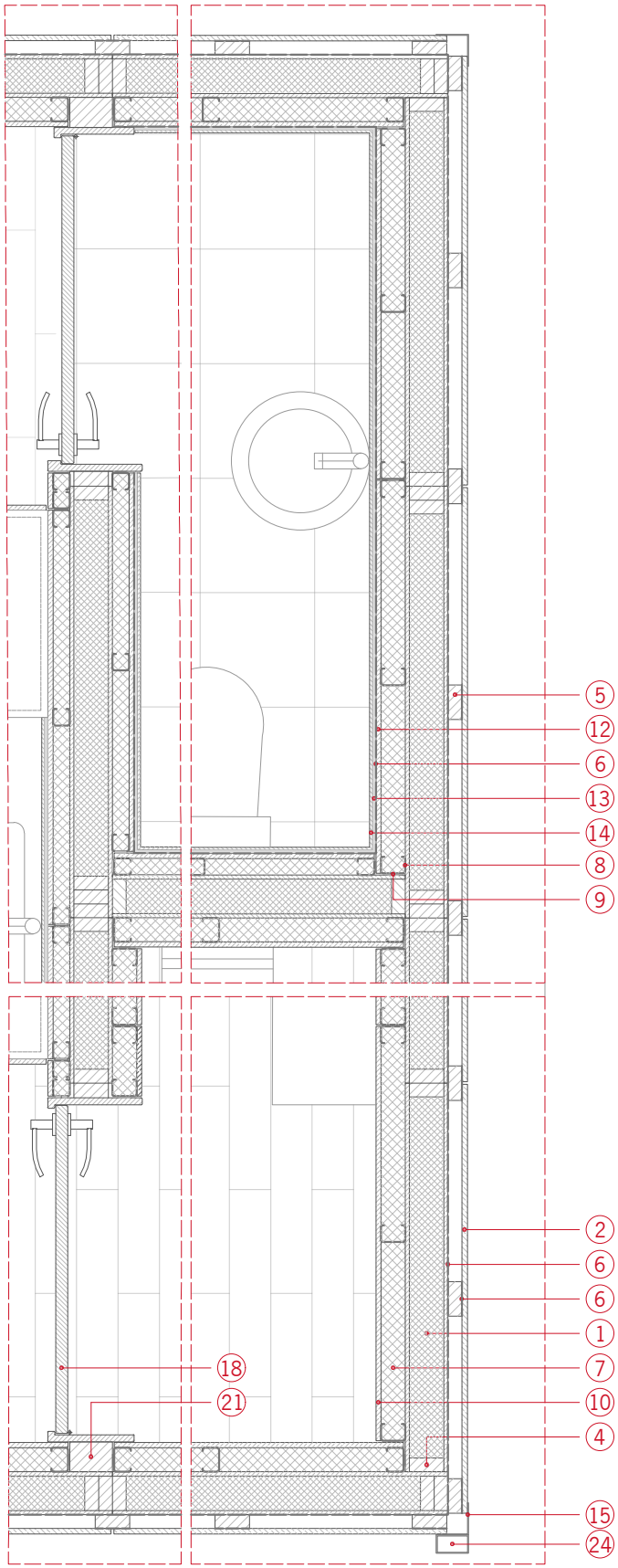
Relativamente à cobertura, recorre-se a chapa zincada pela sua leveza face a soluções convencionais, reduzindo as cargas permanentes aplicadas sobre a estrutura. Contudo, devido ao seu fraco desempenho acústico face ao impacto da chuva, é aplicada uma camada de 100 mm de lã de rocha para minimizar o ruído.

Tal como referido, o projeto utiliza vigas I-Joist no suporte do piso superior e da cobertura, com 300 mm de altura, dimensão que cumpre função estrutural e funciona também como zona técnica para passagem de infraestruturas e isolamento acústico.

Fig. 105
Axonometria explodida das camadas de uma parede exterior



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Barrote de madeira 9. Tratamento de junta 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem madeira 19. Porta exterior de madeira com isolamento 20. Barrote de madeira 85x124 mm 21. Barrote de madeira 65x124 mm



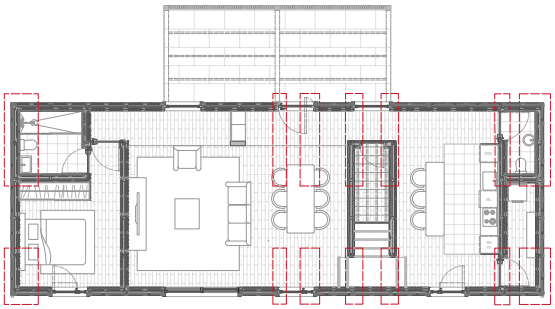
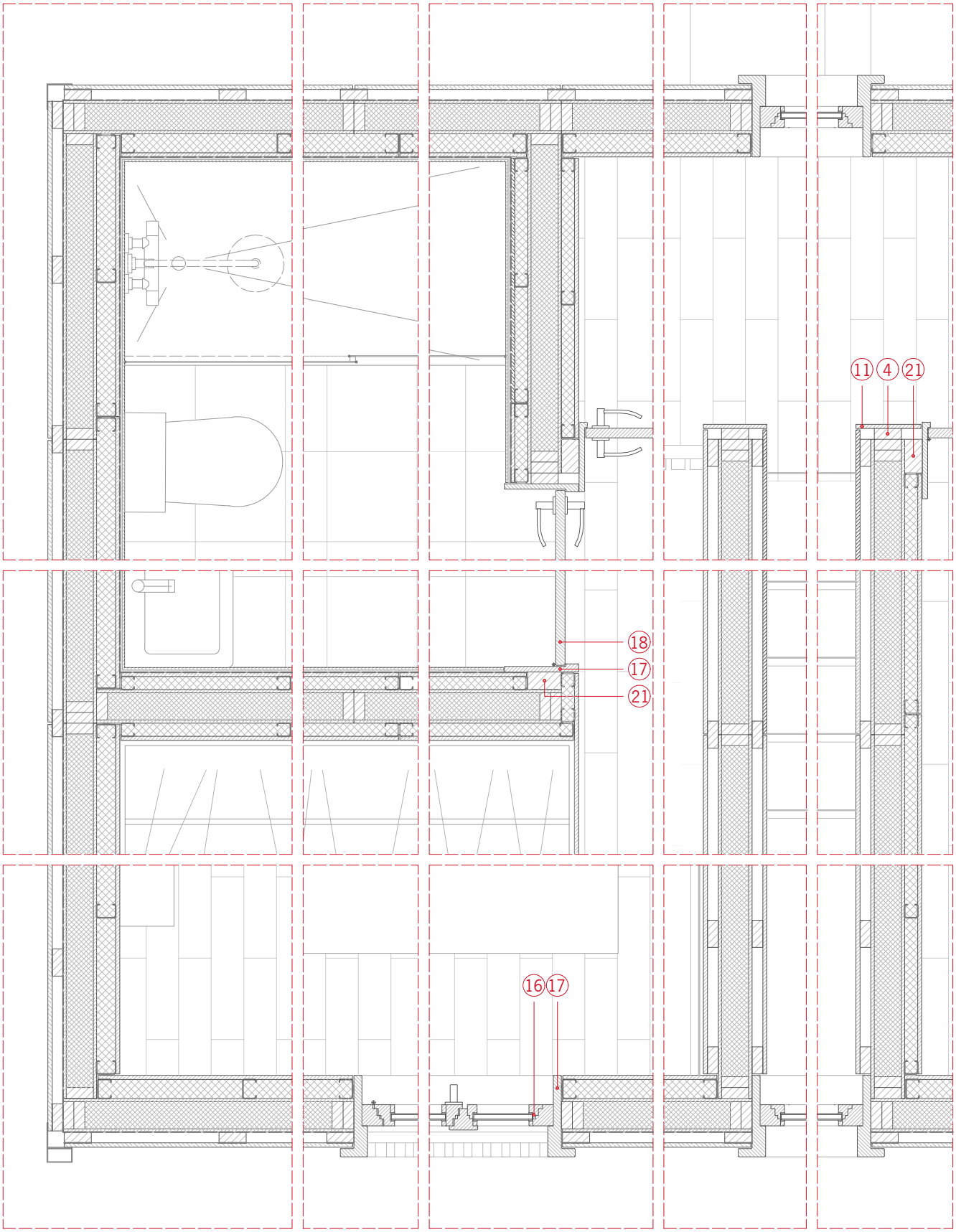


Fig. 106
Pormenorização planta piso térreo

0 0.25 0.5 1m

40x100 mm tratado em autoclave 6. Membrana transpirável 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 14. Cerâmica 15. Cantoneira metálica 16. Caixilharia de madeira de vidro duplo 17. Ombreira de madeira 18. Porta interior de 22.Barrote de madeira 70x100 mm 23. Barrote de madeira 25x50 mm 24. Tubo de queda



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Barrote de madeira 9. Tratamento de junta 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem madeira 19. Porta exterior de madeira com isolamento 20. Barrote de madeira 85x124 mm 21. Barrote de madeira 65x124 mm

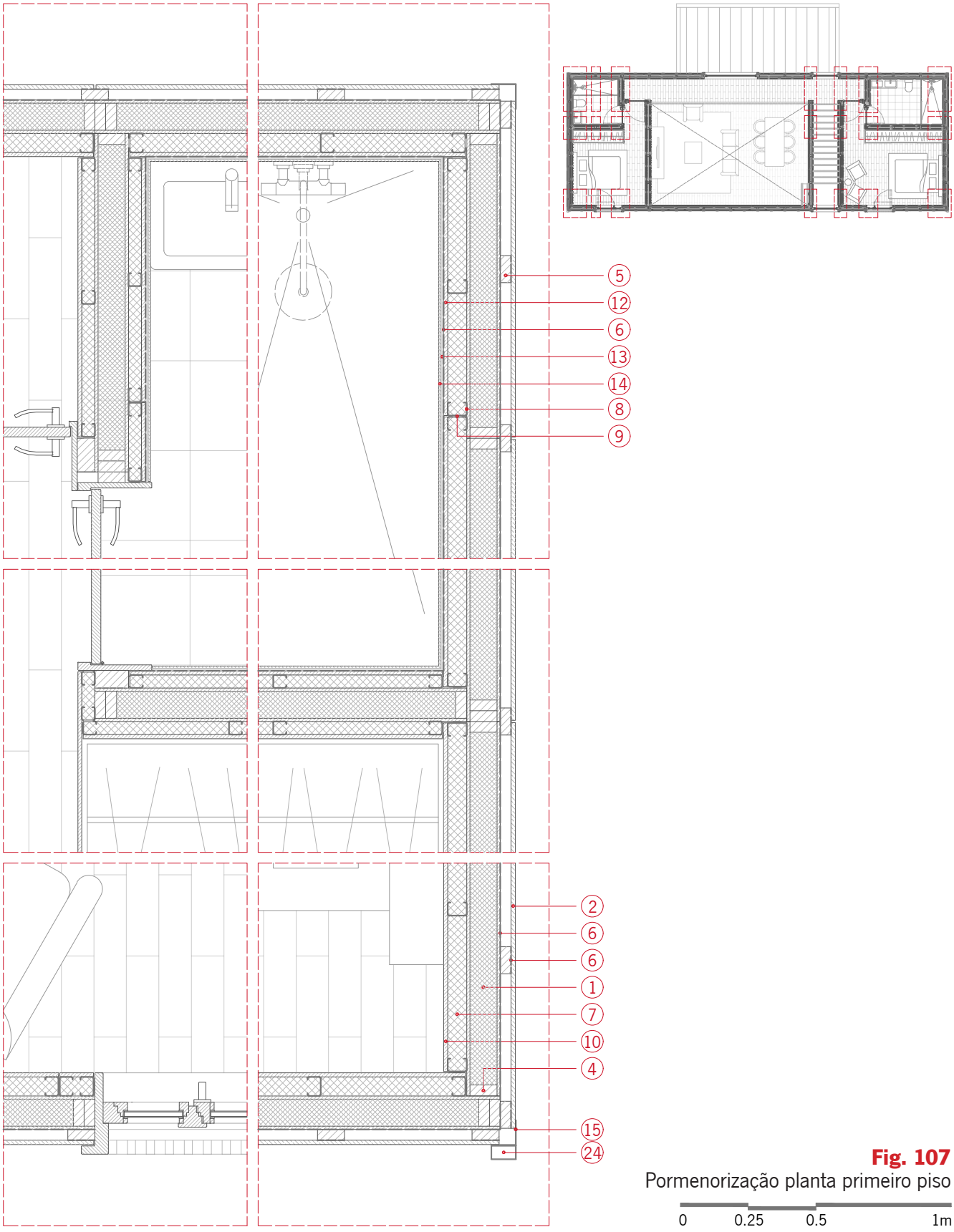
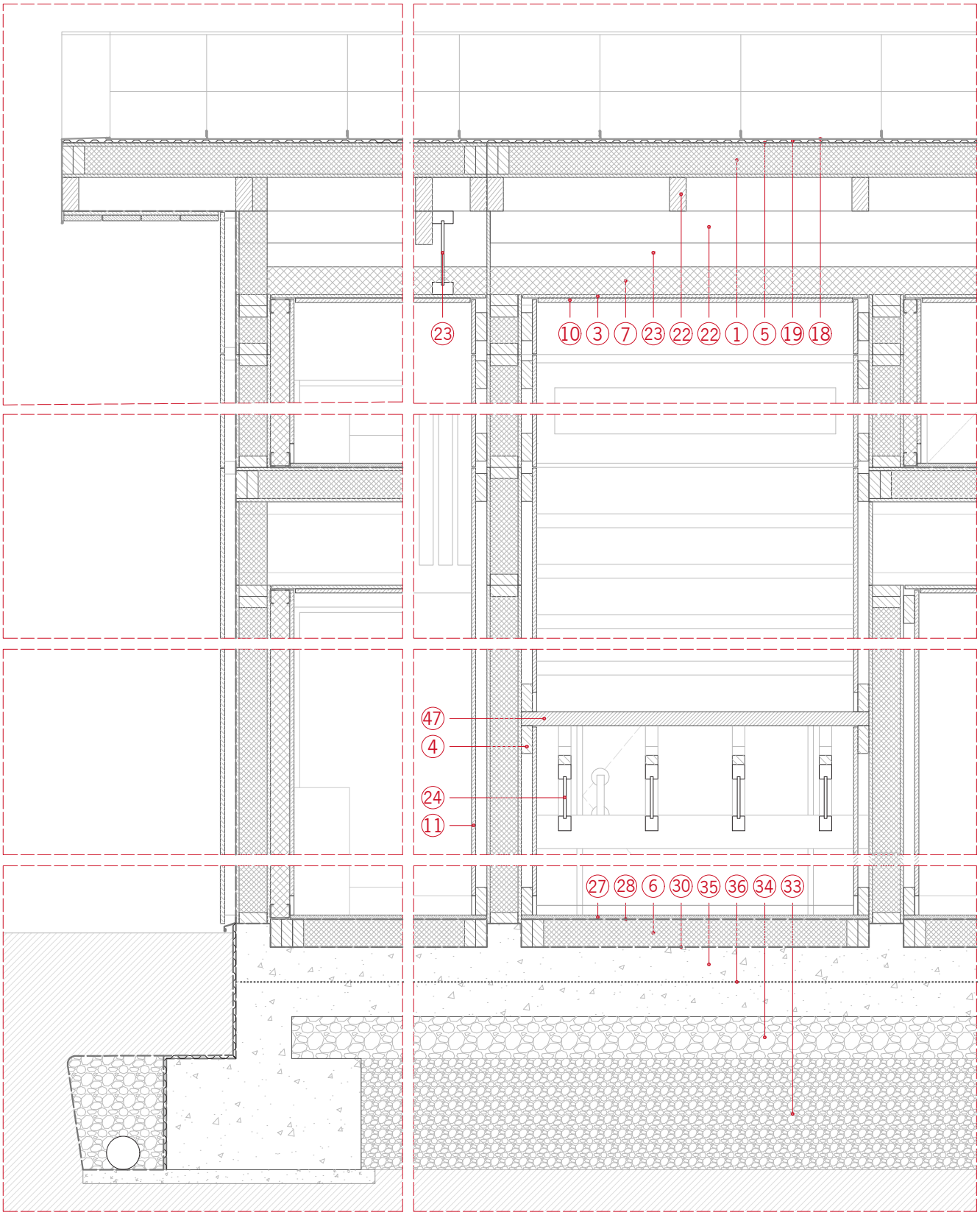


Fig. 107
Pormenorização planta primeiro piso

40x100 mm tratado em autoclave 6. Membrana transpirável 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 14. Cerâmica 15. Cantoneira metálica 16. Caixilharia de madeira de vidro duplo 17. Ombreira de madeira 18. Porta interior de 22.Barrote de madeira 70x100 mm 23. Barrote de madeira 25x50 mm 24. Tubo de queda



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Membrana 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado marítimo 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem 14. Cerâmica 20. Contraplacado marítimo 21. Ripado de madeira 22. Viga maciça 60x120 mm 23. Viga I-Joist 300 mm 24.Viga I-Joist 200 mm 30. Membrana impermeável 31. Betão de limpeza 32. Fundação de betão 33. Brita compactada 34. *Tout-venant* 35.Lintel de betão de vidro duplo 43. Padieira de madeira 44. Soleira de madeira 45. Porta interior de madeira 46. Porta exterior de madeira com de madeira 124x124 mm 51. Barrote de madeira 90x190 mm 52. Membrana acústica 53. Lajeta de pedra bajurdada

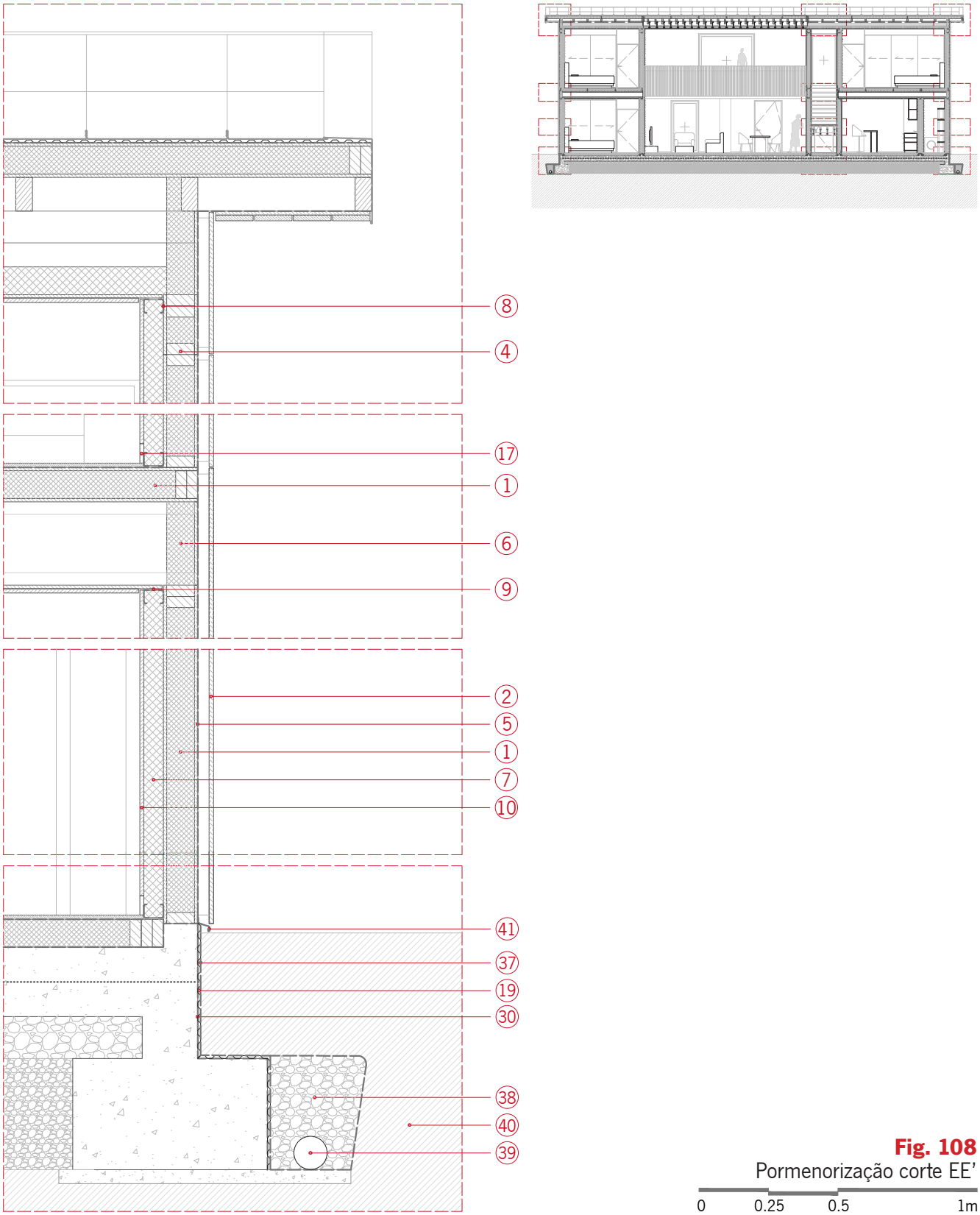
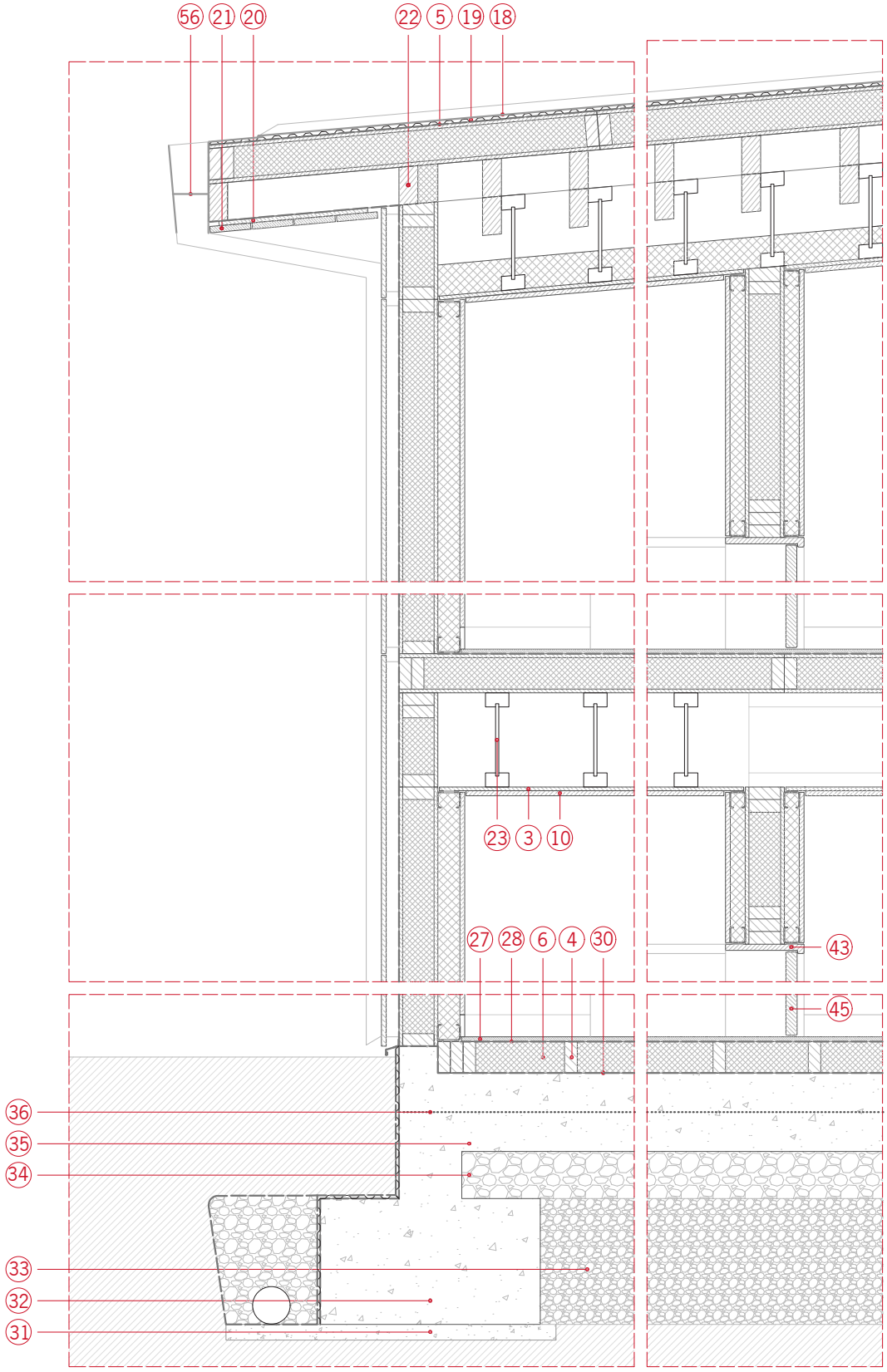
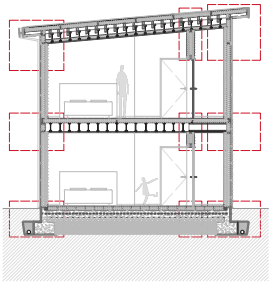


Fig. 108
Pormenorização corte EE'

transpirável 6. Isolamento térmico em XPS 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 9. Tratamento de junta 15. Selante em silicone 16. Cantoneira metálica 17. Rodapé de madeira 18. Chapa zincada c/junta agrafada 19. Tela pitonada 25. Viga maciça 150x300 mm 26. Viga maciça 150x150 mm 27. Soalho 28. Camada de cortiça 29. Base cerâmica 36. Malha-sol 37. Manta geotêxtil 38. Camada drenante 39. Dreno 40. Solo 41. Pingadeira metálica 42. Caixilharia de madeira isolamento 47. Degrau de madeira 48. Guarda corpos de madeira 49. Barrote de madeira 25x50 mm 50. Barrote 54. Argamassa de assentamento 55. Ligação metálica 56. Caleira metálica 57. Perfil de transição



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Membrana 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado marítimo 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem 14. Cerâmica 20. Contraplacado marítimo 21. Ripado de madeira 22. Viga maciça 60x120 mm 23. Viga I-Joist 300 mm 24.Viga I-Joist 200 mm 30. Membrana impermeável 31. Betão de limpeza 32. Fundação de betão 33. Brita compactada 34. *Tout-venant* 35.Lintel de betão de vidro duplo 43. Padieira de madeira 44. Soleira de madeira 45. Porta interior de madeira 46. Porta exterior de madeira com de madeira 124x124 mm 51. Barrote de madeira 90x190 mm 52. Membrana acústica 53. Lajeta de pedra bajurdada



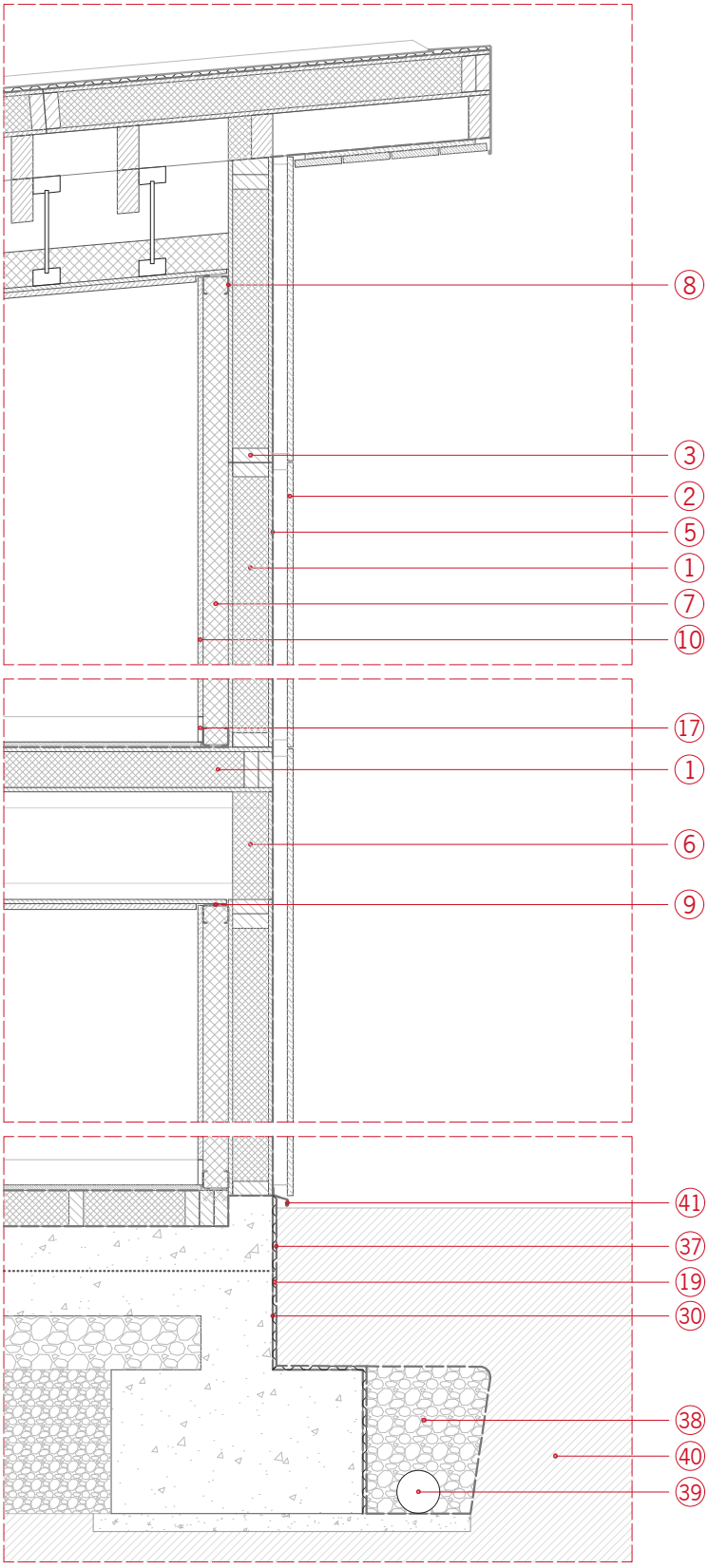
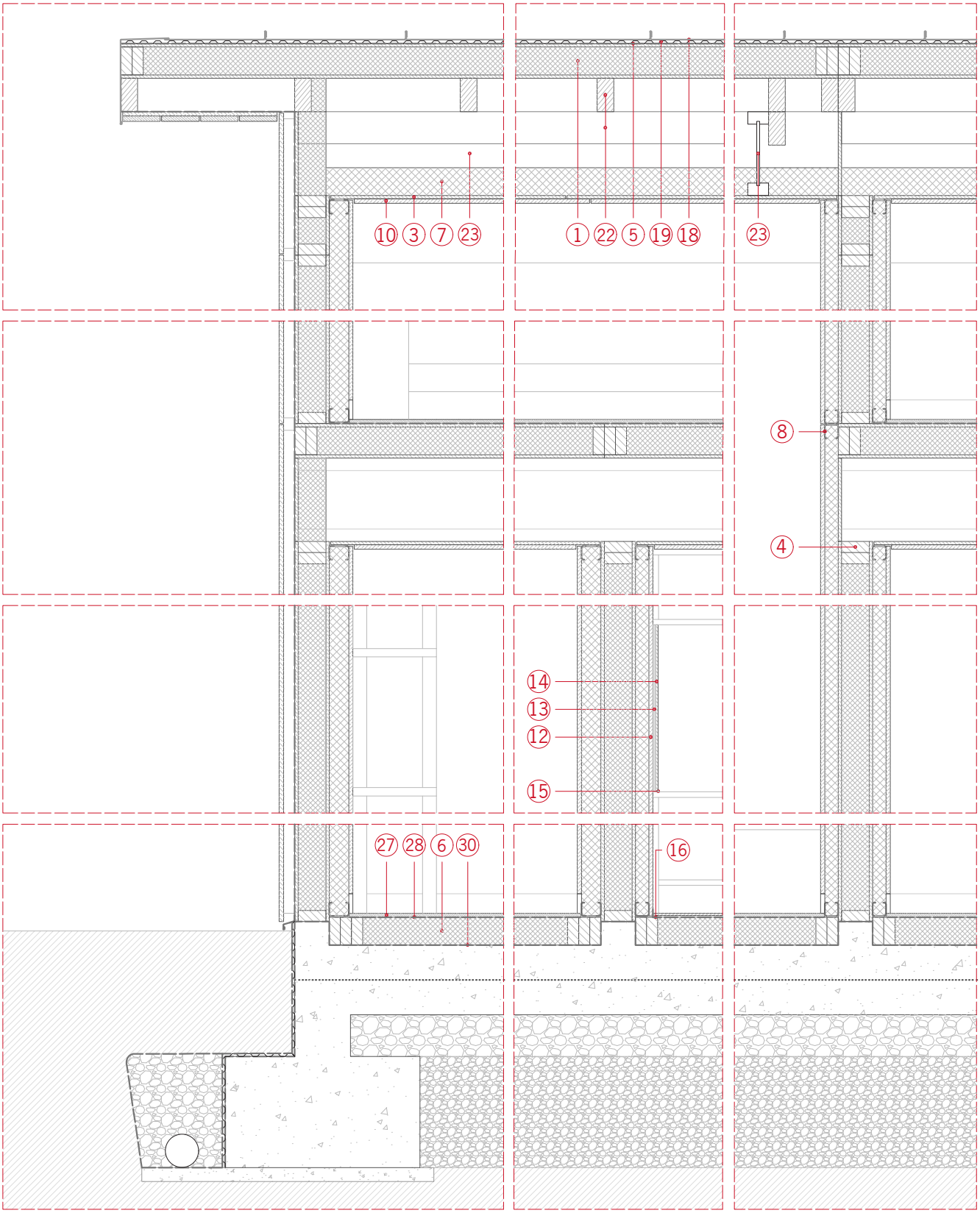


Fig. 109
Pormenorização corte FF'

0 0.25 0.5 1m

transpirável 6. Isolamento térmico em XPS 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 9. Tratamento de junta 15. Selante em silicone 16. Cantoneira metálica 17. Rodapé de madeira 18. Chapa zincada c/junta agrafada 19. Tela pitonada 25. Viga maciça 150x300 mm 26. Viga maciça 150x150 mm 27. Soalho 28. Camada de cortiça 29. Base cerâmica 36. Malha-sol 37. Manta geotêxtil 38. Camada drenante 39. Dreno 40. Solo 41. Pingadeira metálica 42. Caixilharia de madeira isolamento 47. Degrau de madeira 48. Guarda corpos de madeira 49. Barrote de madeira 25x50 mm 50. Barrote 54. Argamassa de assentamento 55. Ligação metálica 56. Caleira metálica 57. Perfil de transição



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Membrana 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado marítimo 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem 14. Cerâmica 20. Contraplacado marítimo 21. Ripado de madeira 22. Viga maciça 60x120 mm 23. Viga I-Joist 300 mm 24.Viga I-Joist 200 mm 30. Membrana impermeável 31. Betão de limpeza 32. Fundação de betão 33. Brita compactada 34. *Tout-venant* 35.Lintel de betão de vidro duplo 43. Padieira de madeira 44. Soleira de madeira 45. Porta interior de madeira 46. Porta exterior de madeira com de madeira 124x124 mm 51. Barrote de madeira 90x190 mm 52. Membrana acústica 53. Lajeta de pedra bajurdada

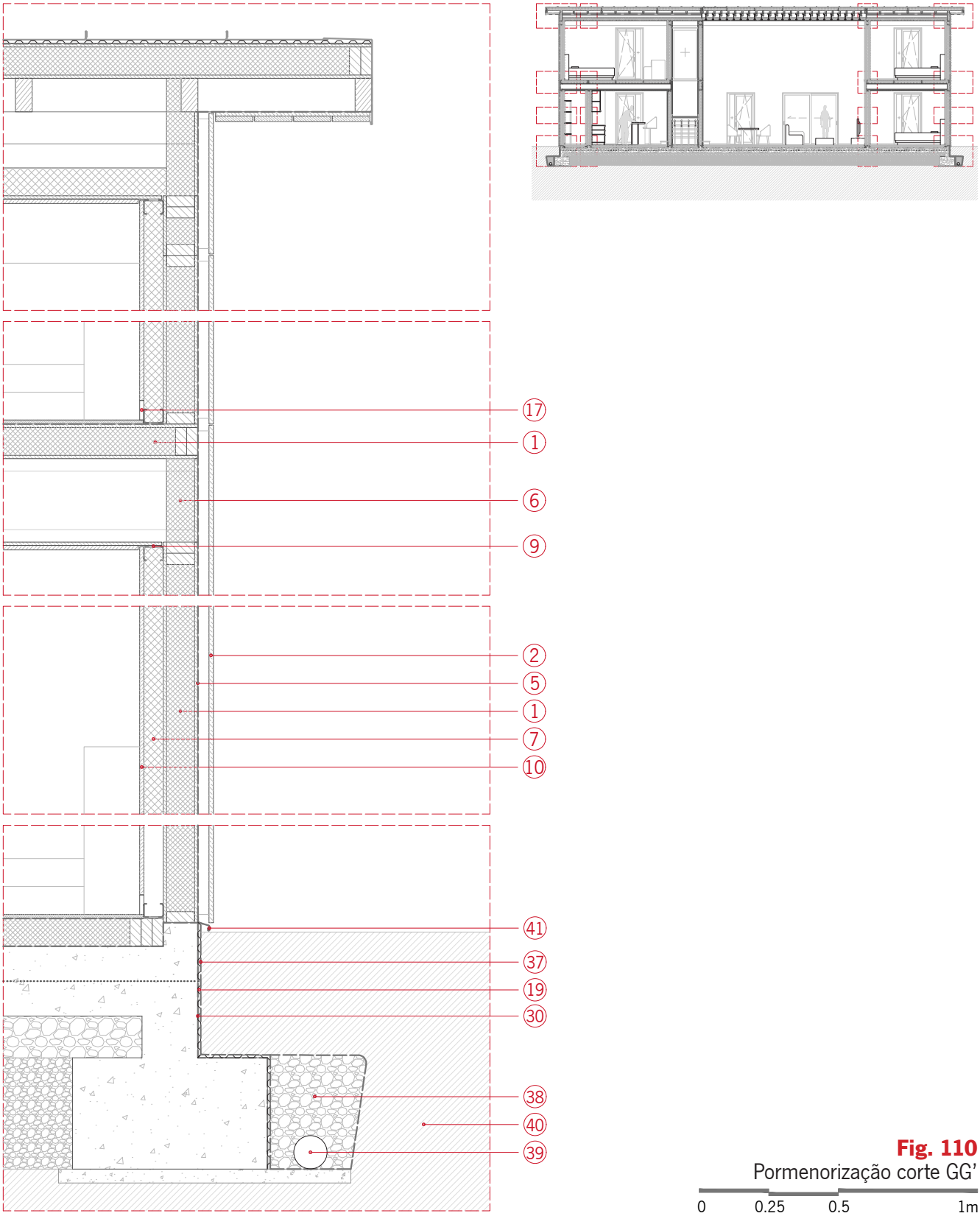
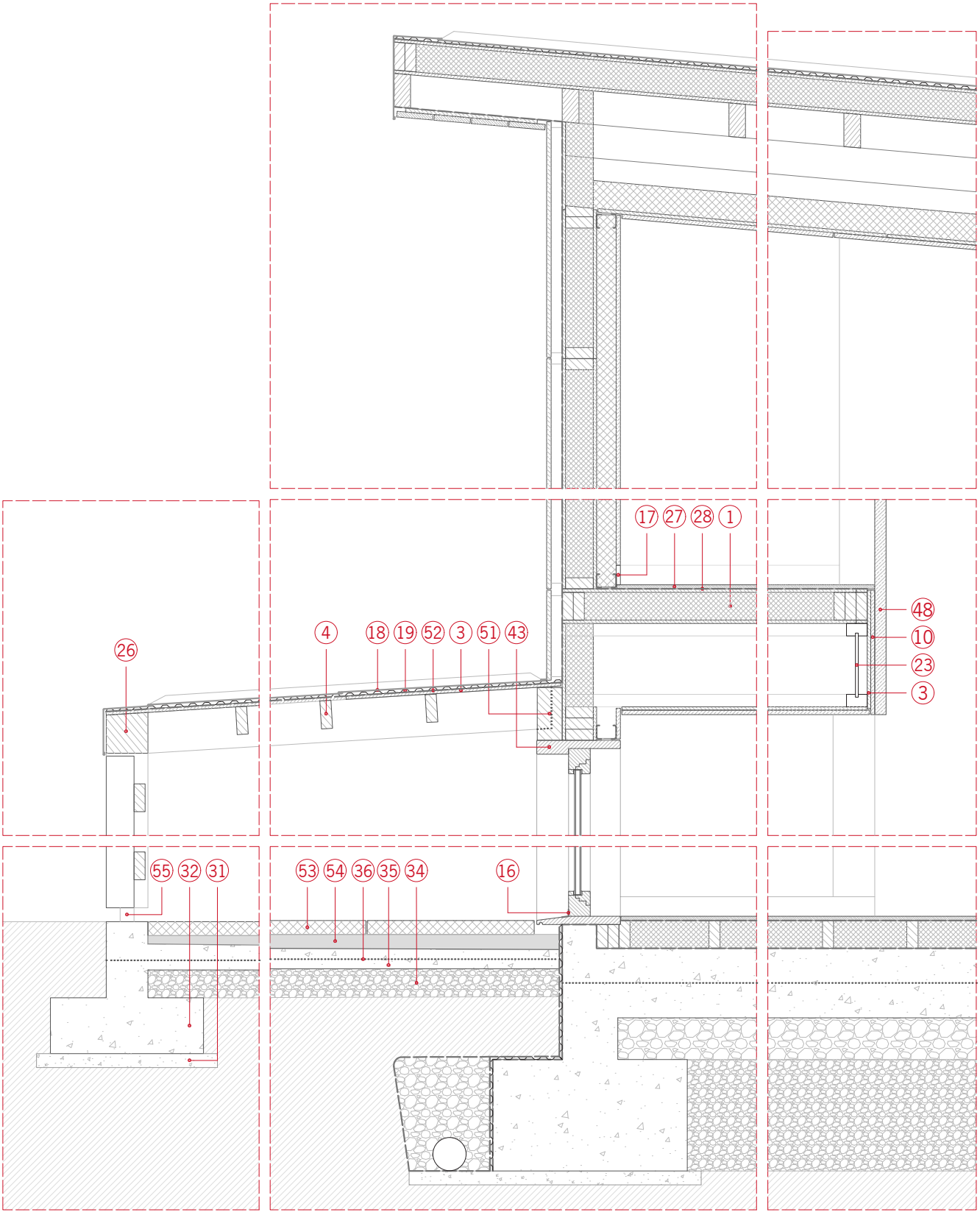


Fig. 110
Pormenorização corte GG'

0 0.25 0.5 1m

transpirável 6. Isolamento térmico em XPS 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 9. Tratamento de junta 15. Selante em silicone 16. Cantoneira metálica 17. Rodapé de madeira 18. Chapa zincada c/junta agrafada 19. Tela pitonada 25. Viga maciça 150x300 mm 26. Viga maciça 150x150 mm 27. Soalho 28. Camada de cortiça 29. Base cerâmica 36. Malha-sol 37. Manta geotêxtil 38. Camada drenante 39. Dreno 40. Solo 41. Pingadeira metálica 42. Caixilharia de madeira isolamento 47. Degrau de madeira 48. Guarda corpos de madeira 49. Barrote de madeira 25x50 mm 50. Barrote 54. Argamassa de assentamento 55. Ligação metálica 56. Caleira metálica 57. Perfil de transição



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Membrana 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado marítimo 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem 14. Cerâmica 20. Contraplacado marítimo 21. Ripado de madeira 22. Viga maciça 60x120 mm 23. Viga I-Joist 300 mm 24.Viga I-Joist 200 mm 30. Membrana impermeável 31. Betão de limpeza 32. Fundação de betão 33. Brita compactada 34. *Tout-venant* 35.Lintel de betão de vidro duplo 43. Padieira de madeira 44. Soleira de madeira 45. Porta interior de madeira 46. Porta exterior de madeira com de madeira 124x124 mm 51. Barrote de madeira 90x190 mm 52. Membrana acústica 53. Lajeta de pedra bajurdada

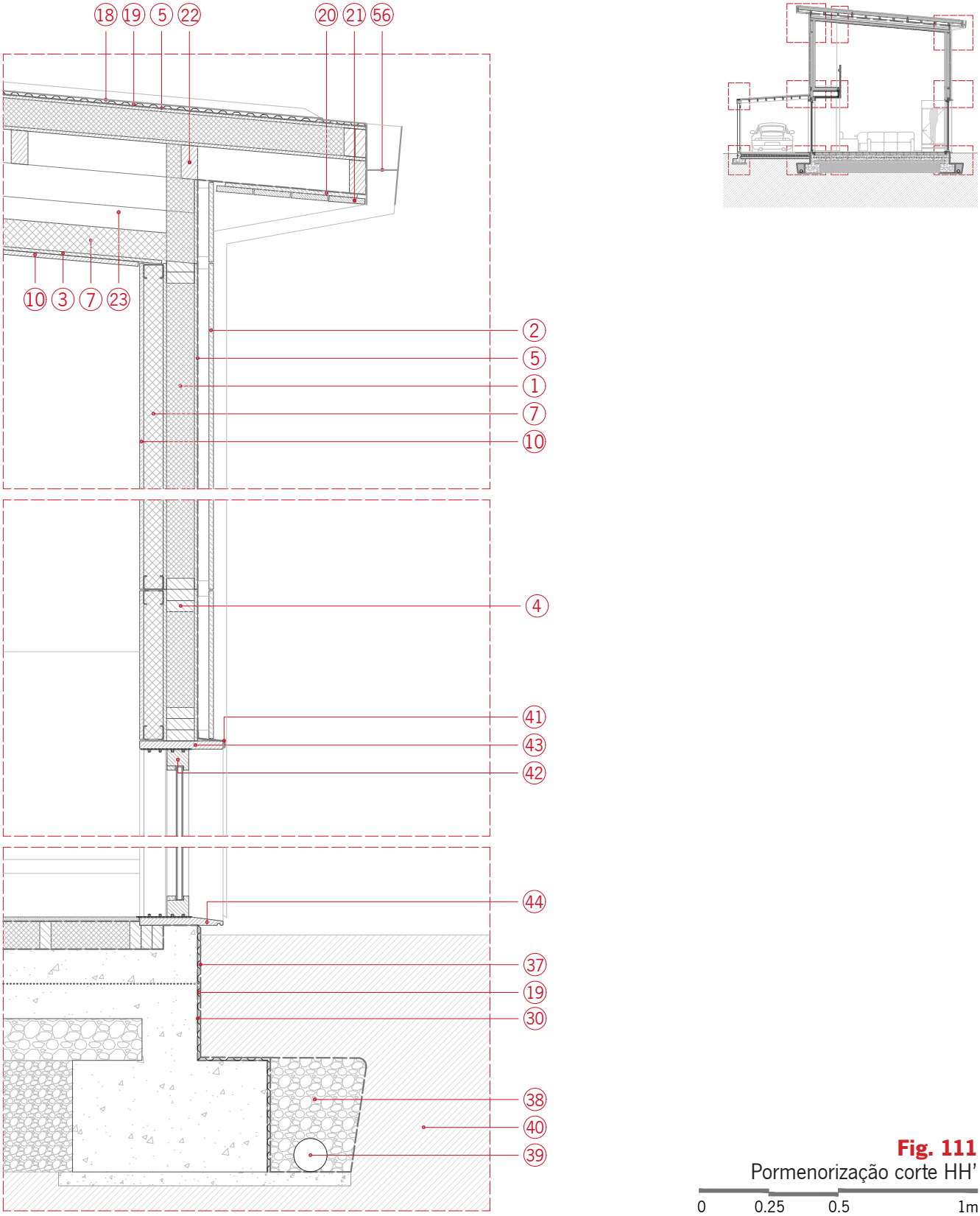
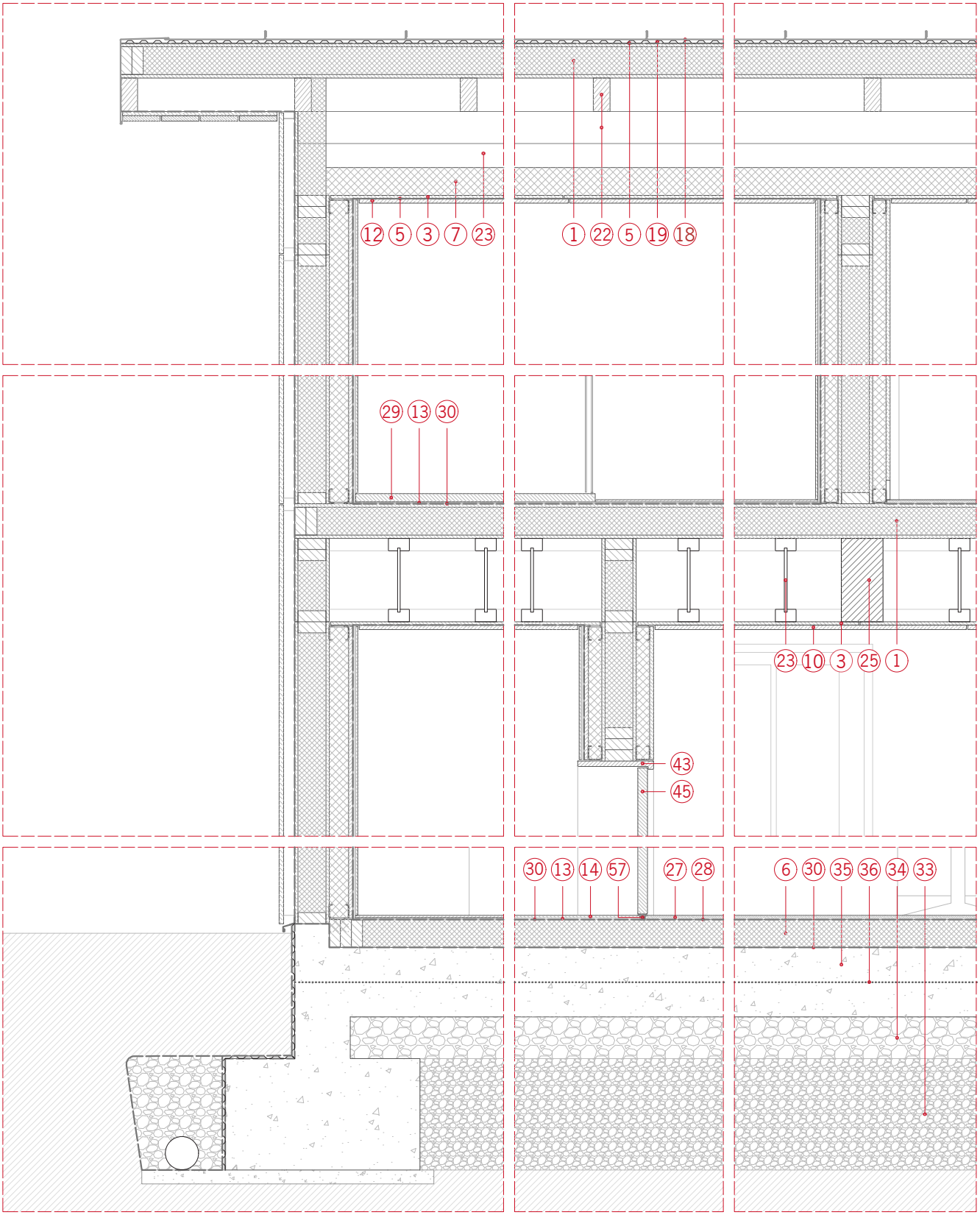


Fig. 111
Pormenorização corte HH'

0 0.25 0.5 1m

transpirável 6. Isolamento térmico em XPS 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 9. Tratamento de junta 15. Selante em silicone 16. Cantoneira metálica 17. Rodapé de madeira 18. Chapa zincada c/junta agrafada 19. Tela pitonada 25. Viga maciça 150x300 mm 26. Viga maciça 150x150 mm 27. Soalho 28. Camada de cortiça 29. Base cerâmica 36. Malha-sol 37. Manta geotêxtil 38. Camada drenante 39. Dreno 40. Solo 41. Pingadeira metálica 42. Caixilharia de madeira isolamento 47. Degrau de madeira 48. Guarda corpos de madeira 49. Barrote de madeira 25x50 mm 50. Barrote 54. Argamassa de assentamento 55. Ligação metálica 56. Caleira metálica 57. Perfil de transição



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Membrana 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado marítimo 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem 14. Cerâmica 20. Contraplacado marítimo 21. Ripado de madeira 22. Viga maciça 60x120 mm 23. Viga I-Joist 300 mm 24.Viga I-Joist 200 mm 30. Membrana impermeável 31. Betão de limpeza 32. Fundação de betão 33. Brita compactada 34. *Tout-venant* 35.Lintel de betão de vidro duplo 43. Padieira de madeira 44. Soleira de madeira 45. Porta interior de madeira 46. Porta exterior de madeira com de madeira 124x124 mm 51. Barrote de madeira 90x190 mm 52. Membrana acústica 53. Lajeta de pedra bajurdada

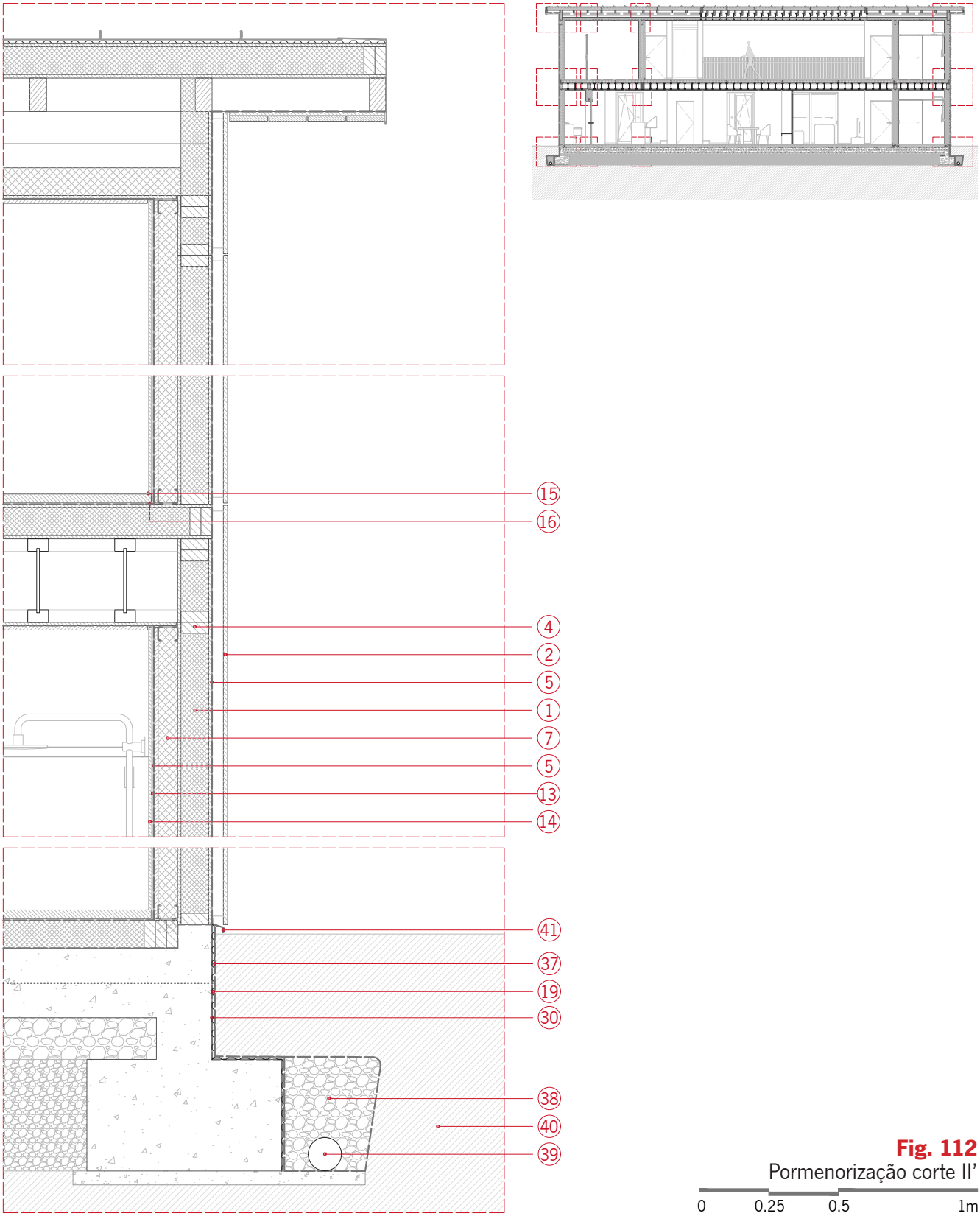
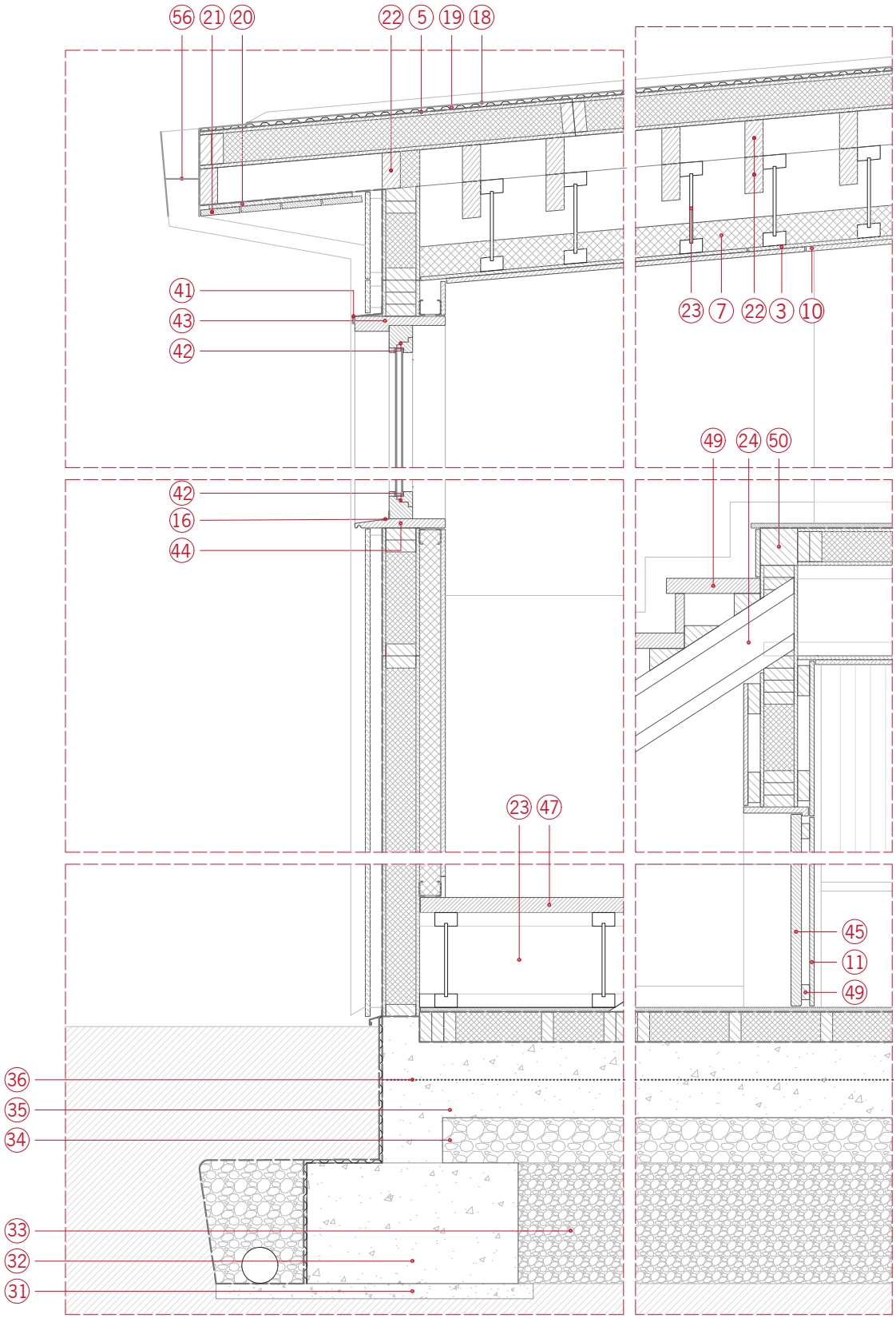


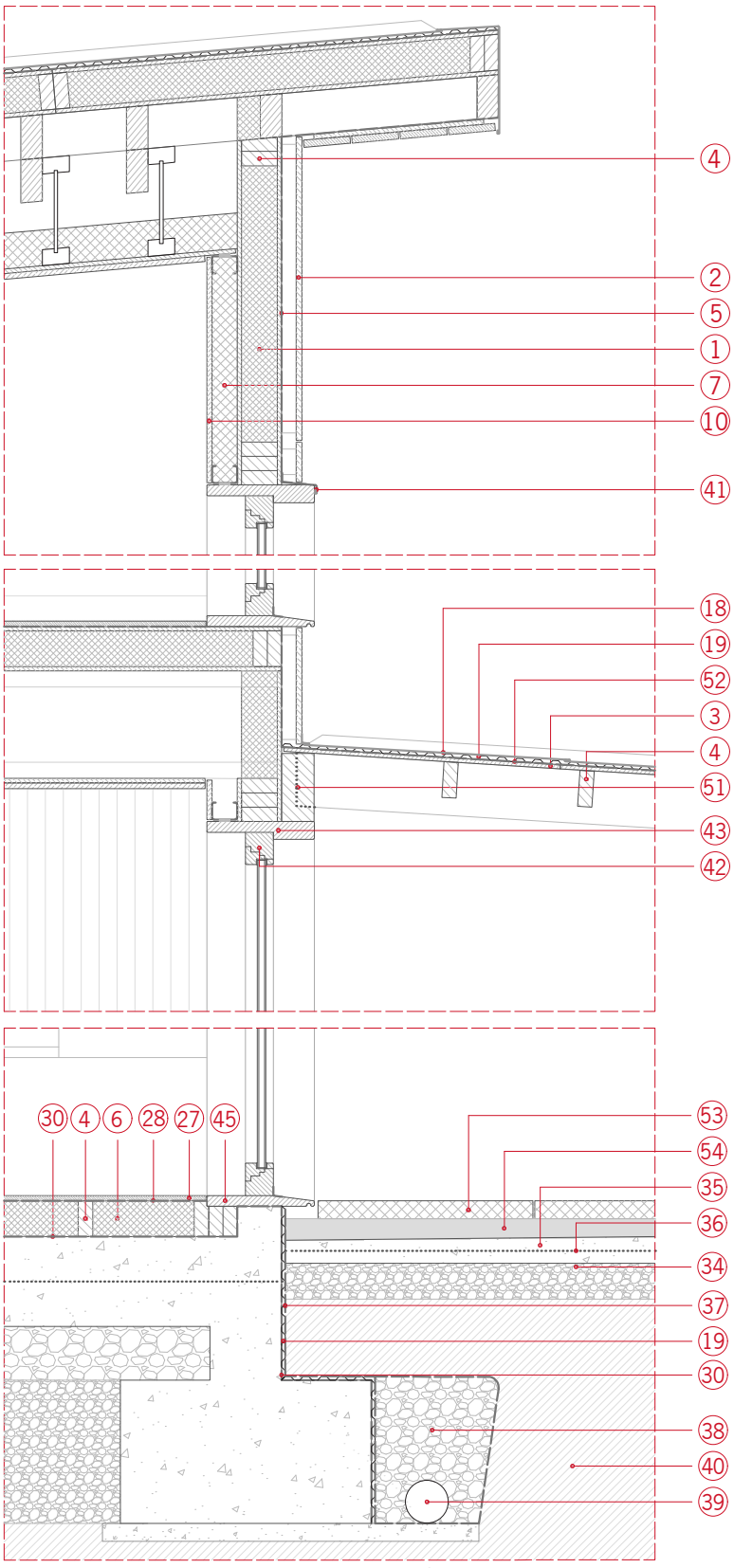
Fig. 112
Pormenorização corte II'

0 0.25 0.5 1m

transpirável 6. Isolamento térmico em XPS 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 9. Tratamento de junta 15. Selante em silicone 16. Cantoneira metálica 17. Rodapé de madeira 18. Chapa zincada c/junta agrafada 19. Tela pitonada 25. Viga maciça 150x300 mm 26. Viga maciça 150x150 mm 27. Soalho 28. Camada de cortiça 29. Base cerâmica 36. Malha-sol 37. Manta geotêxtil 38. Camada drenante 39. Dreno 40. Solo 41. Pingadeira metálica 42. Caixilharia de madeira isolamento 47. Degrau de madeira 48. Guarda corpos de madeira 49. Barrote de madeira 25x50 mm 50. Barrote 54. Argamassa de assentamento 55. Ligação metálica 56. Caleira metálica 57. Perfil de transição



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Membrana 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado marítimo 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem 14. Cerâmica 20. Contraplacado marítimo 21. Ripado de madeira 22. Viga maciça 60x120 mm 23. Viga I-Joist 300 mm 24.Viga I-Joist 200 mm 30. Membrana impermeável 31. Betão de limpeza 32. Fundação de betão 33. Brita compactada 34. *Tout-venant* 35.Lintel de betão de vidro duplo 43. Padieira de madeira 44. Soleira de madeira 45. Porta interior de madeira 46. Porta exterior de madeira com de madeira 124x124 mm 51. Barrote de madeira 90x190 mm 52. Membrana acústica 53. Lajeta de pedra bajurdada



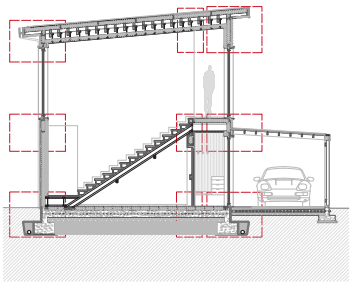
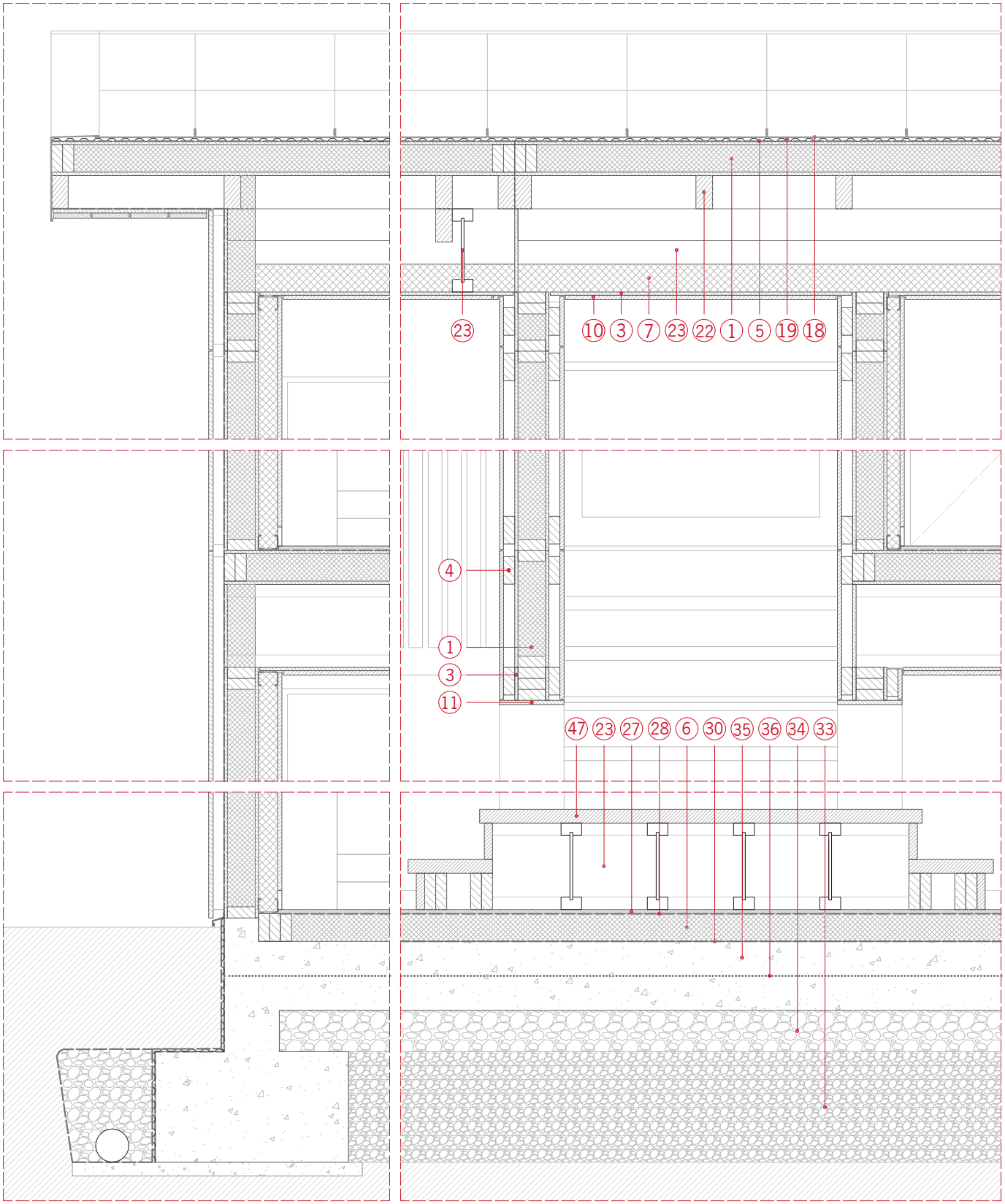


Fig. 113
Pormenorização corte JJ'

0 0.25 0.5 1m

transpirável 6. Isolamento térmico em XPS 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 9. Tratamento de junta 15. Selante em silicone 16. Cantoneira metálica 17. Rodapé de madeira 18. Chapa zincada c/junta agrafada 19. Tela pitonada 25. Viga maciça 150x300 mm 26. Viga maciça 150x150 mm 27. Soalho 28. Camada de cortiça 29. Base cerâmica 36. Malha-sol 37. Manta geotêxtil 38. Camada drenante 39. Dreno 40. Solo 41. Pingadeira metálica 42. Caixilharia de madeira isolamento 47. Degrau de madeira 48. Guarda corpos de madeira 49. Barrote de madeira 25x50 mm 50. Barrote 54. Argamassa de assentamento 55. Ligação metálica 56. Caleira metálica 57. Perfil de transição



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Membrana 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado marítimo 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem 14. Cerâmica 20. Contraplacado marítimo 21. Ripado de madeira 22. Viga maciça 60x120 mm 23. Viga I-Joist 300 mm 24.Viga I-Joist 200 mm 30. Membrana impermeável 31. Betão de limpeza 32. Fundação de betão 33. Brita compactada 34. *Tout-venant* 35.Lintel de betão de vidro duplo 43. Padieira de madeira 44. Soleira de madeira 45. Porta interior de madeira 46. Porta exterior de madeira com de madeira 124x124 mm 51. Barrote de madeira 90x190 mm 52. Membrana acústica 53. Lajeta de pedra bajurdada

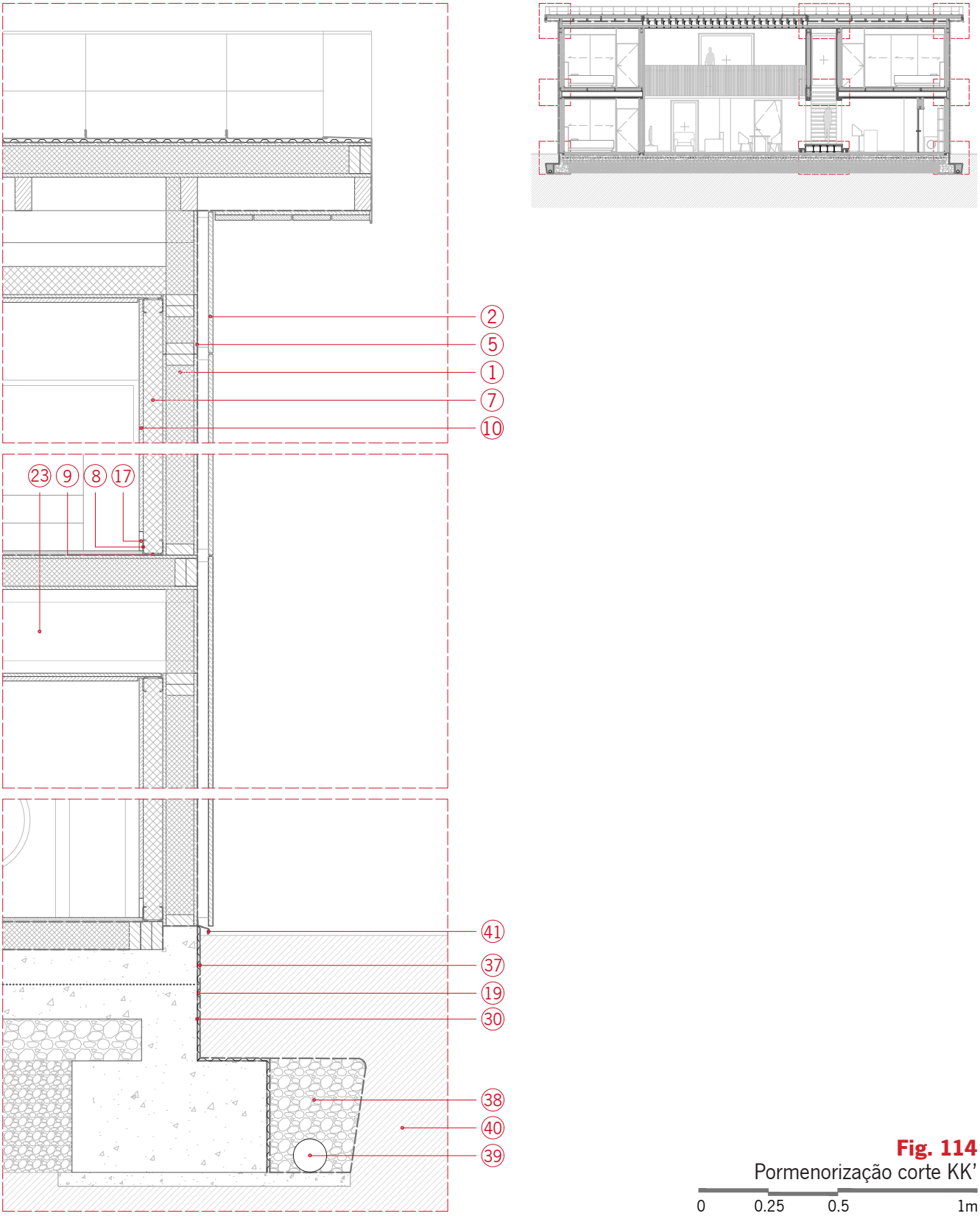
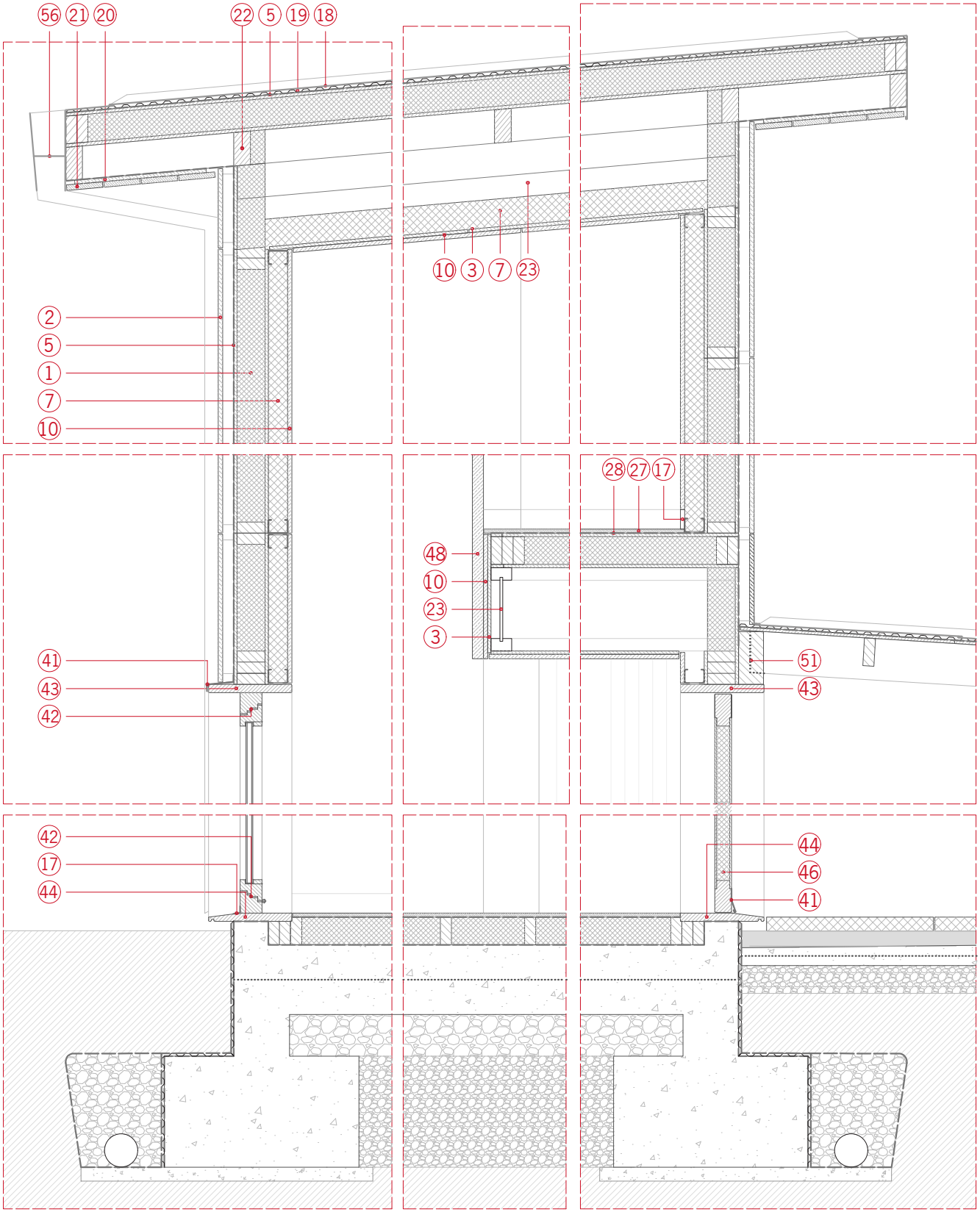
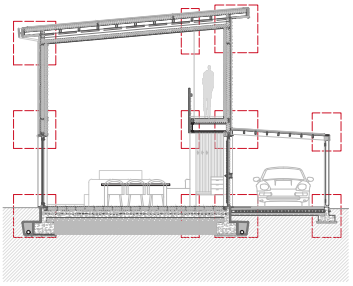


Fig. 114
Pormenorização corte KK'

transpirável 6. Isolamento térmico em XPS 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 9. Tratamento de junta 15. Selante em silicone 16. Cantoneira metálica 17. Rodapé de madeira 18. Chapa zincada c/junta agrafada 19. Tela pitonada 25. Viga maciça 150x300 mm 26. Viga maciça 150x150 mm 27. Soalho 28. Camada de cortiça 29. Base cerâmica 36. Malha-sol 37. Manta geotêxtil 38. Camada drenante 39. Dreno 40. Solo 41. Pingadeira metálica 42. Caixilharia de madeira isolamento 47. Degrau de madeira 48. Guarda corpos de madeira 49. Barrote de madeira 25x50 mm 50. Barrote 54. Argamassa de assentamento 55. Ligação metálica 56. Caleira metálica 57. Perfil de transição



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Membrana 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado marítimo 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem 14. Cerâmica 20. Contraplacado marítimo 21. Ripado de madeira 22. Viga maciça 60x120 mm 23. Viga I-Joist 300 mm 24.Viga I-Joist 200 mm 30. Membrana impermeável 31. Betão de limpeza 32. Fundação de betão 33. Brita compactada 34. *Tout-venant* 35.Lintel de betão de vidro duplo 43. Padieira de madeira 44. Soleira de madeira 45. Porta interior de madeira 46. Porta exterior de madeira com de madeira 124x124 mm 51. Barrote de madeira 90x190 mm 52. Membrana acústica 53. Lajeta de pedra bajurdada



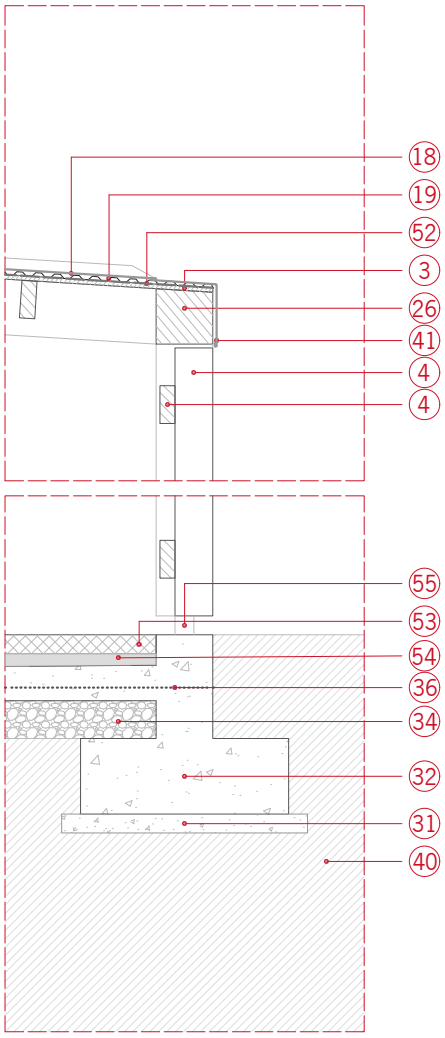
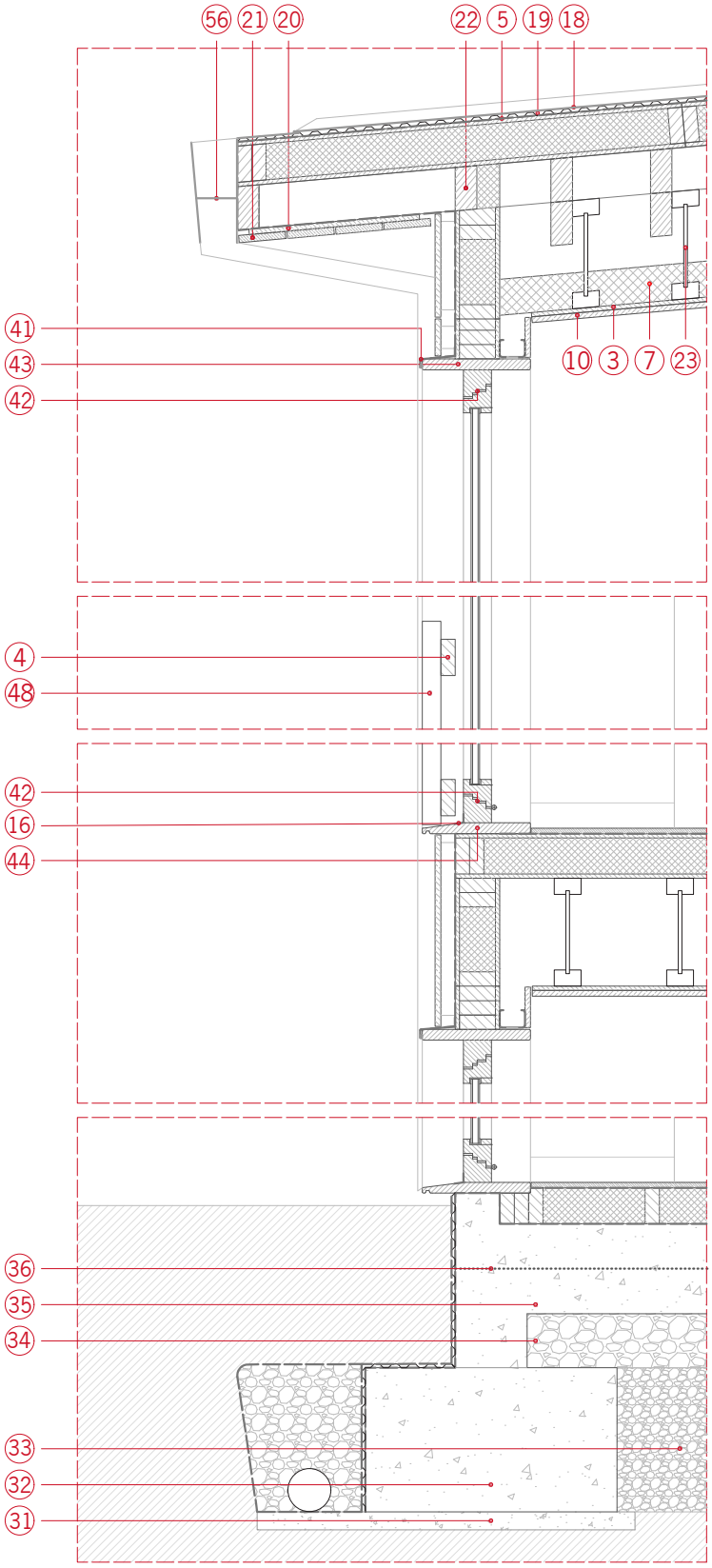


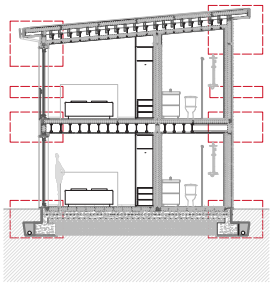
Fig. 115
Pormenorização corte LL'

0 0.25 0.5 1m

transpirável 6. Isolamento térmico em XPS 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 9. Tratamento de junta 15. Selante em silicone 16. Cantoneira metálica 17. Rodapé de madeira 18. Chapa zincada c/junta agrafada 19. Tela pitonada 25. Viga maciça 150x300 mm 26. Viga maciça 150x150 mm 27. Soalho 28. Camada de cortiça 29. Base cerâmica 36. Malha-sol 37. Manta geotêxtil 38. Camada drenante 39. Dreno 40. Solo 41. Pingadeira metálica 42. Caixilharia de madeira isolamento 47. Degrau de madeira 48. Guarda corpos de madeira 49. Barrote de madeira 25x50 mm 50. Barrote 54. Argamassa de assentamento 55. Ligação metálica 56. Caleira metálica 57. Perfil de transição



1. Painel SIP 2. Painel compósito de madeira e cimento 3. Painel OSB 4. Barrote de madeira 40x100 mm 5. Membrana 10. Gesso cartonado 11. Contraplacado marítimo 12. Gesso cartonado hidrófugo 13. Argamassa de colagem 14. Cerâmica 20. Contraplacado marítimo 21. Ripado de madeira 22. Viga maciça 60x120 mm 23. Viga I-Joist 300 mm 24.Viga I-Joist 200 mm 30. Membrana impermeável 31. Betão de limpeza 32. Fundação de betão 33. Brita compactada 34. *Tout-venant* 35.Lintel de betão de vidro duplo 43. Padieira de madeira 44. Soleira de madeira 45. Porta interior de madeira 46. Porta exterior de madeira com de madeira 124x124 mm 51. Barrote de madeira 90x190 mm 52. Membrana acústica 53. Lajeta de pedra bajurdada



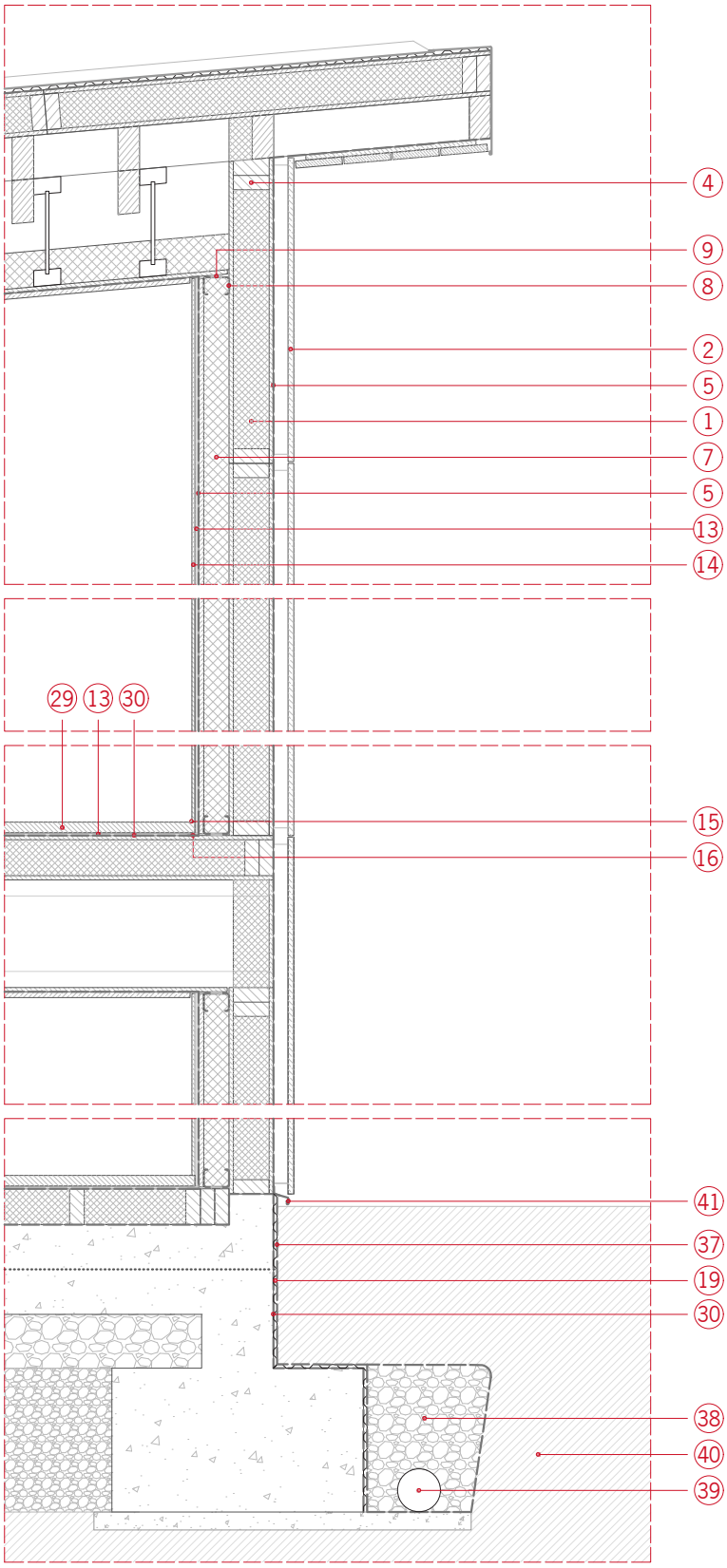
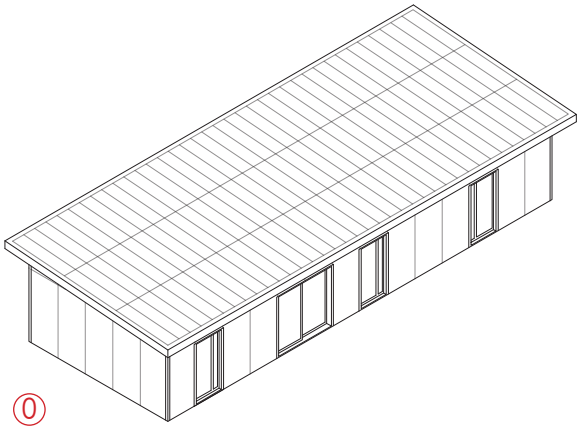


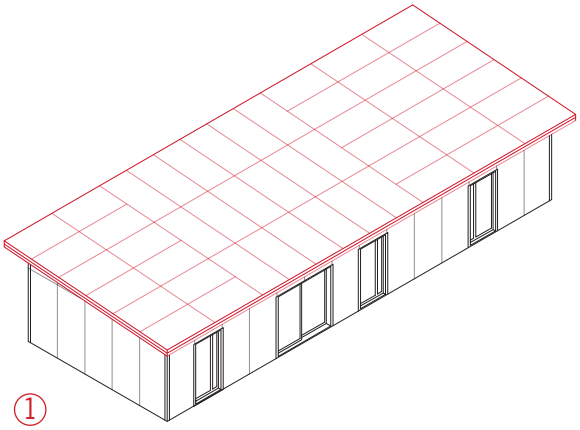
Fig. 116
Pormenorização corte NN'

0 0.25 0.5 1m

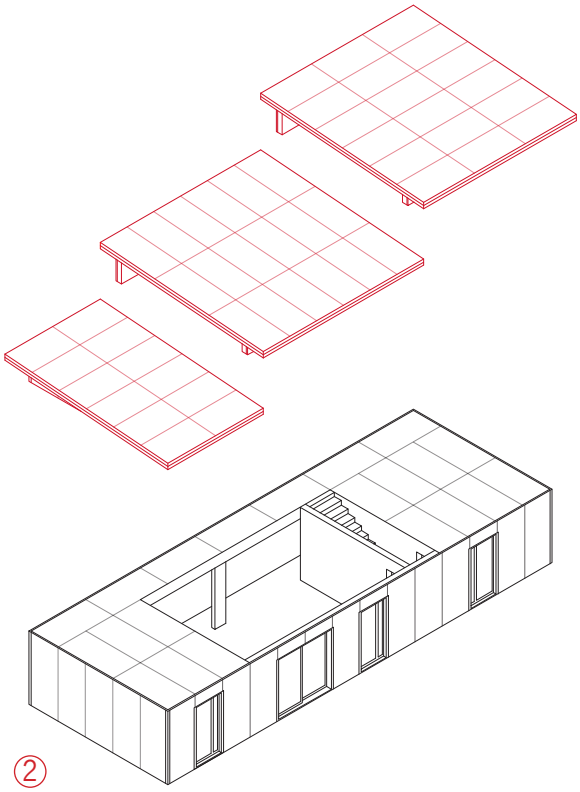
transpirável 6. Isolamento térmico em XPS 7. Isolamento acústico em lã de rocha 8. Montante metálico 9. Tratamento de junta 15. Selante em silicone 16. Cantoneira metálica 17. Rodapé de madeira 18. Chapa zincada c/junta agrafada 19. Tela pitonada 25. Viga maciça 150x300 mm 26. Viga maciça 150x150 mm 27. Soalho 28. Camada de cortiça 29. Base cerâmica 36. Malha-sol 37. Manta geotêxtil 38. Camada drenante 39. Dreno 40. Solo 41. Pingadeira metálica 42. Caixilharia de madeira isolamento 47. Degrau de madeira 48. Guarda corpos de madeira 49. Barrote de madeira 25x50 mm 50. Barrote 54. Argamassa de assentamento 55. Ligação metálica 56. Caleira metálica 57. Perfil de transição



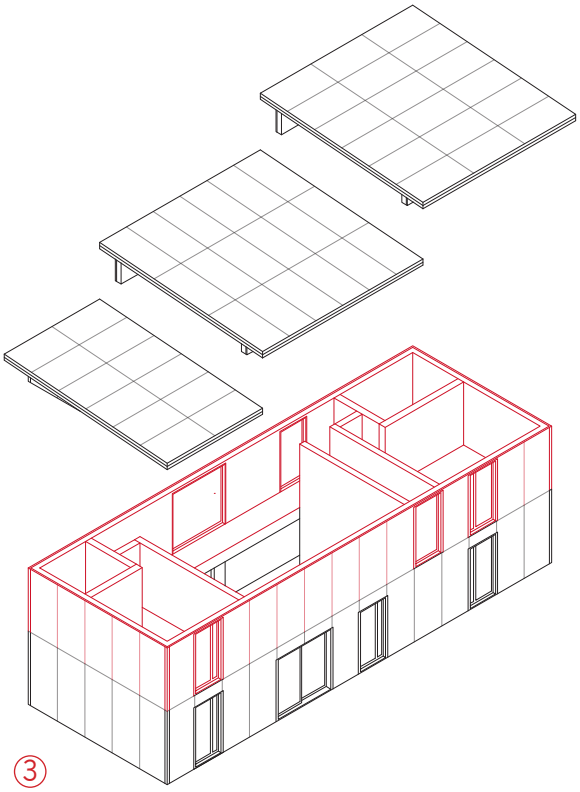
⓪



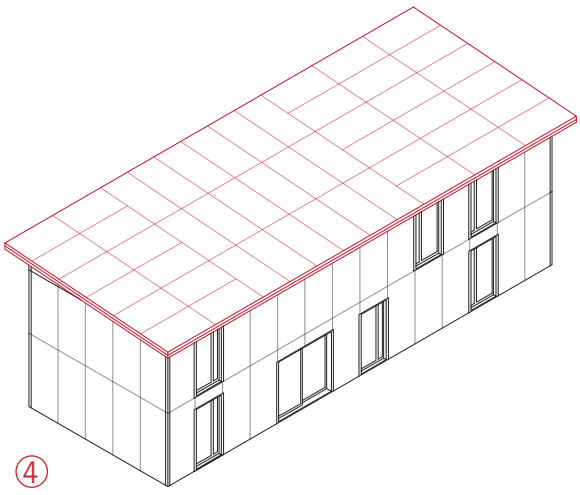
①



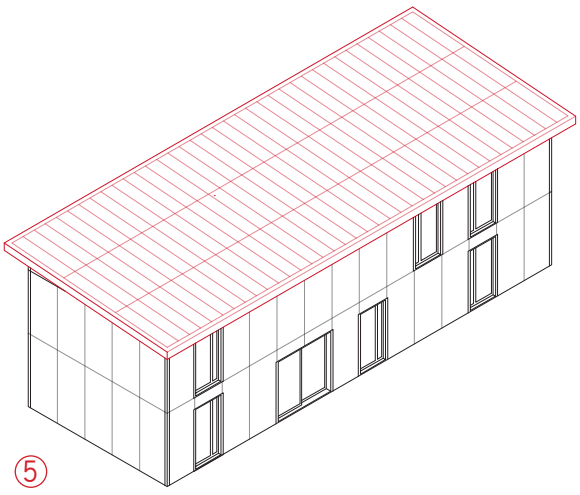
②



③



④



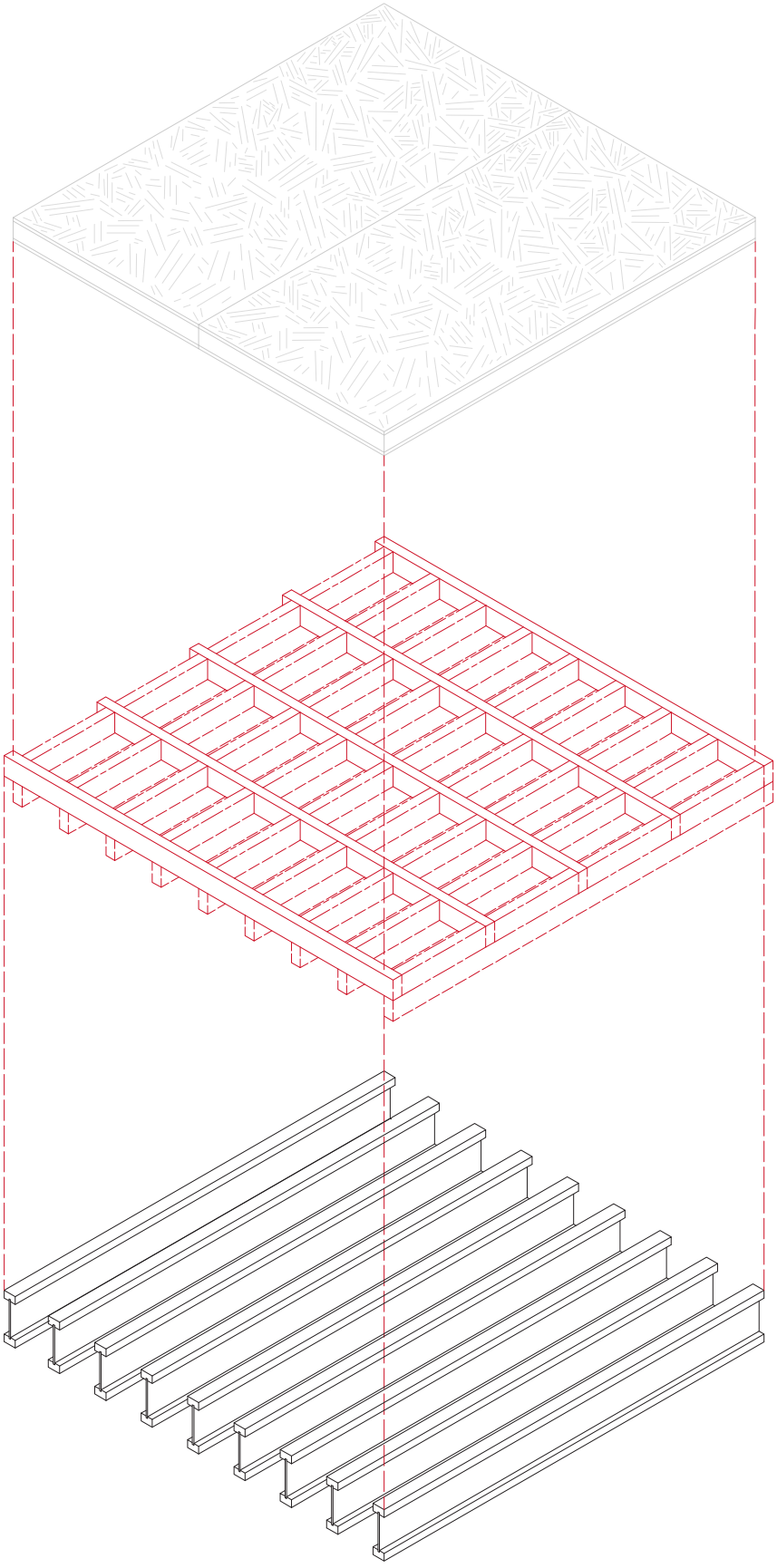
⑤

Um dos pontos mais críticos do processo de ampliação vertical do projeto prende-se com a solução de cobertura adotada. Sendo a cobertura concebida como um elemento de grandes dimensões, a sua elevação e remoção enquanto peça única revelar-se-ia pouco viável a nível logístico. Nesse sentido, optou-se pela divisão da cobertura em três módulos distintos, correspondentes à organização e compartimentação do futuro piso superior.

Apesar da possibilidade de reutilização da estrutura da cobertura existente, a intervenção exige necessariamente a substituição do revestimento exterior, de forma a assegurar as condições adequadas de estanquidade e proteção contra a infiltração de águas pluviais após a ampliação da habitação.

Assim, o processo construtivo previsto para a transição entre as duas fases desenvolve-se segundo uma sequência lógica de operações (Fig. 117): (1) numa primeira etapa procede-se à remoção do revestimento da cobertura existente; (2) realiza-se a desmontagem dos módulos da cobertura; (3) a montagem das paredes correspondentes ao acrescento vertical da habitação; (4) os módulos da cobertura são reaplicados sobre a nova volumetria; (5) por fim, é executado um novo revestimento de cobertura.

Fig. 117
Fases do processo de aumento vertical

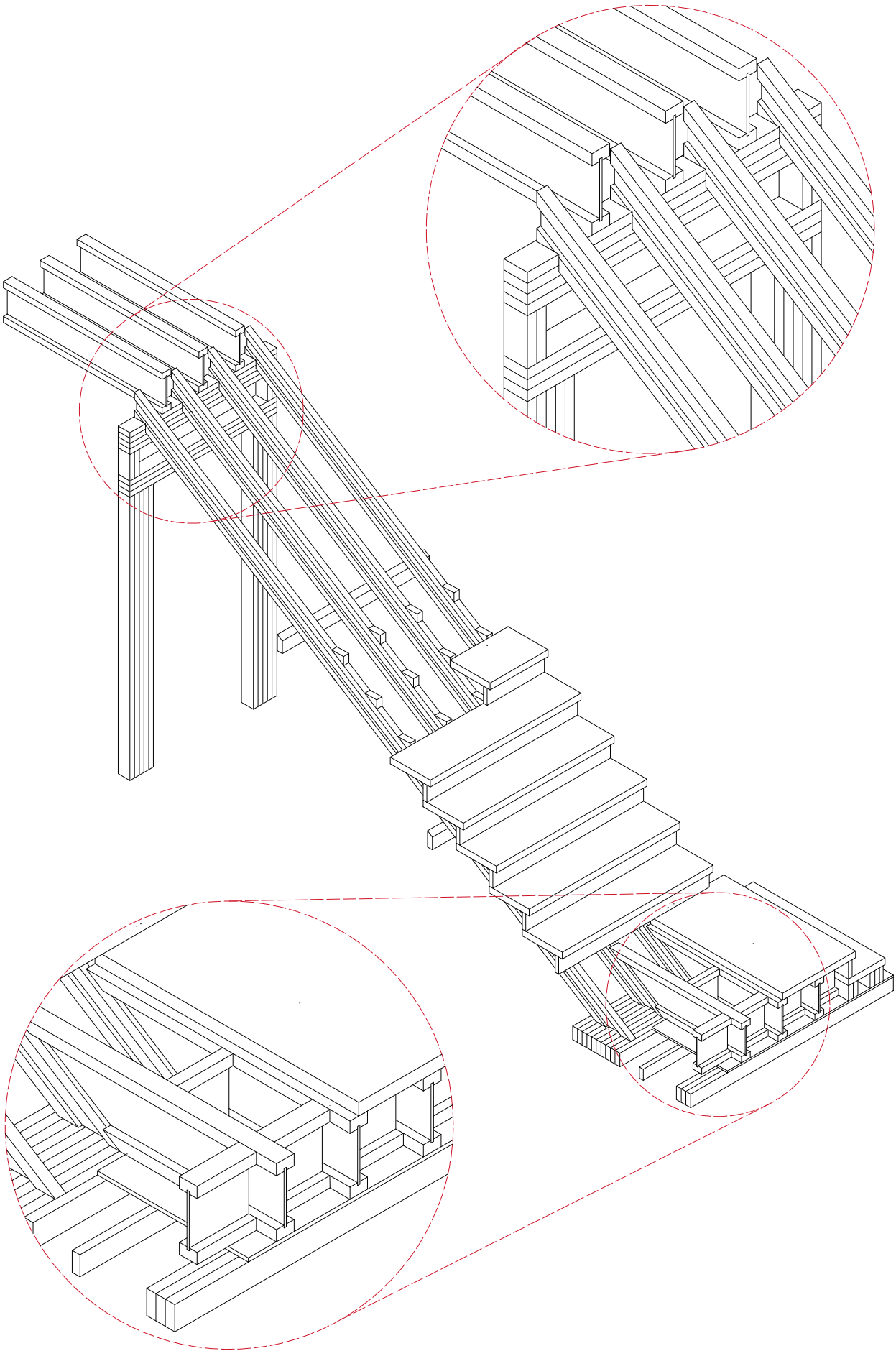


Relativamente à composição estrutural da cobertura (Fig. 118), esta organiza-se segundo uma hierarquia de elementos que permitem compatibilizar o sistema SIP com as necessidades estruturais e construtivas do projeto. A estrutura principal é constituída pelas vigas I-Joist, anteriormente referidas, responsáveis por suportar os esforços principais da cobertura e vencer os vãos necessários da habitação. Estes elementos estruturais funcionam como suporte para os restantes componentes da cobertura.

Sobre esta estrutura desenvolve-se uma subestrutura complementar, toda ela com elementos de 60x120 mm, subdividida em diferentes elementos com funções específicas de apoio e estabilização dos painéis SIP. (1) O primeiro elemento, representado a linha vermelha contínua, corresponde às vigas madre, dispostas perpendicularmente as vigas principais e à direção dos painéis criando uma base contínua de suporte. (2) Adjacentes às vigas I-Joist, representadas a linha vermelha tracejada, existem peças secundárias fixadas diretamente à estrutura principal, funcionando como elementos intermédios de ligação e distribuição de cargas. (3) Sobre estas, representadas a linha vermelha tracejada (longa-curta), são ainda aplicados elementos destinados a assegurar um contacto uniforme com os painéis SIP.

A finalizar a composição da cobertura surge o painel SIP, representado a cinza, responsável simultaneamente pelo fecho superior da construção, pelo desempenho térmico da envolvente e pela continuidade estrutural do conjunto.

Fig. 118
Componentes da estrutura da cobertura



Relativamente ao sistema estrutural das escadas (Fig. 119), foram introduzidas quatro vigas I-Joist com o objetivo de minimizar possíveis vibrações resultantes da sua utilização.bNestes elementos são aplicadas pequenas peças triangulares, que permitem o apoio e a fixação dos espelhos das escadas.

Na zona correspondente ao maior vão, a estrutura recorre a duas vigas maciças com secção de 60x120 mm responsáveis pela transferência das cargas para os barrotes existentes nas laterais dos painéis SIP.

Devido à esbelteza das vigas utilizadas na zona do patamar, tornou-se necessário introduzir vigas dispostas perpendicularmente às vigas principais. Estas peças complementares têm como principal garantir estabilidade lateral e evitar a torção.

Já no topo das escadas, procurou-se evitar o encontro direto entre as vigas I-Joist pertencentes à estrutura das escadas e as vigas responsáveis pelo suporte do piso superior. Para isso, a solução estrutural foi desenvolvida de forma a manter estes elementos desencontrados entre si.

Fig. 119
Sistema estrutural das escadas

x

5.
CONCLUSÃO

A presente dissertação tem como objetivo a adaptação do sistema construtivo SIP a um modelo de habitação unifamiliar evolutiva, assente em princípios de pré-fabricação, modularidade e flexibilidade espacial.

Perante os impactos ambientais associados aos métodos de construção convencionais, caracterizados pelo elevado consumo energético, pela intensa utilização de matérias-primas e pela significativa produção de resíduos, bem como pela crescente escassez de mão de obra que afeta o setor da construção, a industrialização da construção assume um papel fundamental na procura de soluções mais sustentáveis. Neste contexto, o sistema SIP enquadra-se como um sistema capaz de responder às exigências ambientais contemporâneas, sendo uma solução que se encontra alinhada com os objetivos de redução do impacto ecológico no setor da construção.

Ao nível do desempenho técnico, os painéis SIP utilizados, devido à sua constituição composta por faces estruturais rígidas em OSB e um núcleo isolante contínuo em XPS, apresentam características que potenciam a sua integração em sistemas construtivos baseados na pré-fabricação. Esta configuração contribui para a redução de pontes térmicas e para a melhoria da estanquidade da envolvente, reforçando a sua compatibilidade com estratégias de eficiência energética e construção pré-fabricada. Neste sentido, mais do que um elemento isolado de desempenho, os SIP constituem a base material que sustenta a lógica modular e construtiva do modelo habitacional desenvolvido.

Relativamente ao processo construtivo, a natureza pré-fabricada dos painéis SIP permite a sua integração em processos construtivos industrializados, com montagem em obra simplificada e organizada. Esta lógica construtiva favorece a racionalização dos processos, bem como a redução de desperdício de materiais e a diminuição de mão de obra. A combinação entre produção em ambiente controlado e montagem em obra permite a criação de elementos construtivos padronizados e repetíveis, facilitando a sua aplicação em sistemas habitacionais modulares e evolutivos.

Apesar das vantagens, a investigação permitiu igualmente reconhecer algumas limitações associadas ao sistema. Desde logo, a constituição do núcleo isolante condiciona a utilização de isolamentos de origem natural, devido à necessidade de garantir rigidez do painel, o que condiciona parcialmente a sustentabilidade global do sistema. Para além disso, a necessidade de compatibilização entre projeto e execução exige um elevado nível de planeamento prévio, uma vez que a natureza modular e pré-fabricada do sistema dificulta alterações improvisadas em obra. Torna-se, assim, essencial prever antecipadamente todas as aberturas, infraestruturas e

reforços estruturais necessários. Acrescem ainda questões relacionadas com o transporte dos painéis, especialmente em locais de difícil acesso, bem como a correta impermeabilização das juntas para evitar patologias associadas à humidade, representam aspetos críticos que requerem particular atenção técnica.

O desenvolvimento do projeto arquitetónico permitiu ainda demonstrar que as limitações frequentemente associadas aos sistemas modulares podem ser ultrapassadas através de uma abordagem projetual consciente e integrada. A proposta da habitação unifamiliar evidenciou que a modulação rigorosa não compromete a qualidade espacial nem a flexibilidade da arquitetura. Pelo contrário, possibilita a criação de soluções adaptáveis e evolutivas, capazes de acompanhar diferentes dinâmicas familiares e necessidades futuras. Desta forma, o sistema SIP revelou-se uma solução versátil e compatível com novas formas de habitar, reforçando o seu potencial enquanto alternativa sustentável para o futuro da arquitetura residencial.

Por fim, considera-se relevante o desenvolvimento de futuras investigações centradas na monitorização do desempenho térmico, acústico e estrutural de edifícios construídos com sistema SIP no contexto climático e regulamentar português. Do mesmo modo, revela-se pertinente aprofundar o estudo do comportamento destas estruturas perante fenómenos de degradação biológica, humidade e ações sísmicas, tendo em consideração as especificidades do território.

6.
BIBLIOGRAFIA

LIVROS

ARIEFF, A. & BURKHART, B. (2002) - ***Prefab***. Gibbs Smith.
VAN ASSCHE, P. (2019) - ***Architecture & Circular Thinking***.
BACHMANN, H. & STEINLE, A. (2011) - ***Precast Concrete Structures***. Ernst & Sohn.
BATCHELOR, R. (1994) - ***HENRY FORD: Mass production, Modernism and design***. Manchester University Press.
FETTERS, T. & KOHLER, V. (2002) - ***The Lustron Home: The History of a Postwar Prefabricated Housing Experiment***. McFarland & Company, Inc., Publishers.
GLOAG, J. & BRIDGWATER, D. (2023) - ***A History of Cast Iron in Architecture***. Routledge.
HERBERT, G. (1978) - ***Pioneers of Prefabrication: The British Contribution in the Nineteenth Century***. *The Johns Hopkins University Press*.
HOGAN-O'NEILL, W. (2021) - ***Prefabricated and Modular Architecture: Aligning Design with Manufacture and Assembly***. The Crowood Press Ltd.
KNAACK, U.; CHUNG-KLATTE, S. & HASSELBACH, R. (2012) - ***Prefabricated Systems - Principles of Construction***. Birkhäuser.
LE CORBUSIER (1986) - ***Towards a New Architecture***. Dover Publications , Inc.
LOUDON, J. (1846) - ***The Encyclopedia of Cottage, Farm, and Villa Architecture and Furniture***.
LSTIBUREK, J. (2008) - ***Builder's Guide to Structural Insulated Panels (SIP's) for all Climates***. *Building Science Corporation*.
MORLEY, M. (2000) - ***Building with Structural Insulated Panels (SIPS)- Strength and Energy Efficiency Through Structural Panel Construction***. Taunton Press Inc.
REIFF, D. (2000) - ***Houses from Books: Treatises, Pattern Books, and Catalogs in American Architecture, 1738-1950: A History and Guide***. The Pennsylvania State University Press.
SAFDIE, M. (1970) - **Beyond Habitat**. The M.I.T. Press.
SMITH, R. (2010) - ***Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction***. John Wiley & Sons, Inc.
SMITH, R. & QUALE, J. (2017) - ***Offsite architecture: Constructing the future***. Routledge.
STAIB, G.; DÖRRHÖFER, A. & ROSENTHAL, M. (2008) - ***Components and Systems: Modular Construction - Design Structure New Technologies (DETAIL)***. Birkhäuser.
WALLIS, A. (1997) - ***Wheel Estate: The Rise and Decline of Mobile Homes***. Oxford University Press.
WOODWARD, G. (1869) – ***Woodward's Country Homes***. Geo. E. & F. W. Woodward

ARTIGOS E PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS

BARBOSA, A. (2023) - **A Pré-fabricação como Método Construtivo para uma Arquitetura Circular**. Escola de Arquitetura Arte e Design, Universidade do Minho.
BRANCO, J. (2013) - **Casas de madeira. Da tradição aos novos desafios**. Seminário Casas de Madeira, ISISE, Departamento de Engenharia da Universidade do Minho, 75–86.
BRANCO, J., MATOS, F., LOURENÇO, P. (2017) - ***Experimental In-Plane Evaluation of Light Timber Walls Panels***. Buildings, volume 7 (3), 63. https://doi.org/10.3390/buildings7030063
BRESSANI, M. & GRIGNON, M. (2013) - ***L'architecture comme expérience totale: Autour d'une restitution informatique de la salle de***

lecture de la bibliothèque Sainte-Geneviève d'Henri La-brouste. *RACAR Canadian Art Review*, volume 38 (1), 30–44. https://doi.org/10.7202/1066662ar

BRUSSELAERS, N.; FUFA, S. M. & MOMMENS, K. (2022) - ***A Sustainability Assessment Framework for On-Site and Off-Site Construction Logistics***. *Sustainability*, volume 14 (14), 8573. https://doi.org/10.3390/su14148573

BUTLER, E. (2018) - ***Protecting Usonia: A Homeowner's Site Manager's Resource for Understanding and Addressing Commun Presevation Concerns in frank Lloyd Wright's Usonian Home***. *The School of Architecture of Tulane University.*

CIRCLE ECONOMY FOUNDATION (2025). ***The Circularity Gap Report 2025***. https://www.circle-economy.com/resources/the-circularity-gap-report-2025

CHEN, Y.; OKUDAN, G. & RILEY, D. (2010) - ***Sustainable performance criteria for construction method selection in concrete buildings***. *Automation in Construction*, volume 19 (2), 235–244. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.10.004

COELHO, A & BRITO, J. (2007) - ***Construction and demolition waste management in Portugal***. Portugal SB07 - *Sustainable Construction, Materials and Practices.* https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4047.1768

CORREIA, A. (2017) - ***Fabricating Architecture From Modern to Global Space***. Departamento de Arquitetura, Universidade de Coimbra.

COSTA, J. (2013) - **Construção Prefabricada-Análise da Utilização da Prefabricação nas várias Etapas do Processo Construtivo**. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

COUTO, A. & COUTO, J. (2007) - **Vantagens Produtivas e Ambientais da Pré-fabricação**. Engenharias'07 inovação & desenvolvimento.

FIELD, W. (1942) - ***A Reexamination into Invention of the Balloon Frame***. *Journal of the American Society of Architectural Historians*, volume 2 (4), 3–29. https://doi.org/10.2307/901212

GARAY, R.; POBLETE, H. & KARSULOVIC, T. (2009) - ***Evaluation of oriented strandboard and plywood subjected to severe relative humidity and temperature conditions***. *Forest Products Journal*, volume 59 (3), 84–90.

HERBERT, G. (1972) - ***The Portable Colonial Cottage***. *Journal of the Society of Architectural Historians*, volume 31 (4), 261–275. https://doi.org/10.2307/988810

KAMALI, M. & HEWAGE, K. (2016) - ***Life cycle performance of modular buildings: A critical review***. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 62 (6), 1171-1183. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031

LEITE, R. (2015) - **Métodos Construtivos de Edifícios-Comparação entre Pré-fabricação e Construção Tradicional em Betão Armado**. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

LOOBY, K.; SMITH, S. & SHAHRESTANI, M. (2021) - ***Attitudes towards offsite prefabrication: A fuzzy approach to examining uncertainty within U.K. industry perception***. *Intelligent Buildings International*, volume 14 (5) 738–752. https://doi.org/10.1080/17508975.2021.2004385

LU, N. & LISKA, R. (2008) - ***Designers' and General Contractors' Perceptions of Offsite Construction Techniques in the United State Construction Industry***. I*nternational Journal of Construction Education and Research*, volume 4 (3), 177–188. http://dx.doi.org/10.1080/15578770802494565

MEIREIS, Cláudio (2021) - **Sistema Pré-fabricado à base de madeira para a reabilitação sustentável da envolvente dos edifícios de betão armado: O caso do Bairro Social de Darque**. Escola de

Arquitetura Arte e Design, Universidade do Minho.

MOUSSAR, M.; GARIBALDI, M. P. & CURBACH, M. (2017) - ***The invention of Reinforced Concrete (1848-1906)***. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet,* 2785-2794. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_316

NAVARATNAM, S.; NGO, T.; GUNAWARDENA, T. & HENDERSON, D. (2019) - ***Performance Review of Prefabricated Building Systems and Future Research in Australia***. *Buildings*, volume 9 (2) (38). https://doi.org/10.3390/buildings9020038

NATIONAL AUDIT OFFICE (2005) - ***Using modern methods of construction to build homes more quickly and efficiently***. https://www.nao.org.uk/

PANJEHPOUR, M.; ALI, A. & VOO, Y. (2013) - ***Structural Insulated Panels: Past, Present; and Future***. *Journal of Engineering*, Project, and Production Management, volume 3 (1), 2–8. https://doi.org/10.32738/JEPPM.201301.0002

PILOTO, P. & VERGARA, D. (2023) - ***Light timber framed wall under fire: Effect of the load and cladding***. *Engineering Structures*, volume 280, 115696. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115696

RUNGTHONKIT, P. (2012) - ***Structural Behaviour of Structural Insulated Panels (SIPS)***. *School of Civil Engineering, University of Birmingham*

SAH, T. LACEY, A. HAO, H. & CHEN, W. (2024) - ***Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction: State-of-the-art review***. *Journal of Building Engineering*, volume 89, 109391. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109391

SALIH, A.; WANG, C.; TIAN, R. & MOJTAHEDI, M. (2025) - ***A Case-Study-Based Comparative Analysis of Using Prefabricated Structures in Industrial Buildings***. *Buildings*, volume 15 (14), 2416. https://doi.org/10.3390/ buildings15142416

SARAIVA, P. (2013) - **Estudo comparativo de soluções em alvenaria estrutural e betão armado**. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

STRUCTURAL INSULATED PANELS ASSOCIATION (n.d.). ***SIP DESIGN-BP 3: SIP Structural Capabilities***. https://www.sips.org/

STRUCTURAL TIMBER ASSOCIATION (2015) - ***Structural insulated panel construction***. *The Structural Engineer*, volume 93 (8), 40–46. https://doi.org/10.56330/XMPJ6720

TAVARES, V.; GREGORY, J.; KIRCHAIN, R. & FREIRE, F. (2021) - ***What is the potential for prefabricated buildings to decrease costs and contribute to meeting EU environmental targets?*** *Building and Environment*, volume 206, 108382. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108382

TENÓRIO, M.; FERREIRA, R.; BELAFONTE, V.; SOUSA, F.; MEIREIS, C.; FONTES, M.; VALE, I.; ALVES, R.; SILVA, S.; LEITÃO, D.; FONTES, A.; MAIA, C.; CAMÕES, A. & BRANCO, J. (2024) - ***Contemporary Strategies for the Structural Design of Multi-Story Modular Timber Buildings: A Comprehensive Review***. *Applied Sciences*, volume 14 (8), 3194. https:// doi.org/10.3390/app14083194

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2025) - ***Global Status Report for Buildings and Construction 2024/25: Not just another brick in the wall—The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissins fast***. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/47214

SÍTIOS DA INTERNET

BSC SOLUTIONS GROUP INC. (2022) - ***BUILD GREEN - SIPs. BUILDERS OF A BETTER WORLD***. https://www.bscsgi.com/about-sips acedido a 10/10/2025

HAWKINS, A. (2021) - ***What is the History of SIPs?*** *Formance*. https://formance.co.nz/news/what-is-the-history-of-sips/ acedido a 23/10/2025

JULAR (2025a) - **Contraplacados—Contraplacados tecnologicamente avançados**. https://jular.pt/produtos/placas-e-paineis/contraplacados/ acedido a 23/10/2025

JULAR (2025b) - **OBS - o painel resistente, dúravel e dimensionalmente estável**. https://jular.pt/produtos/placas-e-paineis/osb/ acedido a 23/10/2025

MISHRA, D. (2021) - ***Which board is better, OSB or MDF?*** Wishkarma. https://blog.wishkarma.com/product-comparision/which-board-is-better-osb-or-mdf/ acedido a 05/05/2025

RESEARCH AND MARKETS (2024) - ***Europe Low-Carbon Construction Material Industry Research 2024: A $130.75+ Billion Market by 2032***, Germany, France, and Netherlands Lead Adoption. https://www.globenewswire.com/news-release/2024/05/08/2877565/28124/en/Europe-Low-Carbon-Construction-Material-Industry-Research-2024-A-130-75-Billion-Market-by-2032-Germany-France-and-Netherlands-Lead-Adoption.html acedido a 01/10/2025

SANTIBAÑEZ, D. (2017) - Shotgun House / Alejandro Soffia. ArchDaily Brasil. https://www.archdaily.com.br/br/892608/casalarga-alejandro-soffia

STRATEGIC MARKET RESEARCH (2022) - ***Structural Insulated Panels Report 2030***. https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/structural-insulated-panels-market?utm_source=chatgpt.com acedido a 28/05/2026

STUDCO BUILDING SYSTEMS (2019) - ***Compare Steel Stud Frames and Timber Stud Frames***. https://studcosystems.com.au/news-and-tech-tips/compare-steel-timber-studs/ acedido a 23/04/2026 acedido a 04/05/2026

OTT, C. (2019) - **Residência El Tume / Abarca Palma Arquitectos**. ArchDaily Brasil. https://www.archdaily.com.br/br/918610/residencia-el-tume-abarca-palma-arquitectos acedido a 04/05/2026

ARCHDAILY (2014) - **SIP m3 House / Ian Hsü + Gabriel Rudolphy**. ArchDaily. https://www.archdaily.com/580330/sip-m3-house-ian-hsu-gabriel-rudolphy acedido a 04/05/2026

SIPCO (2025) - ***The Truth About the Longevity of SIP Panel Homes***. *SIPCO Structural Insulated Panels*. https://www.thesipcompany.com/the-truth-about-the-longevity-of-sip-panel-homes/ acedido a 07/05/2025

SONAE ARAUCO (s.d.) - **FAQs**. https://www.sonaearauco.com/pt/faqs/modules/faqs/ acedido a 10/10/2025

Alden B. Dow - Home & Studio (2019) - ***The Sandwich Panel Houses by Alden B. Dow***. https://www.abdow.org/sandwich-panel-houses/ acedido a 10/10/2025

WOLF, R. (2011). ***Ernst May's "Flats for Subsistence Living" (1929) - Modernist Architecture***. https://modernistarchitecture.wordpress.com/2011/09/10/ernst-may%e2%80%99s-%e2%80%9cflats-for-subsistence-living%e2%80%9d-1929-2/ acedido a 08/11/2025

Referências de figuras

Fig. 1- Representação dos resíduos produzidos por demolições e restos de obra, adaptado da fonte: *United Nations Environment Programme*, 2025, p. 15;
Fig. 2- Estrutura da dissertação, autoria do autor;
Fig. 3- Estaleiro de construção tradicional, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/925826/casa-villa-marie-superfuturegroup/5d8c3601284dd1becc000158-villa-marie-house-superfuturegroup-axonometry-prefabrication?utm_source-Pinterest&utm_medium=organic, acedida a 13/12/2026, com recurso a inteligência artificial;
Fig. 4- Estaleiro de construção pré-fabricada, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/925826/casa-villa-marie-superfuturegroup/5d8c3601284dd1becc000158-villa-marie-house-superfuturegroup-axonometry-prefabrication?utm_source=Pinterest&utm_medium=organic, acedida a 13/12/2026, com recurso a inteligência artificial;
Fig. 5- Mão de obra e equipamento necessário em construção tradicional, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/925826/casa-villa-marie-superfuturegroup/5d8c3601284dd1becc000158-villa-marie-house-superfuturegroup-axonometry-prefabrication?utm_source=Pinterest&utm_medium=organic, acedida a 13/12/2026, com recurso a inteligência artificial;
Fig. 6- Mão de obra e equipamento necessário em construção pré-fabricada, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/925826/casa-villa-marie-superfuturegroup/5d8c3601284dd1becc000158-villa-marie-house-superfuturegroup-axonometry-prefabrication?utm_source=Pinterest&utm_medium=organic, acedida a 13/12/2026, com recurso a inteligência artificial;
Fig. 7- Requisitos de qualidade, autoria do autor;
Fig. 8- Fabrico, transporte e montagem de elementos pré-fabricados, autoria do autor;
Fig. 9- Comparação de componentes e ligações entre construção tradicional e construção pré-fabricada, adaptado da fonte: BARBOSA, A., 2023, p.25;
Tab. 1- Síntese qualitativa do desempenho ambiental da construção pré-fabricada, fontes mencionadas na tabela;
Fig. 10- Abrigos nómadas, adaptado da fonte: STAIB, G.; DÖRRÖFER, A.; ROSENTHAL, M., 2008, p. 14;
Fig. 11- *Portable Cottages*, da fonte: STAIB, G.; DÖRRÖFER, A.; ROSENTHAL, M., 2008, p. 18;
Fig. 12- *Manning Portable Colonial Cottage for Emmigrants*, da fonte: SMITH, R., 2010, p. 6;
Fig. 13- *Ballon Frame*, adaptado da fonte: https://activerain-store.s3.amazonaws.com/image_store/uploads/1/0/0/7/6/ar118585596367001.jpg, acedido a 29/11/2025;
Fig. 14- Construção em *Ballon Frame,* adaptado da fonte: https://jeanhuets.com/whitman-house-framing-19th-century/, acedido a 29/11/2025;
Fig. 15- *Ballon Frame vs Platform Frame*, adaptado da fonte: https://pt.pinterest.com/pin/528750812473312462/, acedido a 29/11/2025;
Fig. 16- *The Coalbrookdale Company Bridge*, da fonte: STAIB, G.; DÖRRÖFER, A.; ROSENTHAL, M., 2008, p. 19;
Fig. 17- Fábrica de linho de Shrewsbury, adaptado da fonte: https://historicengland.org.uk/campaigns/visit/shrewsbury-flax-mill/history/, acedido a 29/11/2025;

Fig. 18- Ferro ondulado, SMITH, R., 2010, p. 8;
Fig. 19- Biblioteca de Saint-Geneviève, adaptado da fonte: BRESSANI, M.; GRIGNON, M., 2013, p. 38;
Fig. 20- Palácio de Cristal, adaptado da fonte: GLOAG, J.; BRIDGWATER, D., 2023, p. 202;
Fig. 21- *Quonset Huts/Nissen Huts*, adaptado da fonte: https://www.youtube.com/watch?v=8PQ7ViDhOsk, acedido a 29/11/2025;
Fig. 22- Betão armado, da fonte: STAIB, G.; DÖRRÖFER, A.; ROSENTHAL, M., 2008, p. 22;
Fig. 23- Casino de Biarritz, adaptado da fonte: https://dicasdefrances.blogspot.com/2010/07/biarritz-aquitaine.html, acedido a 06/12/2025;
Fig. 24- Casas pré-fabricadas destinadas a sinalizadores e porteiros ferroviários, adaptado da fonte: BACHMANN, H.; STEINLE, A., 2011, p. 6;
Fig. 25- Fredrick Winslow Taylor, Taylorism, adaptado da fonte: https://www.paultaylor.associates/2025/01/11/frederick-winslow-taylor-the-father-of-scientific-management/, acedido a 13/12/2025;
Fig. 26- Henry Ford e a sua linha de produção para o Model T, adaptado das fontes: https://www.thehenryford.org/explore/stories-of-innovation/visionaries/henry-ford/; https://clickamericana.com/topics/culture-and-lifestyle/cars-trucks/see-ford-assembly-lines-from-100-years-ago-mass-producing-model-t-cars, acedido a 13/12/2025;
Fig. 27- *Aladdin Company*, adaptado da fonte: SMITH, R., 2010, p. 10;
Fig. 28- *Lustron Corporation*, adaptado da fonte: FETTERS, T.; KOHLER, V., 2002, capa do livro;
Fig. 29- *Airstream*, adaptado da fonte: https://www.airstream.com/blog/10-interesting-facts-about-airstream-history/, acedido a 13/12/2025;
Fig. 30- Casas móveis, adaptado da fonte: https://www.vintag.es/2024/10/interior-of-schult-mobile-home-trailer.html, acedido a 13/12/2025;
Fig. 31- Tear mecânico, adaptado da fonte: SMITH, R., 2010, p. 19;
Fig. 32- CAD/CAM, adaptado das fontes: https://safi.com/structural-analysis-design-software/; https://www.dellstore.com/dell-27-monitor-se2725hm-210-bqlj.html ; https://leadrp.net/pt/blog/different-types-of-cnc-machines-and-their-applications/, acedido a 13/12/2025;
Fig. 33- Fábrica AEG, adaptado da fonte: https://architectuul.com/architecture/aeg-turbine-factory, acedido a 13/12/2025;
Fig. 34- Casa nº17, adaptado da fonte: https://bauhauseso.blogspot.com/2020/07/casas-16-y-17.html acedido a 13/12/2025;
Fig. 35- *Package House System/General Panel System*, da fonte: KNAACK, U.; CHUNG-KLATTE, S.; HASSELBACH, R., 2012, p. 34;
Fig. 36- *Dom-Ino*, adaptado da fonte: https://www.fondationlecorbusier.fr/en/work-architecture/projects-dom-ino-house-not-located-1914/, acedido a 13/12/2025;
Fig. 37- *Maison Citrohan*, adaptado da fonte: https://architecture-history.org/architects/architects/LE%20CORBUSIER/OBJECTS/1927,%20Maison%20Citr%C3%B6han,%20STUTTGART,%20GERMANY.html, acedido a 13/12/2025;
Fig. 38- *Usonian Houses- The Gordon House*, adaptado da fonte: https://www.dwell.com/article/usonian-homes-frank-lloyd-wright-e75b5b56, acedido a 13/12/2025;
Fig. 39- *Dymaxion House*, da fonte: STAIB, G.; DÖRRÖFER, A.; ROSENTHAL, M., 2008, p. 26;
Fig. 40- *Dymaxion Development House*, adaptado da fonte; https://arquine.com/domesticidad-dinamica/, acedido a 13/12/2025;
Fig. 41- *Wichita House*, adaptado da fonte: KNAACK, U.; CHUNG-KLATTE,

S.; HASSELBACH, R., 2012, p. 33;
Fig. 42- *Meudon House*, adaptado da fonte: https://www.jeanprouve.com/en/fiche/1951-34, acedido a 13/12/2025;
Fig. 43- *Maison Tropicale*, adaptado da fonte: https://voices.uchicago.edu/expositionsmagazine/2022/02/08/prouves-moving-houses/, acedido a 13/12/2025;
Fig. 44- *Eames House*, adaptado da fonte: https://architecture-history.org/architects/architects/EAMES/OBJECTS/1949,%20CASE%20STUDY%20HOUSE%208THE%20EAMES%20HOUSE%20,%20USA.html, acedido a 13/12/2025;
Fig. 45- *Habitat Montreal*, adaptado da fonte: https://www.architecturalrecord.com/articles/12479-habitat-67-by-moshe-safdie, acedido a 13/12/2025;
Fig. 46- *Nakagin Capsule Tower*, adaptado da fonte: https://archxde.com/obras/nakagin-capsule-tower/, acedido a 13/12/2025;
Fig. 47- Níveis de pré-fabricação, SMITH, R. 2010, p. 128;
Fig. 48- Pré-fabricação linear, autoria do autor;
Fig. 49- Pré-fabricação apainelada, autoria do autor;
Fig. 50- Pré-fabricação modular, autoria do autor;
Fig. 51- Pré-fabricação híbrida, autoria do autor;
Fig. 52- Painel em *Light Timber Frame*, autoria do autor;
Fig. 53- Construção em *Light Timber Frame*, adaptado da fonte: https://ecotechomes.ie/the-benefits-of-timber-frame-houses/, acedido a 23/04/2026;
Fig. 54- Painel em *Light Steel Frame*, autoria do autor;
Fig. 55- Construção em *Light Steel Frame*, adaptado da fonte: https://www.pequenohome.com/, acedido a 23/04/2026;
Fig. 56- Painel pré-fabricado em betão, autoria do autor;
Fig. 57- Construção com painéis pré-fabricados de betão, adaptado da fonte: https://bewa.com.pl/domy-prefabrykowane/, acedido a 23/04/2026;
Fig. 58- *Structural Insulated Panel*, autoria do autor;
Fig. 59- Construção com SIP, adaptado da fonte: https://epsbuildings.com/sips/, acedido a 23/04/2026;
Fig. 60 e 61- Casa na Noruega, projetada e construída pela SIP-EUROPE, adaptado da fonte: https://www.sipeurope.eu/en/referencie/cottages-recreational-facilities,prefabricated-buildings/gaustablikk-norway/ acedido a 28/05/2026;
Fig. 62 e 63- Casa nos Açores, projetada e construída pela SIP-EUROPE, adaptado das fontes: https://www.sipeurope.eu/en/referencie/detached-houses,panel-buildings/azores-portugal/ e https://www.dezeen.com/2026/05/23/atelier-backlar-blue-house-azores-portugal-recycled-ocean-plastic/ acedido a 28/05/2026;
Fig. 64- Casa SIP M3, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/759559/casa-sip-m3-ian-hsu-plus-gabriel-rudolphy, acedido a 04/05/2026;
Fig. 65- Módulos que definem a Casa SIP M3, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/759559/casa-sip-m3-ian-hsu-plus-gabriel-rudolphy, acedido a 04/05/2026;
Fig. 66- Corte Casa SIP M3, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/759559/casa-sip-m3-ian-hsu-plus-gabriel-rudolphy, acedido a 04/05/2026;
Fig. 67- Casa Shotgun, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/892608/casalarga-alejandro-soffia, acedido a 04/05/2026;
Fig. 68- Repetição longitudinal dos SIP, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/892608/casalarga-alejandro-soffia, acedido a 04/05/2026;
Fig. 69 e 70- Cortes transversais Casa Shotgun, adaptado da fonte: https://

www.archdaily.com.br/br/892608/casalarga-alejandro-soffia, acedido a 04/05/2026;
Fig. 71- Residência El Tume, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/918610/residencia-el-tume-abarca-palma-arquitectos, acedido a 04/05/2026;
Fig. 72- Corte transversal Residência El Tume, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/918610/residencia-el-tume-abarca-palma-arquitectos, acedido a 04/05/2026;
Fig. 73- Corte longitudinal Residência El Tume, adaptado da fonte: https://www.archdaily.com.br/br/918610/residencia-el-tume-abarca-palma-arquitectos, acedido a 04/05/2026;
Fig. 74- *Herbert Jacobs House*, de Frank Lloyd Wright, adaptado da fonte: https://www.youtube.com/watch?v=iogsSsn8XDU, acedido a 23/04/2026;
Fig. 75 a 77- Três casas com o sistema desenvolvido por Dow, adaptado da fonte: https://www.abdow.org/sandwich-panel-houses/, acedido a 23/04/2026;
Fig. 78- Produção dos painéis de Dow, adaptado com uso de inteligência artificial da fonte: https://www.abdow.org/sandwich-panel-houses/, acedido a 23/04/2026;

Tab. 2- Vantagens e desvantagens dos diferentes materiais, autoria do autor;
Fig. 79- Processo industrial dos SIP, autoria do autor;
Fig. 80- Representação de montagem em obra, autoria do autor;
Fig. 81- Ligação painel/painel, autoria do autor;
Fig. 82- Ligação painel/piso, autoria do autor;
Fig. 83- Ligação painel/painel (canto), autoria do autor;
Fig. 84- Remate de painéis, autoria do autor;
Fig. 85- Aberturas, autoria do autor;
Fig. 86- Axonometria explodida do projeto proposto, autoria do autor;
Fig. 87 e 88- Plantas piso térreo e primeiro piso, autoria do autor;
Fig. 89 e 90- Plantas estruturais piso térreo e primeiro piso, autoria do autor;
Fig. 91 e 92- Alçados AA' e BB', autoria do autor;
Fig. 93 e 94- Alçados CC' e DD', autoria do autor;
Fig. 95 e 96- Cortes EE' e FF', autoria do autor;
Fig. 97 e 98- Cortes GG' e HH', autoria do autor;
Fig. 99 e 100- Cortes II' e JJ', autoria do autor;
Fig. 101 e 102- Cortes KK' e LL', autoria do autor;
Fig. 103 e 104- Cortes MM' e NN', autoria do autor;
Fig. 105- Axonometria explodida das camadas de uma parede exterior, autoria do autor;
Fig. 106- Pormenorização planta piso térreo, autoria do autor;
Fig. 107- Pormenorização planta primeiro piso, autoria do autor;
Fig. 108- Pormenorização corte EE', autoria do autor;
Fig. 109- Pormenorização corte FF', autoria do autor;
Fig. 110- Pormenorização corte GG', autoria do autor;
Fig. 111- Pormenorização corte HH', autoria do autor;
Fig. 112- Pormenorização corte II', autoria do autor;
Fig. 113- Pormenorização corte JJ', autoria do autor;
Fig. 114- Pormenorização corte KK', autoria do autor;
Fig. 115- Pormenorização corte LL', autoria do autor;
Fig. 116- Pormenorização corte NN', autoria do autor;
Fig. 117- Fases de processo de aumento vertical, autoria do autor;
Fig. 118- Componentes da estrutura da cobertura, autoria do autor;
Fig. 119- Sistema estrutural das escadas, autoria do autor;

Referências de gráficos

Gráf. 1- Emissões globais de dióxido de carbono, adaptado da fonte: *United Nations Environment Programme*, 2025, p. 14;
Gráf. 2- Emissões globais de dióxido de carbono face às metas do Acordo de Paris, adaptado da fonte: *United Nations Environment Programme*, 2025, p. 14;
Gráf. 3- Extração global de materiais ao longo dos últimos 50 anos, adaptado da fonte: *The Circularity Gap Report*, 2025, p. 17;
Gráf. 4- *Models of Doom* apresentados na palestra *Architecture and Circular Thinking* de Peter van Assche, adaptado da fonte: VAN ASSCHE, P., 2019, p. 8;
Gráf. 5- Gráfico paleoclimático correlacionando CO_2 e temperatura na Antártida, adaptado da fonte: VAN ASSCHE, P., 2019, p. 10;
Gráf. 6- Produção de resíduos por setor em Portugal, adaptado da fonte: Instituto Nacional de Estatística, 2024, p. 111;
Gráf. 7- Comparação de tempos de construção entre construção tradicional e pré-fabricada, adaptado da fonte: NAVARATNAM, S.; NGO, T.; GUNAWARDENA, T.; HENDERSON, D., 2019, p.4;
Gráf. 8- Comparação do custo de ciclo de vida de diferentes tipologias construídas em pré-fabricados de LSF, madeira e construção tradicional, adaptado da fonte: TAVARES, V.; GREGORY, J.; KIRCHAIN, R.; FREIRE, F., 2021, p. 22;