



Universidade de Aveiro
2022

**Carlos de Assis
Pinheiro de Almeida**

**Conceção de um pequeno edifício modular inserido em
economia circular**



**Carlos de Assis
Pinheiro de Almeida**

**Conceção de um pequeno edifício modular inserido em
economia circular**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação foi apoiada pelos seguintes projetos (This thesis was supported by the projects):

RE-LIVE-BLADES - PROJETO DE I&DT EMPRESAS EM COPROMOÇÃO (aviso 17/SI/2019) - CENTRO-01-0247-FEDER-069820 - Centro Portugal Regional Operational Programme (Centro2020), under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement, through the European Regional Development Fund.

UIDB/00481/2020 and UIDP/00481/2020 - Fundação para a Ciência e a Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Centro Portugal Regional Operational Programme (Centro2020), under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement, through the European Regional Development Fund

O júri / The jury

Presidente / President

Professor Doutor Victor Fernando Santos Neto

Professor Auxiliar em Regime Laboral, Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Professor Doutor Romeu da Silva Vicente (Arguente Principal)

Professor Associado C/ Agregação, Universidade de Aveiro

Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas (Orientador)

Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

**Agradecimentos /
Acknowledgements**

Deixo o meu agradecimento ao meu orientador, Doutor Carlos Relvas, e ao meu coorientador, Doutor António Ramos, por todo o apoio, tutoria e disponibilidade ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus pais, irmã e amigos pelas palavras de motivação, e apoio incondicional.

Palavras-chave

Habitação; Modularidade; Economia circular; Reutilização; Ambiente

Resumo

Este trabalho desenvolve um conceito de um pequeno edifício de construção modular, tendo em consideração aspetos relacionados com a forma como os componentes se conectam, e o material que os constitui, por forma a respeitar os principais fundamentos da economia circular, contexto no qual o trabalho se insere. Depois de efetuada uma revisão bibliográfica acerca dos temas da construção modular e economia circular, bem como as medidas que podem ser tomadas para cumprir os princípios destes dois temas de maneira conjunta, obtiveram-se as linhas gerais de orientação ao desenvolvimento do conceito. Por se tratar da conceção de um produto, seguiram-se as principais trajetórias associadas ao desenvolvimento de novos conceitos, como a utilização da ferramenta QFD, que define os requisitos dos clientes alvo, oferecendo uma vez mais, um guia de atributos a cumprir. Após a criação de uma proposta inicial na qual se apresentam os principais componentes constituintes do edifício, modelados no *software* CAD Solidworks, realiza-se, através da mesma ferramenta, a montagem, na qual se definem os tipos e métodos de ligação e fixação entre componentes. Posteriormente, é feita uma breve análise estrutural ao conceito, sendo por fim, apresentada uma proposta final onde se demonstra uma possível configuração do pequeno edifício de construção modular montado.

Keywords

Housing; Modularity; Circular economy; Reuse; Environment

Abstract

This work develops a concept of a small building of modular construction, taking into account aspects related to the way the components are connected, and the material that constitutes them, in order to respect the main fundamentals of the circular economy, context in which the work inserts. After carrying out a bibliographic review on the themes of modular construction and circular economy, as well as the measures that can be taken to fulfill the principles of these two themes together, the general guidelines for the development of the concept were obtained. As it is about the design of a product, the main paths associated with the development of new concepts were followed, such as the use of the QFD tool, which defines the requirements of the target customers, offering, once again, a guide of attributes to be fulfilled. After creating an initial proposal in which the main constituent components of the building are presented, modeled in the Solidworks CAD software, the assembly is carried out using the same tool, in which the types and methods of connection and fixation between components are defined. Subsequently, a brief structural analysis of the concept is made, and finally, a final proposal is presented which demonstrates a possible configuration of the small assembled modular building.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos gerais do trabalho	2
1.3	Organização do documento	2
2	Revisão Bibliográfica e Estado de Arte.....	3
2.1	Os fundamentos da economia circular	3
2.2	A economia circular e a construção habitacional e modular.....	5
2.2.1	Reduzir o desperdício e usar uma cadeia de produção lean	7
2.2.2	<i>Design</i> com vista à adaptabilidade durante a fase operacional (redução através da extensão da vida útil)	7
2.2.3	<i>Design</i> com vista à desmontagem de estruturas, em componentes para reutilização	8
2.2.4	<i>Design</i> para a reciclagem dos materiais de construção.....	8
2.3	O estado da arte da construção modular	9
2.3.1	Primeiras construções modulares	9
2.3.2	O módulo	11
2.3.3	Construção modular	12
2.3.4	Fundações	16
2.3.5	Objetivos específicos do trabalho.....	17
2.3.6	Identificação de soluções construtivas modulares	17
2.4	Ferramentas de apoio e desenvolvimento	22
3	Desenvolvimento do produto	23
3.1	Procedimento adotados	23
3.2	Normas e condicionantes ao projeto.....	23
3.2.1	Dimensionamento geral dos edifícios.....	23
3.2.2	Norma de inflamabilidade contra incêndios	24
3.3	Especificações do projeto	25
3.3.1	QFD (Quality Function Deployment).....	26
3.3.2	Matriz da qualidade	26
3.3.3	Matriz do produto	28
3.4	Escolha do material da estrutura	29
3.4.1	Avaliação da taxa de reutilização e reciclagem de estruturas em aço, madeira e betão	29
3.4.2	Potencial de Aquecimento Global de estruturas em aço vs madeira	31
3.5	Proposta inicial	36
3.5.1	Elementos estruturais da parede.....	36

3.5.2	Elementos estruturais da cobertura	39
3.5.3	Elementos estruturais da fundação	40
3.5.4	Revestimento das paredes interiores	42
3.5.5	Revestimento do teto	46
3.5.6	Revestimento do piso	47
3.5.7	Revestimento exterior (paredes e cobertura)	48
3.5.8	Isolamento XPS	48
4	Projeto de sistemas	49
4.1	<i>Design for Assembly</i>	49
4.2	Simulação e análise estrutural	63
4.2.1	Materiais e as suas propriedades mecânicas	63
4.2.2	Análise estrutural do conceito	65
4.2.3	Análise de resultados	69
5	Proposta final	70
6	Conclusões	71
6.1	Conclusões	71
6.2	Trabalhos futuros	72
	Bibliografia	75
	Apêndice A	81
	Apêndice B	84
	Apêndice C	87

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Taxa anual de emissões de CO ₂ , por região do Mundo, registada entre meados do séc. XVIII e até ao ano 2019.....	3
Figura 2.2 - Número de artigos, publicados entre 2001 e 2021, cujo tema aborda o conceito de economia circular.....	5
Figura 2.3 - Fases da Economia Circular.....	6
Figura 2.4 - Manning Portable Colonial Cottage for Emigrants.....	10
Figura 2.5 - Tempo total de construção modular vs. tradicional.....	14
Figura 2.6 - Exemplo de Construção Modular Permanente.....	15
Figura 2.7 - Exemplo de edifícios recolocáveis.....	16
Figura 2.8 – Cave.....	16
Figura 2.9 - Estacas Helicoidais.....	16
Figura 2.10 - Estacas de betão armado.....	16
Figura 2.12 - Sistema construtivo Brikawood.....	19
Figura 2.13 - Sistema construtivo Gablok.....	20
Figura 2.14 - Placa inferior (4).....	20
Figura 2.15 - Bloco inferior com isolamento (5).....	20
Figura 2.16 - Bloco genérico com isolamento (8).....	20
Figura 2.17 - Bloco superior (9).....	20
Figura 2.18 - Lintel (9).....	21
Figura 2.19 - Placa superior (10).....	21
Figura 2.20 - Placa com encaixes (11).....	21
Figura 2.21 - Barrote de madeira (13).....	21
Figura 2.22 - Vigota de madeira (14).....	21
Figura 2.23 - Viga (15).....	21
Figura 2.24 - Painéis SIP da empresa Structall (disponíveis em 2 tamanhos).....	22
Figura 2.25 - Sistema de encaixe Snap-N-Lock para painéis SIP.....	22
Figura 3.1 - Priorização dos requisitos dos clientes.....	27
Figura 3.2 - Priorização das especificações técnicas do produto.....	28
Figura 3.3 - Priorização dos componentes do produto.....	29
Figura 3.4 - Desempenho de recuperação para estrutura em aço (Akanbi et al., 2018).....	30
Figura 3.5 - Desempenho de recuperação para estrutura em madeira (Akanbi et al., 2018) ...	30
Figura 3.6 - Desempenho de recuperação para estrutura em betão (Akanbi et al., 2018).....	30
Figura 3.7 - Limite do sistema de avaliação (LCA) [Allan e Phillips (2021)].....	32
Figura 3.8 - Comparação do impacto ambiental de edifícios em mass timber e aço [(Allan e Phillips, 2021)].....	33
Figura 3.9 - Potencial de aquecimento global para ciclo de vida da fase D do aço [(Allan e Phillips, 2021)].....	34
Figura 3.10 – GWP do berço ao túmulo – Avaliação com critérios base [(Morris, Allen e Hawkins, 2021)].....	35
Figura 3.11 - GWP do berço ao túmulo – Análise sensível contabilizando o tempo das emissões [(Morris, Allen e Hawkins, 2021)].....	35

Figura 3.12 - Uso total de recursos de energia primária não renovável (PENRT), do berço ao túmulo [(Morris, Allen e Hawkins, 2021)]	35
Figura 3.13 - Uso total de recursos de energia primária renovável (PERT), do berço ao túmulo [(Morris, Allen e Hawkins, 2021)]	35
Figura 3.14 – Sistema de medidas adotado	37
Figura 3.15 - Parede longitudinal contendo porta e janela pequena (comprimento do módulo), e parede lateral contendo janela grande (largura do módulo)	37
Figura 3.16 - Placa superior	38
Figura 3.17 - Placa inferior	38
Figura 3.18 - Pormenor dos entalhes inferiores feitos nos extremos (representado a azul) das placas superiores das paredes longitudinais	38
Figura 3.19 - Pormenor dos entalhes superiores feitos nos extremos (representado a azul) das placas superiores das paredes laterais	38
Figura 3.20 - Sistema de coordenadas adotado	39
Figura 3.21 - Travessas	40
Figura 3.22 - Estaca helicoidal	41
Figura 3.23 - Mancal com pino para montagem das placas nos montantes	42
Figura 3.24 – (à esquerda) - Placa de revestimento interior com detalhe do entalhe superior (acima) e entalhe inferior com chanfros (abaixo)	42
Figura 3.25 - Desmontagem das placas sem intersecções ou impedimentos	43
Figura 3.26 - Rebites para fixação entre o mancal e as placas (www.bralo.com)	43
Figura 3.27 - Porcas de garra - DIN 1624 (www.allfasteners.com)	43
Figura 3.28 - Rebitagem do mancal e inserção da porca de garra na face não visível (voltada para o interior da estrutura) – Pré-montagem em fábrica. Porca de garra obtida no grabcad por (Insertsdirect.com Ltd, 2015)	44
Figura 3.29 - Vista da face visível das placas, após rebitagem e inserção das porcas de garra	44
Figura 3.30 - Placa de revestimento das paredes interiores com uma tomada de eletricidade obtida no grabcad por (scarus, 2020b)	44
Figura 3.31 – Régua para encaixe das placas de revestimento interior e passagem de sistemas	45
Figura 3.32 – Sanca para placas de revestimento interior	46
Figura 3.33 – Rodapé para placas de revestimento interior	46
Figura 3.34 - Perfil W de teto falso para fixação prévia nas vigas de cobertura	46
Figura 3.35 - Perfil T para encaixe nos perfis W das vigas	47
Figura 3.36 - Placa de iluminação LED	47
Figura 3.37 - Detalhes do revestimento do piso	48
Figura 4.1 - Representação da pré-montagem em fábrica dos suportes de viga (SBE) nas tábuas de cintamento das paredes longitudinais fixos com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm	50
Figura 4.2 – Representação da pré-montagem em fábrica das ligações viga da fundação-tábuas de cintamento das paredes laterais da fundação, com parafusos TTSFS Ø6.0 x 120mm	50
Figura 4.3 – Montagem (no local) das estacas helicoidais e das tábuas de cintamento das paredes longitudinais	51
Figura 4.4 - Representação da pré-montagem em fábrica dos apoios (para encaixe das travessas / bloqueadores) nas vigas da fundação	51
Figura 4.5 - Detalhe do comprimento dos parafusos utilizados na pré-montagem dos apoios	51

Figura 4.6 - Representação da pré-montagem em fábrica dos apoios para as placas de isolamento XPS	51
Figura 4.7 - Colocação das vigas da fundação nos suportes pré-montados das tábuas de cintamento das paredes longitudinais, e pormenor dos parafusos (a azul) de fixação no local de montagem.....	52
Figura 4.8 - Encaixe das tábuas de cintamento das paredes laterais (pormenor à direita) e detalhe da fixação dos esquadros (pormenor à esquerda).....	52
Figura 4.9 - Encaixe das travessas / bloqueadores nos respetivos apoios das vigas	53
Figura 4.10 - Colocação das placas de isolamento térmico (XPS) na fundação	53
Figura 4.11 - Colocação e fixação das placas de revestimento do piso com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm	54
Figura 4.12 - Apoio para encaixe dos montantes e vigas	55
Figura 4.13 - Pré-montagem, em fábrica, dos apoios fixos com parafusos.....	55
Figura 4.14 - Pré-perfuração das placas inferiores, para passagem de parafusos de fixação (TTUFS Ø6.0 x 180mm), no local de montagem, das mesmas às tábuas de cintamento.....	55
Figura 4.15 - Posicionamento das placas inferiores das paredes laterais (destaque à esquerda) e fixação com parafusos TTUFS Ø6.0 x 70mm e Ø6.0 x 180mm (destaque à direita)	55
Figura 4.16 - Colocação e fixação das placas inferiores das paredes longitudinais.....	56
Figura 4.17 - Montante pré-perfurado para fixação por pino cilíndrico, e aparafusado com apoios para placas de isolamento XPS	56
Figura 4.18 - Montante com duas réguas (esquerda e direita) pré-montadas pela fixação com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm	57
Figura 4.19 - Detalhe da furação excêntrica entre réguas e montante	57
Figura 4.20 - Encaixe e fixação inferior por pino cilíndrico dos montantes das arestas verticais do módulo.....	57
Figura 4.21 - Montagem das placas superiores e pormenor das fixações dos montantes (com pinos cilíndricos) e placas (com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm)	58
Figura 4.22 - Finalização da montagem dos montantes	58
Figura 4.23 - Operação de pré-montagem dos perfis de teto falso nas vigas de cobertura com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm	58
Figura 4.24 – Ligação viga da cobertura – placa superior das paredes laterais	59
Figura 4.25 - Montagem das vigas da cobertura, das ligações entre placas laterais e vigas das extremidades, e das travessas / bloqueadores	59
Figura 4.26 – Montagem dos perfis T (representados a azul) de encaixe nos perfis W das vigas da cobertura.....	59
Figura 4.27 - Rotação dos perfis T de encaixe	60
Figura 4.28 - Montagem das placas de revestimento do teto e placas de iluminação LED.....	60
Figura 4.29 - Parafusos recartilhados - DIN 653.....	61
Figura 4.30 - Fixação dos rodapés às placas junto ao piso	61
Figura 4.31 - Fixação das sancas às placas junto ao teto	61
Figura 4.32 - Montagem das placas de revestimento das paredes interiores, sancas e rodapés. Tomada dupla obtida no grabcad por (scarus, 2020a)	61
Figura 4.33 - Colocação das placas de isolamento térmico XPS nas paredes e cobertura	62
Figura 4.34 - Montagem das placas de revestimento exterior com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm	62
Figura 4.35 - Colocação do aro do módulo.....	62

Figura 4.36 - Faces encastradas, sentido da aceleração gravítica e face de aplicação da carga distribuída	66
Figura 4.37 - Resultado à simulação de carga fletora na viga de cobertura - flecha.....	66
Figura 4.38 – Cargas aplicadas na simulação ao montante, Face encastrada e aceleração gravítica	68
Figura 4.39 - Resultado à simulação das cargas fletoras no montante - flecha	68
Figura 5.1 - Proposta de produto final	70

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Divisões obrigatórias e as suas dimensões mínimas (m ²) em função da tipologia de fogo. [(Decreto-Lei n.º 38 382 de 7 de Agosto de 1951, [s.d.]])	24
Tabela 2 - Inflamabilidade contra incêndios pela norma EN 13501-1. [(European Standard EN 13501-1, 2013)]	25
Tabela 3 – Propriedades da glulam do tipo GL24h [(Hasslacher Norica Timber - From wood to wonders., [s.d.]])	63
Tabela 4 – Propriedades do alumínio da liga 6061-T4 no Solidworks	64
Tabela 5 - Propriedades do aço galvanizado no Solidworks.....	64
Tabela 6 - Propriedades do OSB 3 [(Solidworks); [(Smartply OSB medite smartply, [s.d.]]) ..	65
Tabela 7 - Número e massa de componentes que implicam esforços nas vigas da cobertura	66
Tabela 8 - Número e massa de componentes que implicam esforços nos montantes.....	67

1 Introdução

1.1 Contextualização

O setor da construção civil é responsável por uma parte muito significativa dos resíduos gerados em Portugal, situação comum à generalidade dos demais Estados membros da União Europeia em que se estima uma produção anual global de 100 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD). (Constitucional, 2011, p.1)

A demolição de edifícios em fim de vida, representa uma das maiores parcelas da geração de resíduos, e ocorre sobretudo em construções do tipo tradicional, numa fase em que os materiais constituintes da edificação deixaram de satisfazer determinados requisitos, e que podem inclusive colocar em risco a própria habitabilidade. Posto isto, e sendo que muitas das vezes a reciclagem ou reutilização desses materiais é pouco viável tendo em conta o preço a pagar por todos os processos envolvidos na reciclagem ou numa reutilização não direta, os mesmos acabam por ser depositados em aterros, deixando uma marca vincadamente negativa no que concerne ao impacto ambiental.

Responsáveis políticos, investigadores e universidades procuram dar resposta às metas de redução de desperdício e de emissões de CO₂ no contexto da construção civil. Neste sentido, surgem dois temas fundamentais e que serão assunto central ao longo desta dissertação: economia circular (EC) e modularização.

De forma breve, como referem Preston e Lehne (2017): “A ideia básica da EC é mudar de um sistema no qual os recursos são extraídos, transformados em produtos e por fim descartados num no qual os recursos são mantidos no seu valor mais alto possível” (p.4). Através de processos como a reutilização, reparação e reconstrução aplicados aos edifícios, é possível maximizar o valor e produtividade dos materiais, eliminando desperdícios graças à inserção desses mesmos materiais num ciclo fechado, a EC.

Tal como foi dito anteriormente, estes processos nem sempre são rentáveis. Torna-se, portanto, imprescindível que todo o planeamento e conceção da construção sejam pensados detalhadamente por forma a que a substituição ou reparação de determinada fração ou componente da habitação, seja tão mais simples e rápida quanto possível. E é precisamente neste sentido que surge o conceito de modularização.

Ao invés da construção tradicional caracterizada pela sua natureza monolítica e imparidade arquitetónica que a tornam pouco eficiente no sentido da EC, a ideologia da construção modular, utilizada no desenvolvimento de edifícios pré-fabricados, consegue dar resposta àquelas que são as principais máximas associadas ao conceito da EC. A montagem do edifício maioritariamente (ou totalmente) em chão de fábrica, e / ou a produção estandardizada dos elementos constituintes, permitem reduzir o tempo de construção e diminuir as viagens no transporte até ao local de destino, bem como facilitar a reutilização, reparação, substituição e reciclagem.

1.2 Objetivos gerais do trabalho

Com este trabalho, pretende-se desenvolver um pequeno edifício de construção modular cujo conceito assente em ideologias da economia circular, sendo por isso a escolha dos materiais constituintes um dos aspetos importantes a ter em consideração.

Ambiciona-se um processo de montagem simplificado, reduzindo ou até mesmo eliminando, a necessidade de mão de obra especializada bem como de transportes especiais e gruas, levando de igual forma em consideração processos de desmontagem que evitem a demolição. Mais ainda, deve ser considerado durante o processo de desenvolvimento do módulo a flexibilidade e adaptabilidade dos espaços e elementos por forma a satisfazer diferentes necessidades.

Por fim, o edifício será alvo de uma análise estrutural por simulação computacional, com vista a garantir a integridade do edifício quando sujeito a cargas externas.

1.3 Organização do documento

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos principais, sendo depois apresentados alguns anexos.

No primeiro capítulo é apresentada uma breve contextualização relativa ao tema desta dissertação, e são descritos, de forma geral, os objetivos da mesma.

No segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica e estado de arte inseridas no tema da economia circular e a sua relação com a construção modular de edifícios. São abordados os fundamentos da economia circular, e algumas formas de implementação desta, no desenvolvimento de construções modulares. Apresentam-se também fundamentos específicos da contextualização da construção modular bem como as suas vantagens e desvantagens, relativamente às construções ditas tradicionais. Por fim, são especificados os objetivos mais detalhados do projeto concebido, e identificados alguns exemplos de tipos de construções modulares.

No terceiro capítulo, é iniciado o desenvolvimento do produto, levando em consideração algumas normas legislativas, bem como os requisitos dos clientes através de ferramentas associadas ao desenvolvimento de produtos. São apresentados os componentes que compõem o módulo criado, e alguns detalhes do seu funcionamento.

No quarto capítulo, é realizado o projeto de sistemas, no qual se definem os modos e elementos de ligação entre os componentes previamente apresentados no capítulo anterior, sendo demonstradas as sequências de montagem do módulo até à sua finalização. Posteriormente, executam-se através de ferramentas computacionais, simulações estruturais por forma a validar o conceito concebido, tendo em conta os materiais constituintes dos componentes. No final, são analisados os resultados obtidos.

No quinto capítulo é apresentada a proposta final do módulo. No sexto e último capítulo, são retiradas conclusões acerca do produto. São ainda propostas algumas diretrizes para futuros trabalhos.

2 Revisão Bibliográfica e Estado de Arte

2.1 Os fundamentos da economia circular

O tema do aquecimento global está cada vez mais incutido no dia-a-dia de cada um de nós. Este problema de escala mundial, tem vindo a afetar largamente a qualidade de vida dos seres vivos em geral, e os especialistas acreditam que, se não forem implementadas medidas substanciais com vista à redução da emissão de poluentes, entre outras, a habitabilidade no planeta Terra esteja severamente comprometida num futuro cada vez menos distante.

Mas este assunto não é propriamente novo. Embora tenhamos sido mais alertados e instruídos em relação ao aquecimento global após o início do presente século, é importante ter em mente que o atual estado de degradação do meio ambiente, é resultado de más práticas que se têm verificado à centenas de anos. O início da revolução industrial no século XIX e o colossal aumento da população mundial que a partir daí se fez notar, marcaram também o início daquilo que viriam a ser anos de grande produção em massa, necessitando para tal de uma enorme exploração de recursos e processamento de materiais, o que se repercutiu num aumento gradual da taxa de emissões de CO₂ à medida que os continentes foram efetivando práticas industriais mais apoiadas nas máquinas e menos no trabalho humano (Figura 2.1) (Ahmed *et al.*, 2022; Stephenson *et al.*, 2013).

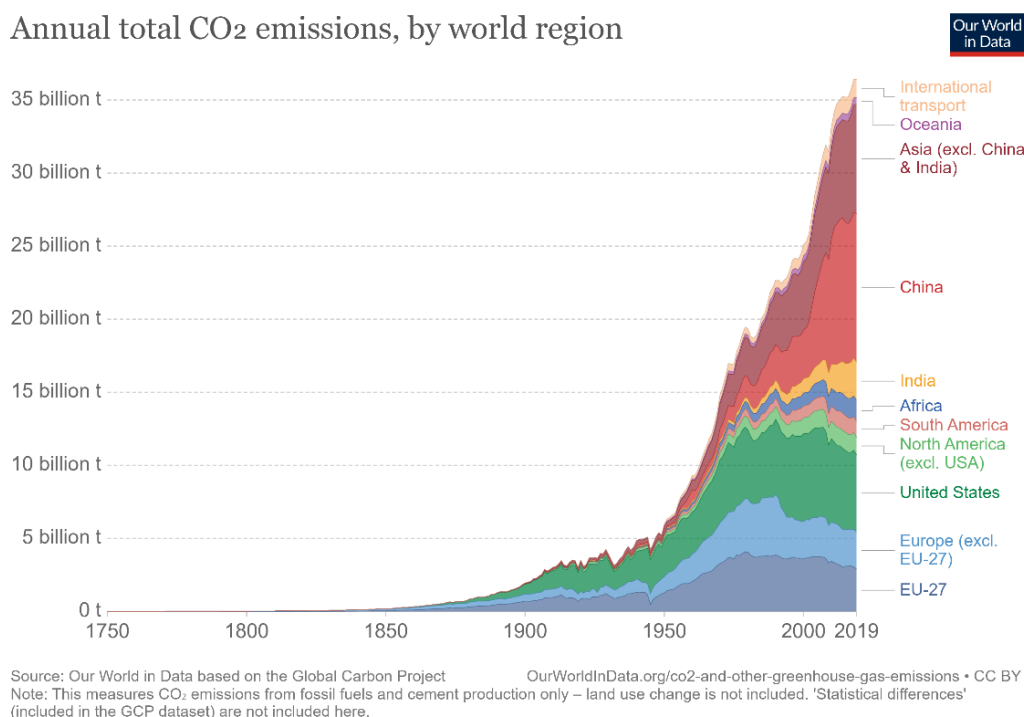


Figura 2.1 - Taxa anual de emissões de CO₂, por região do Mundo, registada entre meados do séc. XVIII e até ao ano 2019.
[<https://ourworldindata.org/co2-emissions>]

Em 1987, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pela Organização das Nações Unidas (ONU), publica a primeira declaração universal com vista à preservação ambiental e desenvolvimento sustentável – o relatório Brundtland, intitulado “O nosso futuro comum” (World Commission on Environment and Development, 1987). No desenvolvimento deste relatório, foram tidas por base literaturas de sistemas ecológicos nas quais se abordavam conceitos com vista à redução da extração de recursos naturais e da geração de desperdício, e que mais tarde se iriam conciliar na definição de economia circular (Velenturf e Purnell, 2021,p.1).

Embora este tivesse sido um marco de elevada importância, que demonstrava a preocupação no exponencial ataque à biosfera, seguiram-se largos anos de espera até que os governos decretassem medidas de implementação da economia circular. Como se pode ver na Figura 2.2 o conceito de economia circular foi muito pouco investigado até ao ano de 2015. Após essa data, verificou-se um crescente interesse no assunto, tendo este sido alvo de bastante estudo e melhoramento da sua definição.

Atualmente, na Europa, está a desenvolver-se a ideia de economia circular devido à riqueza da literatura publicada sob a forma de planos de trabalho e iniciativas quer governamentais, quer por parte de organizações não governamentais (Kalmykova, Sadagopan e Rosado, 2018). Nestas literaturas podem encontrar-se formulações de estratégias e conceitos, de onde se destacam as seguintes definições que melhor caracterizam a economia circular:

1. “termo genérico para as atividades de redução, reutilização e reciclagem na produção, circulação e consumo” (Government of People’s Republic of China, 2008);
2. mudança de uma produção linear para uma otimização de *stock*, abrindo portas à criação de “um ciclo de reutilização e recriação de bens, um ciclo de atividades de extensão da vida útil dos produtos e um ciclo de reciclagem para moléculas (recursos secundários)” (Stahel, 2013);
3. “economia industrial que é intencionalmente reconstituente; visa confiar em energias renováveis; (...) elimina o uso de químicos tóxicos; e erradica o desperdício através de *design* cuidadoso” (Ellen Macarthur Foundation, 2013);
4. “estratégia de desenvolvimento sustentável que visa melhorar a eficiência dos materiais e o uso da energia” (Akanbi *et al.*, 2018);
5. “alternativa à tradicional economia linear (produzir, utilizar, descartar), para uma onde se mantêm os recursos em uso pelo maior tempo possível, extraindo deles o máximo valor (...), e em seguida, recuperamos e regeneramos produtos e materiais no fim da sua vida útil” (Waste and Resources Action Programme (WRAP), 2019).

Tendo por base toda a bibliografia consultada, os verbos que frequentemente aparecem associados à definição de economia circular são: reduzir, reutilizar e reciclar (3Rs). Não obstante, adaptar e projetar, são também largamente referidos. Projetar, para além dos restantes, é de grande importância quando falamos na conceção de peças, estruturas, entre outras, visto que é na fase da projeção/*design* que deve ser pensada a forma mais eficiente de construção e ligação entre elementos por forma a facilitar uma futura desmontagem favorecendo o aproveitamento de materiais provenientes da desconstrução.

Posto isto, a economia circular pode entender-se como um conjunto de ideias e medidas, que pretendem reduzir o consumo de recursos, numa perspetiva de repor a “capacidade do planeta em regenerar recursos naturais e absorver resíduos” (Velenturf e Purnell, 2021, p.12). Em 2020 verificou-se que a adoção de práticas relativas à economia circular era de apenas 8.6% no mundo. No entanto, caso se consiga duplicar esse valor, veremos uma redução das emissões globais em 39% e da pegada material em 28% até 2032 (Circle Economy, 2021).

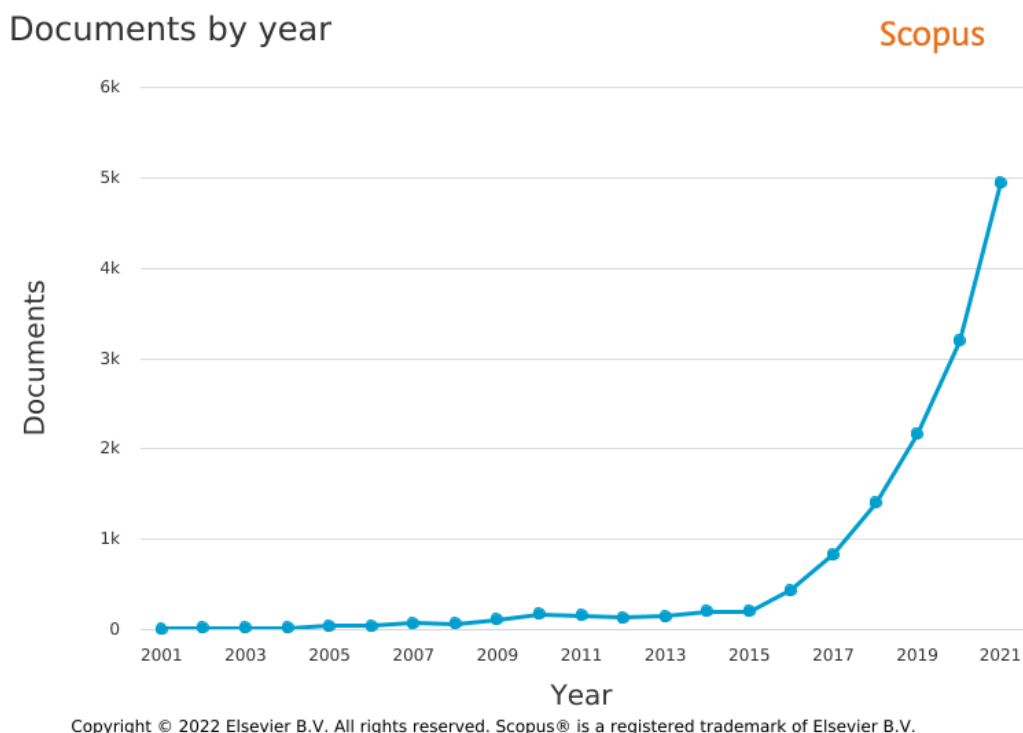


Figura 2.2 - Número de artigos, publicados entre 2001 e 2021, cujo tema aborda o conceito de economia circular.
[Scopus]

2.2 A economia circular e a construção habitacional e modular

Há cada vez mais provas que mostram que as economias circulares são fundamentais para termos uma hipótese de proporcionar melhor qualidade de vida a todos os cidadãos do mundo.

A EC assume um papel extremamente importante na tentativa de regredir o estado da Terra, até ao ponto onde seja possível manter a estabilidade de todo o sistema, e eventualmente regredir para um limiar de maior segurança onde se consiga diminuir a frequência dos fenómenos (cheias, secas, incêndios, etc.) que cada vez mais verificamos, resultado do aquecimento global.

Um dos aspetos principais no qual a EC pretende mudar radicalmente o paradigma atual, é o desperdício. Num mundo ideal, não existiriam desperdícios. Não haveria nada para depositar em aterros ou outro tipo de lixeiras.

O nosso desperdício é criado na projeção. Quando os produtos são projetados para conceção, raramente são pensados e integrados os meios para recuperar a matéria-prima. Se transformarmos esse sistema linear de extrair-construir-usar-descartar num sistema circular (Figura 2.3), desenhando produtos de forma a recuperar toda a matéria-prima, o nosso uso de recursos pode ser infinito.

São inúmeras as fontes de criação de desperdício. Uma das maiores, é a da construção e demolição de edifícios, que chega a atingir 30-40% de toda a geração de resíduos sólidos mundial, devido à crescente urbanização e reconstrução de cidades (Islam *et al.*, 2019).

As atividades relativas à indústria da construção, têm grande impacto nos aspetos sociais, ambientais e económicos da sustentabilidade (Gencel *et al.*, 2012). Desta forma, e para assegurar a eficiência da EC, é importante que uma percentagem significativa dos materiais que constituem os edifícios seja recuperável para efeitos de reutilização e reciclagem dos mesmos (Pan *et al.*, 2015; Tukker, 2015).

No entanto, este não é o único aspeto a ter em conta. Muitas outras estratégias podem ser utilizadas na perspetiva de incorporar a EC na indústria da construção, como veremos nos tópicos que se seguem.

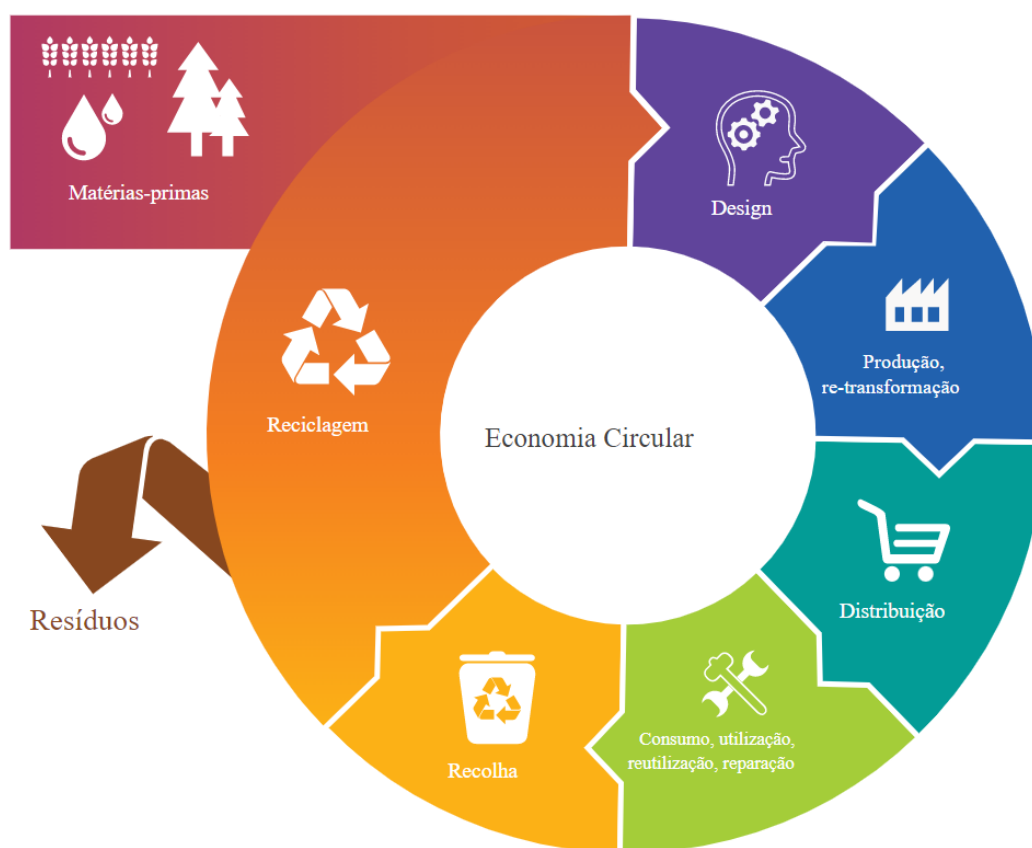


Figura 2.3 - Fases da Economia Circular.

[<https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios>]

2.2.1 Reduzir o desperdício e usar uma cadeia de produção lean

Numa indústria que segue uma economia linear de extrair-produzir-usar-descartar, a maioria do desperdício é gerado na fase de descarte, onde após o fim de vida do produto, este passa a ser considerado lixo (Minunno *et al.*, 2018). Porém, uma parte considerável de matérias-primas é desperdiçada mesmo em fases iniciais do produto, devido a materiais danificados ou defeituosos, atrasos, inventário desnecessário, danos de transporte, ou produção excessiva, que por vezes leva a que o produto não chegue ao mercado de vendas por estar desatualizado (Fercoq, Lamouri e Carbone, 2016).

Posto isto, as empresas procuram cada vez mais melhorar a eficiência da sua cadeia de produção, com vista a prevenir custos desnecessários e aumentar a rentabilidade. Para tal, integram técnicas como a produção *lean*, que recorre a ferramentas de gestão de produção tais como a *just-in-time* (JIT) e *design* para montagem, que ao longo do tempo provaram ter enorme eficácia na redução dos vários desperdícios durante a produção (Scherrer-Rathje, Boyle e Deflorin, 2009).

Na indústria da construção, estas medidas têm grande aplicabilidade em edifícios pré-fabricados dada a standardização dos mesmos, o que permite criar uma sequência padronizada e em linha de montagem das várias fases de conceção dos mesmos. Por outro lado, o mesmo não se pode utilizar em construções tradicionais, dada a variabilidade de *design* e materiais inerente a esse tipo de edifícios.

Para além destas, uma outra ferramenta que tem gerado um interesse exponencial no processo de *design* e construção dos projetos de construção verde em conjugação com princípios sustentáveis: a *Building Information Modelling* (BIM) (Jalaei e Jade, 2015). A ferramenta BIM, acessível sob a forma de software de desenho e disponível em empresas como a *Autodesk*, permitem, entre outras, a “visualização de edifícios em 3D, análise de desempenho de edifícios, estimativa de custos, gerenciamento de instalações, o que revela que a inovação genuína dentro da indústria da construção deve ser compatível com BIM” (Akanbi *et al.*, 2018). Para assegurar uma integração eficiente da economia circular na indústria da construção, é importante conhecer a qualidade e as condições dos materiais presentes no edifício. Por essa razão, o BIM tem especial relevância, uma vez que tem a capacidade de armazenar informação acerca do estado do edifício ao longo da sua vida útil (Eadie *et al.*, 2013).

2.2.2 *Design* com vista à adaptabilidade durante a fase operacional (redução através da extensão da vida útil)

São várias as formas pelas quais é possível prevenir o desperdício, tais como promover a reutilização de produtos, desenvolver produtos com menos material por cada unidade, ou estender a vida útil dos produtos (cit. por Oguchi, Tasaki e Moriguchi - *Decomposition Analysis of Waste Generation From Stocks in a Dynamic System*, p.2). Outro fator que permite reduzir o consumo de materiais, para além dos referidos, é o *design* contra o consumo excessivo (Oguchi, Tasaki e Moriguchi, 2010).

No desenvolvimento de edifícios, o planeamento preciso e aprimorado, é capaz de garantir o prolongamento da sua vida útil através da criação de espaços flexíveis e elementos adaptáveis (Allwood, 2014).

Ao longo deste trabalho, os conceitos de flexibilidade e adaptabilidade são mencionados várias vezes. Assim sendo, é importante compreender a sua distinção. Na

arquitetura, a flexibilidade de um edifício pode ser vista como a capacidade que este tem em possibilitar a criação de diferentes arranjos físicos ao longo da sua vida útil, ou seja, a possibilidade de aumentar, diminuir, ou simplesmente reordenar, a área total útil do edifício em diferentes direções no espaço tridimensional. Por outro lado, a adaptabilidade está relacionada com o espaço interior do edifício, e corresponde à facilidade com que este pode ser reconfigurado ao longo do tempo pelo utilizador (Scuderi, 2019).

Quanto à adaptabilidade na indústria da construção, esta é alcançável sobretudo por meio do *design* na modularidade e standardização (Adams *et al.*, 2017).

Geralmente, em termos de custo económico e ambiental (taxa de emissões de CO₂) aquando da desconstrução, os componentes de aço ou alumínio são preferenciais em relação aos componentes de betão, por apresentarem custos inferiores (Minunno *et al.*, 2018). Esta, é mais uma das razões pelas quais as construções *off-site*, tais como habitações modulares, desempenham um papel fundamental na adaptabilidade dos edifícios em fases de reutilização ou reciclagem (Sanchez e Haas, 2018).

2.2.3 *Design* com vista à desmontagem de estruturas, em componentes para reutilização

Em qualquer construção, existem componentes constituintes da estrutura do edifício, cuja vida útil vai para além dos restantes, havendo a possibilidade da reutilização direta em novas construções, aquando do fim de vida do edifício em si. Assim sendo, torna-se crucial que na etapa de projeção / *design* do módulo habitacional (ou outro), sejam desenvolvidas formas de desmontagem, evitando sempre que possível a demolição, facilitando a reintrodução dos componentes em bom estado na cadeia de abastecimento da produção.

Crowther (2000) identificou várias estratégias de *design* passíveis de contribuir na reutilização dos elementos desmontáveis do edifício, dentro das quais se destacam as seguintes:

- Adotar tecnologias de montagem compatíveis com a construção padrão, evitando a necessidade de trabalho e equipamento especializado, simplificando dessa forma a reutilização;
- Utilizar conexões mecânicas ao invés das químicas, favorecendo a desmontagem sem o uso de força e reduzindo a contaminação e danificação dos componentes. Devem ainda ser utilizados o menor número possível de diferentes tipos de conexões, por forma a agilizar o processo de desmontagem;
- Produzir componentes adequados às várias fases do processo de construção: montagem, transporte, desmontagem, reprocessamento e remontagem;
- Tornar mais acessíveis as peças com maior grau de reutilização, facilitando esse mesmo processo.

2.2.4 *Design* para a reciclagem dos materiais de construção

De acordo com a sequência dos 3Rs (reduzir, reutilizar, reciclar) e com aquilo que se pode depreender através do que tem vindo a ser descrito ao longo desta parte teórica, a redução deve ser a primeira abordagem a ser tomada, seguindo-se a reutilização, e em última instância a reciclagem que evidentemente é sempre preferível à deposição em

aterro. Desta forma, os componentes da construção que não possam ser reutilizados ou reprocessados e adaptados, devem ser considerados na fase de *design* com o intuito de serem futuramente reciclados.

No setor da construção, o betão e o aço são dos materiais mais utilizados, e ambos podem ser sujeitos ao processo de reciclagem (Tam, 2008; Yellishetty *et al.*, 2011). No entanto, enquanto que o aço, entre uma larga variedade de outros metais, tem a capacidade de manter as características mecânicas mesmo após inúmeros ciclos de reciclagem (Haas *et al.*, 2015), o mesmo não se verifica no caso do betão. Durante o processo de reciclagem, o betão decresce a sua qualidade, passando de betão a brita (Park e Chertow, 2014).

Tendo em conta que nas estruturas pré-fabricadas o eventual uso de betão está geralmente limitado à plataforma sobre a qual a construção ficará colocada, e que essa é efetuada em ambiente fabril, o desperdício é bastante reduzido relativamente às construções *onsite* uma vez que num ambiente controlado, existe maior exatidão em relação às porções necessárias.

E ainda, no que diz respeito às taxas de emissões associadas ao transporte para a reciclagem, e dado que as estruturas de aço ou madeira têm bastante menos peso e volume comparativamente ao betão, estas devem ser preferidas ao uso de betão, pelo que as construções modulares pré-fabricadas revelam uma vez mais ser a escolha indicada.

2.3 O estado da arte da construção modular

2.3.1 Primeiras construções modulares

Ao longo da História, a construção de edifícios teve várias alterações ao nível da sua composição, dos materiais utilizados, e até mesmo das dimensões em si. Todas essas variações que se puderam observar no decorrer dos séculos, eram naturalmente levadas a cabo numa tentativa de satisfazer as necessidades da população dentro dos conhecimentos e tecnologias às quais esta tinha acesso.

As primeiras edificações com uso de pedras e blocos ligados por cimento foram desenvolvidas pelos antigos romanos, que por volta de 500 a.C. criaram o *opus caementicium*, também conhecido como cimento romano, de grande resistência à erosão e cargas (Jackson e Marra, 2006).

Mais de 2300 anos depois, no final do século XIX, surgia a primeira construção modular. Construída por H. John Manning em 1830, a pequena casa que mais tarde (1833) viria a ficar conhecida como *Manning Portable Colonial Cottage for Emigrants* (Figura 2.4) devido à sua utilidade em rapidamente expandir as colónias britânicas na Nova Zelândia e África do Sul. Era composta por uma engenhosa estrutura pré-fabricada de barrotes de madeira, treliças triangulares e placas de madeira para cobertura das paredes e chão. O conjunto foi desenhado por forma a ser facilmente transportado, e segundo Herbert (1978), “o sistema de Manning prefigurou os conceitos essenciais da pré-fabricação, e os conceitos de coordenação dimensional e standardização”.

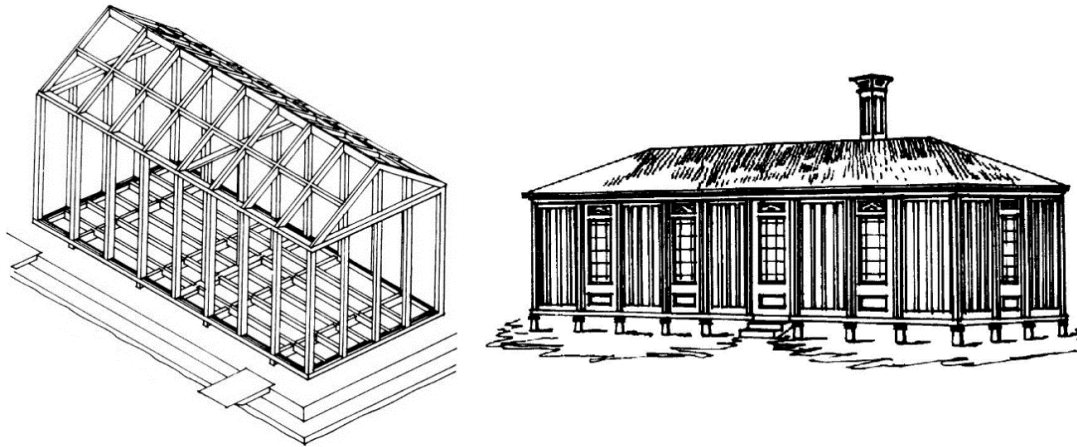


Figura 2.4 - Manning Portable Colonial Cottage for Emigrants.
[<https://quonset-hut.blogspot.com/2012/12/the-manning-portable-colonial-cottage.html>]

Ainda no final do séc. XIX, deu-se o desenvolvimento e integração do aço na arquitetura e construções, o que veio a demonstrar ser uma soberba evolução para o meio não só das habitações particulares, como até mesmo para o surgimento do primeiro arranha-céus composto sobretudo por aço, que ocorreu em 1885 na cidade de Chicago (cit. por Minunno *et al.* - *Strategies for Applying the Circular Economy to Prefabricated Buildings*, pg.2).

Desde então, tem-se verificado um crescimento na utilização do aço na indústria da construção, levando a que este seja cada vez mais uma escolha para o desenvolvimento de construções leves, dando lugar à investigação e criação de edifícios pré-fabricados móveis construídos com painéis, ou módulos. É importante referir, que o sucesso numa construção desse género, não depende somente da qualidade dos materiais em si, mas também de aspetos como a ligação entre os componentes, entre muitos outros.

Nesse sentido, no início do séc. XX vários arquitetos donde se destacam os trabalhos de Le Corbusier e Frenartu, elaboraram estudos da aplicação de dimensões normalizadas para a padronização de elementos de construção moderna. Criaram o termo “módulo base”, para um sistema que deveria ser tridimensional facilitando a visualização e manipulação (Castelo, 2008), apoiado nas vantagens de elementos estandardizados que podem ser compreendidos pelos projetistas e empreiteiros.

Um exemplo concreto das vantagens da estandardização, é o dos postos de trabalho de computadores fixos (*desktop*). São modulares e têm interfaces estandardizadas. No caso por exemplo, de o monitor ou rato terem de ser substituídos, isso pode ser feito sem que os restantes componentes sofram qualquer alteração. Os módulos do computador (CPU, RAM, disco rígido, etc.), podem também ser alterados, mantendo os periféricos anteriores. De igual forma, quando o computador chegar ao fim de vida, os periféricos (rato, teclado, monitor, etc.) podem ser utilizados num novo computador (Mignacca, Locatelli e Velenturf, 2020).

O uso de componentes estandardizados ou padronizados, suporta a flexibilidade e redução de tempo e custos uma vez que permite a substituição de componentes, uma economia de escala e um tempo de *design* reduzido. Mesmo no caso em que determinado produto necessite de customização, os processos de pré-fabricação e pré-montagem padronizados asseguram uma melhoria na fase de projeto.

2.3.2 O módulo

Relativamente à indústria da construção, é de notar que a pré-fabricação consiste num processo de fabrico e pré-montagem em geral numa instalação especializada. O processo de fabrico em si pode ser realizado num ambiente de fábrica (*off-site*) ou a céu aberto no próprio local (*on-site*) onde irá ficar a habitação. A fabricação fora do local, corresponde à junção dos processos de pré-fabrico e pré-montagem (Gonçalves, 2020).

Vários autores (Gibb e Isack, 2003; Gosling *et al.*, 2016; Jonsson e Rudberg, 2014) categorizaram as construções pré-fabricadas em quatro níveis de acordo com o grau de standardização e produção fora do local:

- (1) **Fabricação de componentes e pré-montagem:** Matéria bruta e componentes, como tijolo e argamassa, usados para construções no local. Este sistema apresenta elevado grau de personalização, embora tenha o menor nível de produção fora local.
- (2) **Pré-montagem não volumétrica:** Elementos de montagem pré-fabricados que não perfazem um espaço utilizável, uma vez que não o encerram. São exemplo os painéis das paredes ou a armações estruturais.
- (3) **Pré-montagem volumétrica:** Objetos volumétricos produzidos fora do local para posteriormente serem montados no local da obra, numa estrutura independente. Sistemas sanitários e cabines de duche são alguns exemplos.
- (4) **Construção modular:** Unidades volumétricas pré-montadas, que sozinhas ou conectadas entre si, formam um edifício. É o sistema com maior grau de produção fora do local e de standardização.

A standardização e produção fora do local, podem relacionar-se com o conceito de modularidade. “Modularização” e “modularidade” são muitas vezes utilizados indistintamente, apesar de terem significados distintos. Portanto, é adequado esclarecer estes dois conceitos, bem como a sua relação com o conceito de standardização.

A modularização, é o processo de conversão do projeto e construção de uma planta monolítica (estilo tradicional, que embora possa recorrer ao uso de elementos pré-fabricados, é construída no local), na produção de módulos em ambiente de fábrica para transporte e instalação como conjuntos completos no local (Gen-IV International Forum, 2007).

Por outro lado, a modularidade é um termo genérico representativo da preferência na utilização de várias unidades standardizadas de pequenas dimensões, em detrimento do uso de menos unidades de maiores dimensões (Gen-IV International Forum, 2007).

A standardização pode ser vista em duas perspetivas distintas: o produto e a sua produção.

Henry Ford foi um dos pioneiros na adoção da standardização para produção em massa. O *Model T*, foi o primeiro automóvel a ser construído numa linha de montagem (cadeia de produção), com recurso a processos e tecnologias que permitiam a obtenção de uma grande quantidade de peças standardizadas, levando à diminuição dos custos e dos erros na produção, diminuindo assim o tempo por peça.

Por conseguinte, a standardização podia ser vista nessa época, como a “limitação à variedade no produto produzido de modo que as máquinas sejam capazes de definir

comprimentos, larguras e montagens. Isto remove os desperdícios associados às opções de variabilidade e à margem de erro em produtos finais.” (Smith, 2010).

Atualmente, com tecnologias disponíveis como o desenho assistido por computador (CAD) e máquinas de fabrico controladas digitalmente (CNC, e outras), a standardização deixou de ser limitadora na variedade de peças/produtos. Com linhas de produção flexíveis, é possível apresentar aos clientes alternativas customizadas de acordo com os seus requisitos (Gibb, 1999).

Assim, a standardização deverá estar presente sobretudo na interface entre componentes, permitindo a partilha entre diferentes produtos e garantindo a montagem em diferentes configurações através de ligações bidirecionais por exemplo, tornando os elementos multifuncionais (Martins, 2002).

O conceito de standardização relaciona-se com o de modularidade na medida em que, esta é alcançável por meio da standardização.

Em suma, se pretendermos o desenvolvimento de uma construção modular, ou seja, se procurarmos a modularização de uma construção sobretudo montada no local para algo construído numa fábrica e pronto a montar no local, deve recorrer-se a elementos e/ou processos de fabricação e montagem padronizados (como referido em 2.3.1) por forma a obter um produto final com a maior modularidade possível. “O grau de modularidade depende dos componentes usados, da sua interface, do carácter do seu acoplamento e da oportunidade em serem substituídos” (cit. por Peltokorpi *et al.* - Categorizing modularization strategies to achieve various objectives of building investments, p.33).

2.3.3 Construção modular

A construção modular, cuja definição se encontra explícita em 2.3.2, pode, segundo o Instituto de Construção Modular, ser dessa forma referida quando 60-90% da construção acontece numa fábrica sob ambiente controlado, seguida do transporte das unidades volumétricas pré-montadas até ao local de implantação. O seu processo construtivo leva a cabo as noções de coordenação dimensional modular aplicando metodologias padronizadas e organizadas, com o intuito de criar uma dimensão padrão que “racionalize a conceção e a construção de edifícios, o que permite elevar o grau de industrialização da construção, mantendo, no entanto, a liberdade de conceção arquitetónica dentro de valores aceitáveis” (Castelo, 2008).

No contexto atual, existem três fatores que levaram ao aumento significativo da construção modular em relação aos métodos de construção tradicionais, a nível mundial: o elevado custo de terreno em determinados locais, o aumento do custo da mão de obra, e as condições climáticas desfavoráveis. Porém, há limitações associadas à modularização, tais como: baixa sofisticação das construções modulares em relação às tradicionais, os padrões atuais de conceção/construção e a falta de especialização em construção modular. (Zolodova, Fenner e Kibert, 2017)

Evidentemente, e tal como quase tudo aquilo que nos rodeia, este tipo de edificações apresenta vantagens, bem como desvantagens.

Vejamos então quais as principais vantagens da construção modular, de acordo com vários autores (Dodge Data & Analytics, 2020; Schoenborn *et al.*, 2012; *What Is Modular Construction?* | *Modular Building Institute*, [s.d.]; Zolodova, Fenner e Kibert, 2017):

- **Redução do desperdício de material:** A construção em fábrica permite a reciclagem, e beneficia a preservação dos materiais e monitorização de inventário, em ambiente controlado. Além disso, os módulos podem ser recolocados ou adaptados para uma nova utilização, reduzindo o consumo de energia e matéria-prima que seriam necessário à construção de uma nova unidade.
- **Elevada qualidade construtiva:** A inspeção e testagem fazem parte do processo de construção numa linha de produção em fábrica, garantindo níveis elevados de qualidade construtiva. Por outro lado, o facto de serem utilizados materiais secos armazenados em ambiente controlado, elimina a presença de humidade nos materiais mais propícios à sua retenção.
- **Maior segurança de trabalho:** O risco de acidentes dos trabalhadores é bastante inferior comparativamente às construções tradicionais, uma vez que as operações em altura (andaimes) são dispensáveis, as tarefas destinadas a cada trabalhador são realizadas em zona individual e que o número de operações *on-site* é reduzido.
- **Redução no tempo total de construção:** A construção do módulo em fábrica, e a preparação do terreno para colocação do mesmo são independentes, o que permite uma redução de 30% a 50% no tempo entre o pedido do cliente e a finalização da obra graças à sua execução em paralelo, e à diminuição do risco de coordenação ineficiente nas operações *on-site*. Ademais, tendo em conta que grande parte da conceção é efetuada em espaço fechado, os atrasos relacionados com as condições climáticas adversas são impedidos. Na Figura 2.5 apresenta-se um comparativo entre o tempo total despendido na construção de uma habitação modular e uma habitação tradicional, desde a fase de projeto até à fase final pronta a habitar.
- **Redução no custo total da construção:** O custo de projeto é significativamente mais baixo em relação a uma construção tradicional pois este é realizado pelo fabricante do(s) módulo(s). A construção ocorre tipicamente em linha de montagem, portanto numa economia de escala, onde os projetos são muitas vezes reproduzidos com as mesmas características, evitando o preço acrescido associado à customização. Por último, visto que a construção é realizada sobretudo num único espaço e só depois enviada para o local, o cliente poupa o habitual gasto em deslocações de empreiteiros, e das máquinas de construção e transporte de material, que embora continuem a ser necessárias para preparar o terreno, são em muito menor número.

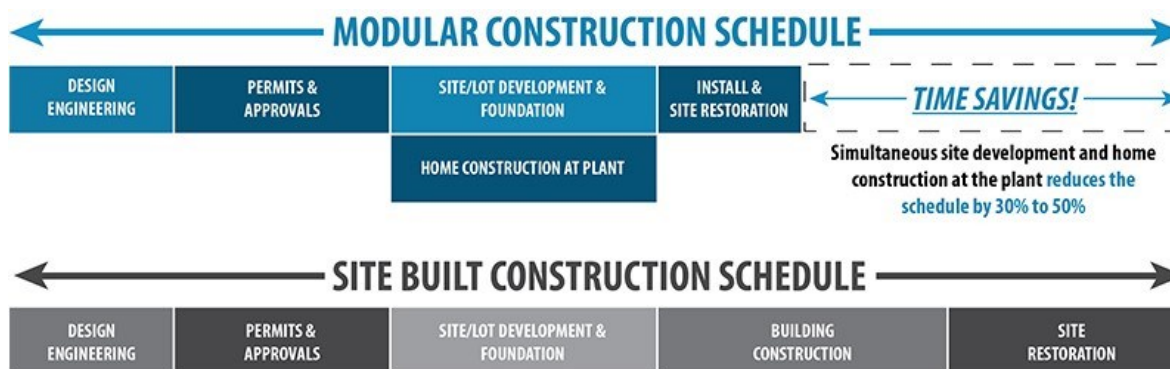


Figura 2.5 -Tempo total de construção modular vs. tradicional.
[<https://douglascutlerarchitects.com/>]

Como foi referido, a construção modular apresenta também algumas desvantagens reconhecidas por alguns autores (Costa, 2013; Schoenborn *et al.*, 2012; Zolodova, Fenner e Kibert, 2017), são elas:

- **Legislação e requisitos insuficientes:** A falta de informação regulamentar e legislação relativa à construção modular, é um dos principais obstáculos à sua proliferação. As propriedades não combustíveis do edifício, são um exemplo de um potencial problema estrutural que deve ser tomado em conta na fase inicial de projeto.
- **Escassez de especialização:** A indústria da construção modular, carece de trabalhadores especializados nas várias áreas a esta ligadas: projeto, construção e instalação.
- **Limitações de fabrico:** As dimensões e peso são uma das principais limitações dos módulos. Estas podem levar à necessidade de equipamento especial para o transporte até ao local. Outro fator limitador, é a capacidade da grua que irá colocar o módulo no terreno.
- **Limitações a posteriores alterações:** Após o período de projeto, é difícil fazer qualquer alteração ao mesmo. De igual forma, eventuais modificações durante a instalação do módulo no local são complexas.

A evolução da indústria da construção modular levou ao desenvolvimento de dois tipos distintos de módulo, por forma a satisfazer diferentes propósitos. Estes tipos são: construção modular permanente (CMP) e edifício recolocável (ER).

2.3.3.1 Construção Modular Permanente (CMP)

A Construção Modular Permanente (CMP) é a que mais se assemelha à construção tradicional. Os módulos são fixados a uma fundação permanente previamente construída, podendo funcionar como edifício individual ou integrando projetos de construção no local.

A sua fabricação e instalação pretende ter durabilidade igual ou superior à de uma construção tradicional, como tal, são tipicamente construídos com materiais como a

madeira, o aço e o cimento. Podem ser entregues prontos a habitar incluindo os sistemas mecânicos, elétricos e de canalização, bem como acabamentos, acessórios e eletrodomésticos.

Geralmente, existe total liberdade por parte do cliente na customização do módulo para que vá de encontro às suas preferências e expectativas, desde o aspeto interior e exterior, até à eventual construção de entradas, escadarias, elevadores, entre outras.

Para além de habitações particulares, existem outros exemplos de construção modular permanente, tais como: instalações de saúde, escolas, hotéis, restaurantes, escritórios e comércio. (Dodge Data & Analytics, 2020; *Relocatable Buildings v.s. Permanent Modular Construction* | *Modular Building Institute*, [s.d.]; Schoenborn *et al.*, 2012; Zoloedova, Fenner e Kibert, 2017)



Figura 2.6 - Exemplo de Construção Modular Permanente.
[https://www.archdaily.com/388804/new-forest-house-pad-studio?ad_source=search&ad_medium=search_result_all]

2.3.3.2 Edifício Recolocável (ER)

Um Edifício Recolocável (ER), ao contrário da CMP, intenciona cumprir determinada função de forma temporária. É projetado para ser reutilizado e adaptado às necessidades de cada utilização por múltiplas vezes, sendo para tal transportado para os diferentes locais.

Por ser construído com o intuito de criar um espaço temporário, de rápida aquisição e capaz de servir a vários objetivos, este tipo de edifício é desenhado para que seja facilmente recolocável, apresente um baixo custo de reconfiguração e grande adaptabilidade. Ainda assim, a sua construção, composta usualmente de madeira para diminuir o peso do módulo tornando-o mais fácil de transportar e instalar, tem durabilidade para assegurar inúmeras reutilizações e transportes.

No que diz respeito à customização, o ER apresenta claramente menos opções de arquitetura e *design*. Isto deve-se ao facto de ser uma construção com prazos de entrega substancialmente mais curtos relativamente à CMP, sendo a customização contraproducente para tal.

Algumas das suas utilizações mais comuns são: habitações temporárias, escolas, clínicas médicas, escritórios em locais de construção e salas de exposições. (Dodge Data & Analytics, 2020; *Relocatable Buildings v.s. Permanent Modular Construction* | *Modular Building Institute*, [s.d.]; Schoenborn *et al.*, 2012; Zoloedova, Fenner e Kibert, 2017)



Figura 2.7 - Exemplo de edifícios recolocáveis.

À esquerda: [<https://www.abs10.com/whats-average-size-commercial-modular-buildings/>]

À direita:

[<https://www.mobilemodular.com/Content/Resources/Images/ProductDetail/2010032909182990511242.jpg>]

2.3.4 Fundações

As construções anteriormente referidas, CMP e ER, requerem uma estrutura de base denominada de fundação, sobre a qual sejam colocadas, e têm a função de conferir resistência a cargas fletoras verticais e laterais. Sobretudo na CMP, a estrutura da construção deve ser ligada de forma mecânica ou através de soldadura à fundação (Zoloedova, Fenner e Kibert, 2017).

Os tipos de fundação mais comuns em edifícios modulares são: estacas de betão; estacas helicoidais (tipo parafuso); e cave (*Foundation Types for Modular Construction - A Primer | Built Prefab*, [s.d.]). Qualquer uma destas soluções permitirá: reduzir as falhas estruturais; garantir o isolamento térmico e a ventilação natural da fundação evitando problemas como a humidade; criar um espaço de acomodação para tubos e cabos (*Ventilated foundations for prefabricated buildings - Geoplast*, [s.d.]).



Figura 2.8 – Cave.
[<https://cdn.inchcalculator.com/wp-content/uploads/2019/02/concrete-foundation.jpg>]



Figura 2.9 - Estacas Helicoidais.
[https://cdn.shopify.com/s/files/1/1887/6189/collections/Screw_Piles.jpg?v=1490856044]



Figura 2.10 - Estacas de betão armado.
[<https://dluxeinternacional.com/wp-content/uploads/2017/11/Pile-Concrete-types-of-pile-foundation.jpg>]

2.3.5 Objetivos específicos do trabalho

A oferta de mercado em edifícios de construção modular é atualmente bastante vasta, e a opção de escolha mais indicada para cada cliente, está diretamente relacionada com o tipo de sistema de construção segundo o qual determinada empresa encerra o espaço do edifício.

Tendo em conta os objetivos do trabalho apresentados na secção 1.2 na qual, entre outros, se afirma a intenção de desenvolver um conceito capaz de reduzir a necessidade de mão de obra especializada e transporte especial de cargas (camião, grua, etc.), é de elevada importância as seguintes considerações concetuais:

- Sistema de montagem simples;
- Reduzir, ao mínimo necessário, a quantidade de elementos diferentes;
- Desenvolver um conceito baseado em elementos de peso reduzido, passíveis de ser movidos por uma a duas pessoas;
- Edifício de apenas um andar, evitando assim a necessidade de grua.

Indo de encontro aos mecanismos de aplicação da economia circular na construção habitacional e modular, identificados nas secções 2.2.1 a 2.2.4, devem também ser levadas em consideração algumas abordagens que daí se destacam, são elas:

- Extensão da vida útil do edifício através da criação de espaços flexíveis e elementos adaptáveis (2.2.2);
- Desenvolvimento com vista à adaptabilidade por meio do *design* na modularidade e standardização (2.2.2);
- Escolha preferencial de materiais que permitam ligações entre componentes por meio de conexões mecânicas em detrimento das químicas (2.2.3), permitindo a reutilização, que é prioritária em relação à reciclagem (2.2.4).

Desta forma, conclui-se que a tipologia de construção mais adequada para este trabalho é a da pré-montagem não volumétrica, abordada na página 11, e da construção modular permanente (2.3.3.1).

A pré-montagem não volumétrica, também designada por alguns autores como sistema construtivo de elementos modulares, no qual os seus elementos estruturais e não estruturais são fabricados com dimensões padrão, permite uma ligação rápida e eficaz entre esses elementos. Este sistema tem um nível de pré-fabricação menor, tal como já tinha sido visto na exposição dos quatro níveis de construção pré-fabricada da página 11, no entanto, proporciona um maior grau de personalização (cit. Patinha, 2011) que se reflete numa maior flexibilidade e adaptabilidade.

2.3.6 Identificação de soluções construtivas modulares

De seguida são apresentadas algumas das soluções construtivas existentes atualmente no mercado que melhor se adequam aos objetivos referidos anteriormente.

2.3.6.1 Construção em aço leve – LSF (*Light Steel Framing*) – Blink.house

A empresa portuguesa Blink.house, especializada em construções em aço leve, vulgarmente conhecidas como LSF (*Light Steel Framing*), utiliza os métodos convencionais

associados a este sistema para a construção de edifícios. São utilizados perfis de aço leve galvanizado perfilado a frio, produzidos a partir de chapa de aço com espessura reduzida, como principal elemento estruturante. De acordo com a empresa, as principais vantagens deste método são: a segurança e robustez construtiva (garantem elevado desempenho anti-sísmico, e extrema resistência contra vento e outras adversidades), a rapidez de construção (comparativamente à construção convencional), a fiabilidade (60% de construção em meio fabril, permitindo melhor controlo garantido assim melhores acabamentos e evitando imperfeições) e a versatilidade (facilidade em realizar aumentos futuros, anexar garagem ou outros). (Blink.house, [s.d.])

Etapas de construção:

1. A primeira etapa é a da produção dos perfis, dimensionados particularmente consoante o projeto construtivo, e de todos os elementos complementares (parafusos, uniões, etc.). Na mesma fase, é preparada a base estrutural de implantação e ancoragem, composta pela preparação do terreno, seguida da impermeabilização, montagem de sistemas introduzidos na laje térrea (águas, esgotos, etc) e finalmente da betonagem da laje de ensoleiramento;
2. De seguida, é executada a montagem da estrutura em LSF das paredes exteriores, composta pelos montantes verticais e horizontais das paredes exteriores e pelos montantes diagonais e complementares (reforços de vãos, etc.), os quais são unidos por aparafusamento direto, ou com o uso de uniões;
3. Segue-se a montagem da estrutura e revestimento de teto caracterizada pela aplicação de placas OSB (*Oriented Strand Board*) aparafusadas à estrutura, e isolamento térmico e telas de impermeabilização;
4. Por último é efetuado o acabamento das paredes exteriores e interiores. Pelo exterior são colocadas placas OSB e isolamento térmico ETICS seguido de acabamentos. Pelo interior, as paredes são preenchidas com lã mineral para efeitos de isolamento térmico e sonoro e finalizadas com o aparafusamento de gesso cartonado e acabamento finais. (Blink.house, [s.d.])

Na cobertura a impermeabilização é realizada com o uso de tela PVC, isolamento em XPS, manta geotêxtil, e lajetas térmicas com isolamento XPS. (Blink.house, [s.d.])

2.3.6.2 Construção tipo Lego

2.3.6.2.1 Brikawood

Fundada em França, a empresa Brikawood (Brikawood, [s.d.]) desenvolveu um sistema patenteado, que afirma constituir um processo inovador de construção capaz de prescindir da necessidade de pregos, parafusos ou cola, cujo conceito assenta na ligação por encaixe de elementos de madeira (abeto de Douglas) sobrepostos, vendidos sob a forma de *kit*, que conferem a estabilidade dimensional e rigidez mecânica ao conjunto final, garantindo também a impermeabilização sem necessidade de revestimento. Graças à simplicidade do método de construção, a empresa acredita que o *kit* possa ser montado pelo próprio utilizador.

Embora a página web da empresa não demonstre todos os componentes estruturais que compõem a habitação, é possível verificar na sua página na plataforma Youtube

(Brikawood TV, [s.d.]) a montagem de um dos *kit's* (*Studio Laroquais*), onde se verifica que a fundação e todos os cantos de ligação entre paredes a 90°, são compostos por vigas de madeira aparafusadas entre si (refutando a afirmação da empresa da não necessidade de parafusos, embora o seu uso seja de facto muito reduzido). A cobertura, com inclinação dada por treliças, é finalizada com telha sanduíche (exterior) e placas de MDF (interior). Para conferir isolamento térmico e acústico, são inseridas aparas de madeira ou lã projetada por máquina de sopro.



Figura 2.11 - Sistema construtivo Brikawood.
[imagens adaptadas de <https://www.brikawood-ecologie.fr/>]

2.3.6.2.2 Gablok

A empresa Belga Gablok, criou um conceito modular inspirado nos blocos de construções tipo Lego, com características promissoras como: rapidez de montagem, excelente desempenho energético, leve, montagem autónoma (proprietário) e sistema adaptável. (Gablok, [s.d.])

O sistema construtivo (Figura 2.12) vendido sob a forma de *kit* é composto essencialmente por dez elementos diferentes (Figura 2.13 à Figura 2.22).

Composição do sistema construtivo Gablok, de acordo com a Figura 2.12:

1. Laje em betão;
2. Blocos de base do tipo *ytong*;
3. Isolamento em EPDM (etileno propileno dieno metileno);
4. Placa inferior (tábua em LVL-Q);
5. Bloco inferior com isolamento (OSB 3 aparafusado e EPS);
6. Barreira de isolamento anti chuva;
7. Ripas de madeira tratada;
8. Bloco genérico com isolamento, disponível em três formatos (OSB 3 aparafusado e EPS);
9. Lintel, disponível em dois formatos (OBS 4 e reforçado na horizontal com LVL, é utilizado para moldura das aberturas de portas e janelas). Em secções sem aberturas, o lintel é substituído por um bloco superior com isolamento;
10. Placa superior (tábua em LVL-Q, com relevos para encaixe nos blocos);
11. Placa com encaixes (permite a ligação entre as vigotas e a viga);

12. Barreira de vapor;
13. Barrote madeira (colocados verticalmente a cada 40 cm e aparafusados à parede, fazem a ligação de toda a parede e criam espaço para a passagem de instalações técnicas);
14. Vigota madeira;
15. Viga (reforçada por uma placa horizontal e duas verticais, em LVL);
16. Placa inferior;
17. Bloco inferior com isolamento;
18. Painel OSB;

Os blocos com isolamento (5,8 e 9) são encaixados verticalmente uns sobre os outros, sem a utilização de qualquer ligação mecânica (parafuso, prego, etc.) ou química (cola, etc.). Por outro lado, as placas inferiores (4), as ripas de madeira tratada (7), os barrotes de madeira (13) e os painéis OSB (18) requerem fixação por aparafusamento.

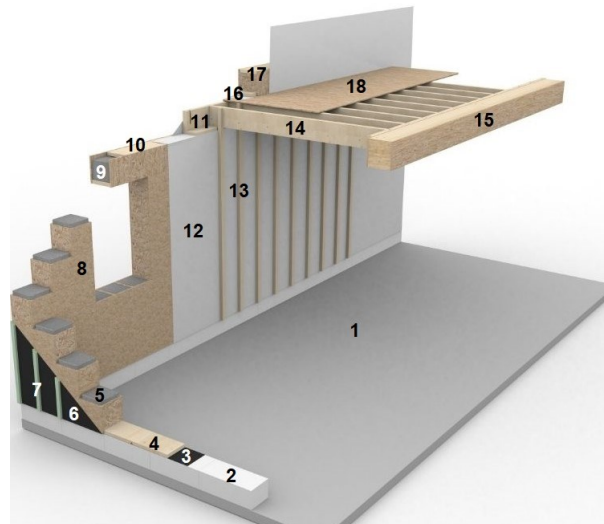


Figura 2.12 - Sistema construtivo Gablok.
[<https://gablok.be/en/elements/>]



Figura 2.13 - Placa inferior (4)



Figura 2.14 - Bloco inferior com isolamento (5)



Figura 2.15 - Bloco genérico com isolamento (8)



Figura 2.16 - Bloco superior (9)



Figura 2.17 - Lintel (9)

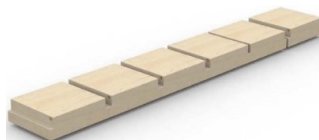


Figura 2.18 - Placa superior (10)



Figura 2.19 - Placa com encaixes (11)



Figura 2.20 - Barrote de madeira (13)



Figura 2.21 - Vigota de madeira (14)



Figura 2.22 - Viga (15)

2.3.6.3 Construção em SIP (Structural Insulated Panels)

2.3.6.3.1 Snap-N-Lock

A empresa norte americana Structall concebeu um sistema de encaixe entre painéis estruturais isolados, designados por SIP, que segundo a empresa, têm a capacidade de criar um edifício resistente, de construção simples, e eficiente em termos energéticos e de custo.

Os painéis (Figura 2.23) são compostos por espuma EPS, que confere o isolamento térmico e acústico, prensada e unida quimicamente entre duas folhas de aço, resistentes a forças de tração e compressão, e que possuem nas extremidades a forma de encaixe entre outros painéis (Figura 2.24). (Structall, [s.d.])

Na fundação em betão, são aparafusados perfis U metálicos ao longo do perímetro definida na planta da habitação. Os painéis são encaixados nos perfis e aparafusados a estes (pelo interior e exterior do edifício), repetindo-se o processo até que todas as paredes estejam completas. Nos cantos da habitação, são usados perfis L para unir os painéis perpendicularmente (pelo interior e exterior) através de parafusos. Os perfis U utilizados na base, são também usados para vedar os painéis no topo, sobre o qual serão aparafusados os painéis do telhado. Para telhados com inclinação (de uma ou duas águas), os painéis têm corte customizado conferindo a inclinação pretendida, sendo utilizada uma viga central em aço leve que garante não só a estabilidade, com uma superfície de apoio à ligação dos painéis.

Ao contrário dos painéis SIP encerrados com OSB, os painéis da Snap-N-Lock não necessitam de uma barreira adicional contra a humidade. Além disto, são consideravelmente mais leves do que os anteriores, facilitando o seu manuseamento. Ambos permitem a aplicação de materiais de acabamento interior e exteriormente, no entanto, no caso dos painéis em aço a sua utilização seja somente por questões estéticas. (Structall, [s.d.])

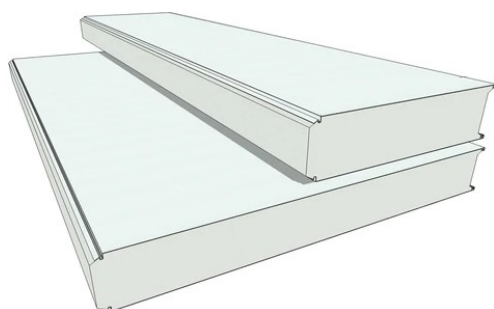


Figura 2.23 - Painéis SIP da empresa Structall (disponíveis em 2 tamanhos).
[adaptada de <https://structall.com/pages/snap-n-lock>]

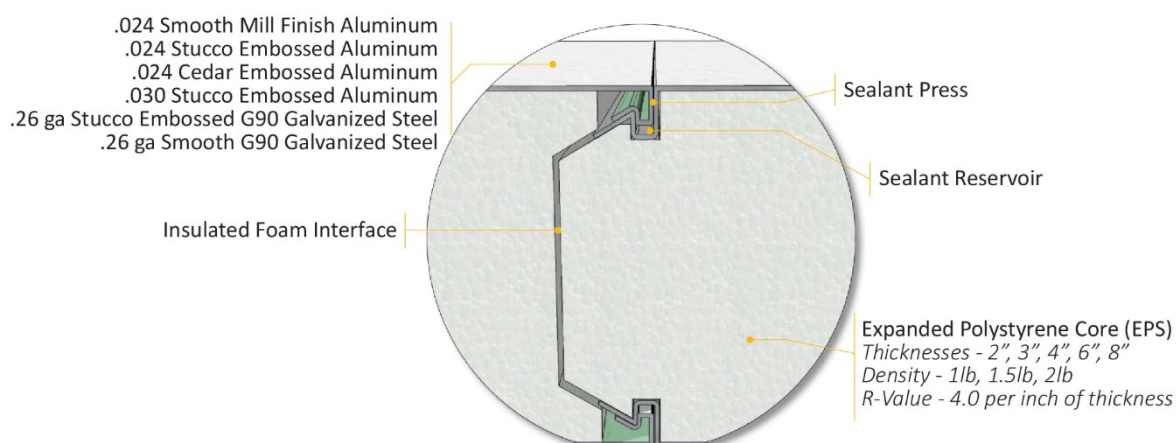


Figura 2.24 - Sistema de encaixe Snap-N-Lock para painéis SIP.
[<https://structall.com/pages/snap-n-lock>]

2.4 Ferramentas de apoio e desenvolvimento

Na realização deste trabalho, é utilizado o *software* CAD 3D (Computer-Aided Design) Solidworks em várias fases. Primeiramente, é utilizada a sua ferramenta de desenho tridimensional, criado a partir do desenho 2D dos elementos e componentes. Tendo-se criado todos os componentes necessários à montagem do módulo, a mesma foi testada e avaliada relativamente aos meios de ligação entre componentes, utilizando a ferramenta de "assemblagem" (do termo *assembly*). Em seguida, fez-se uso da sua capacidade de simulação estrutural através da ferramenta FEA (*Finite Element Analysis*) para avaliar o comportamento de componentes à carga gravitacional da massa do módulo. Por último, foi ainda utilizado o *software* Solidworks para a geração dos desenhos técnicos (2D) dos componentes desenvolvidos na fase de projeto.

3 Desenvolvimento do produto

3.1 Procedimento adotados

Tendo em conta que se pretende desenvolver um conceito de produto de um módulo habitacional, existem algumas exigências e procedimentos, a respeitar no decorrer do desenvolvimento deste projeto.

Primeiramente, é necessária uma análise às principais leis e normas aplicadas às habitações. O objetivo deste projeto não passa por criar espaços e plantas interiores com todos os sistemas MEP (*Mechanical, Electrical and Plumbing*) incluídos, mas sim por criar, uma estrutura capaz de resistir a cargas e também uma barreira entre o exterior (meio ambiente) e o interior do módulo, que albergue isolamento e espaço disponível para posterior instalação desses sistemas. Assim sendo, apenas serão consideradas as leis e normas aplicadas à estrutura e dimensionamento da habitação.

Posteriormente, terão lugar os procedimentos para o desenvolvimento concetual do produto, tais como a identificação das necessidades do mercado, as especificações do produto, a análise dos produtos da concorrência (*benchmark*) e da dificuldade de atuação sobre as especificações do produto, e, com estas efetuadas, pode então selecionar-se um conceito e definir as linhas de orientação gerais do projeto. As decisões tomadas nesta fase, irão conduzir e condicionar todo o trabalho de desenvolvimento para um determinado resultado final.

Em seguida é feito o projeto de concretização, onde são definidas as especificações gerais do conceito, e os sistemas inerentes à arquitetura do produto.

Uma vez alcançadas as especificações pretendidas, segue-se o projeto de detalhe. Nesta fase, são incluídas as definições completas das especificações geométricas e dimensionais dos elementos constituintes, e pormenores de ligações entre os mesmos. O produto final fica desta forma finalizado.

Por último, para validar o conceito, é realizada a análise estrutural através de simulações no software CAD SolidWorks.

3.2 Normas e condicionantes ao projeto

3.2.1 Dimensionamento geral dos edifícios

O Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU), publicou a 7 de Agosto de 1951 o Decreto-Lei n.º 38 382 (*Decreto-Lei n.º 38 382 de 7 de Agosto de 1951*, [s.d.]), que embora tenha sido alvo de algumas correções com o passar dos anos, continua a vigorar até à data e estabelece para Portugal várias regras ligadas à construção de edifícios habitacionais e comerciais.

No capítulo III do Decreto-Lei, encontra-se a legislação associada às disposições interiores das edificações e espaços livres, com artigos relevantes para este projeto.

No artigo 65.º, alínea 1, pode ler-se “A altura mínima, piso a piso, em edificações destinadas à habitação é de 2,70m, não podendo ser o pé-direito livre mínimo inferior a 2,40m”.

No artigo 66.º é apresentada uma tabela que indica o número de compartimentos mínimos da habitação e respetiva área mínima. Embora nesse artigo sejam consideradas tipologias de fogo entre T0 a >T6, neste projeto pretende-se criar um pequeno módulo, de tipologia T0, com flexibilidade de expansão até T4, eventualmente. Desta forma, na Tabela 1 é feita uma adaptação à tabela do artigo 66.º sendo apresentados apenas os dados até à tipologia máxima pretendida.

Tabela 1 - Divisões obrigatórias e as suas dimensões mínimas (m²) em função da tipologia de fogo. [(Decreto-Lei n.º 38 382 de 7 de Agosto de 1951, [s.d.])]

	Número de compartimentos e tipologia de fogo*				
	2 T0	3 T1	4 T2	5 T3	6 T4
Divisões	Áreas em metros quadrados				
Quarto de casal	-	10,5	10,5	10,5	10,5
Quarto duplo	-	-	9	9	9
Quarto duplo	-	-	-	9	9
Quarto duplo	-	-	-	-	-
Quarto simples	-	-	-	-	6,5
Quarto simples	-	-	-	-	-
Sala	10	10	12	12	12
Cozinha	6	6	6	6	6
Suplemento de área obrigatório	6	4	6	8	8
	Área total mínima do interior do módulo (m²)				
	22	30,5	43,5	54,5	61

*tipologia do fogo – o tipo de fogo é definido pelo número de quartos de dormir, e é identificado pelo símbolo Tx, onde x representa o número de quartos de dormir.

3.2.2 Norma de inflamabilidade contra incêndios

A escolha de materiais é parte essencial do projeto, e para além da vertente de economia circular na qual estes devem estar inseridos, é importante que os mesmos tenham boa prestação em caso de incêndio, ao não propiciar para a sua propagação.

A norma europeia EN 13501-1 (European Standard EN 13501-1, 2013) estabelece a resposta de todos os produtos e elementos dos edifícios sob determinadas condições de exposição ao fogo. De acordo com esta norma, a reação ao fogo é a resposta de um produto ao contribuir ao fogo através da sua própria decomposição (não é o mesmo que a resistência ao fogo).

Tabela 2 - Inflamabilidade contra incêndios pela norma EN 13501-1. [(European Standard EN 13501-1, 2013)]

	Classificação de acordo com a Norma Europeia EN 13501-1				
Definição	Produtos de construção			Pavimentos	
Materiais não combustíveis	A1			A1 _{fl} (flooring)	
	A2 - s1 d0	A2 - s1 d1	A2 - s1 d2	A2 _{fl} - s1	A2 _{fl} - s2
	A2 - s2 d0	A2 - s2 d1	A2 - s2 d2		
	A2 - s3 d0	A2 - s3 d1	A2 - s3 d2		
Materiais combustíveis – contribuição ao fogo muito limitada	B - s1 d0	B - s1 d1	B - s1 d3	B _{fl} - s1	B _{fl} - s2
	B - s2 d0	B - s2 d1	B - s2 d3		
	B - s3 d0	B - s3 d1	B - s3 d3		
Materiais combustíveis – contribuição ao fogo limitada	C - s1 d0	C - s1 d1	C - s1 d2	C _{fl} - s1	C _{fl} - s2
	C - s2 d0	C - s2 d1	C - s2 d2		
	C - s3 d0	C - s3 d1	C - s3 d2		
Materiais combustíveis – média contribuição ao fogo	D - s1 d0	D - s1 d1	D - s1 d2	D _{fl} - s1	D _{fl} - s2
	D - s2 d0	D - s2 d1	D - s2 d2		
	D - s3 d0	D - s3 d1	D - s3 d2		
Materiais combustíveis – elevada contribuição ao fogo	E			E _{fl}	
Materiais combustíveis – facilmente inflamáveis	F			F _{fl}	

Os produtos de classificação A1 e A2 não são inflamáveis. Fazem parte deste grupo materiais como o betão, os minerais, o vidro, a fibra de vidro, a lã de rocha, a cerâmica, entre outros. Da classificação B até à F, vai aumentando o grau de inflamabilidade.

A classificação adicional “s” e “d” do inglês *smoke* e *droplets*, respetivamente, corresponde ao níveis de emissões de fumo (1 – baixo a 3 – alto) e à produção de partículas e/ou gotículas flamejantes (0 – ausente a 2 – alta), respetivamente.

Os materiais de revestimentos dos pavimentos seguem a mesma lógica, sendo as classes, de A1 a F, seguidas da abreviação “fl” do inglês *flooring*.

Para o intuito do projeto, serão selecionados materiais até à categoria D.

3.3 Especificações do projeto

No processo de desenvolvimento de um produto é essencial considerar os desejos e necessidades dos clientes, convertendo-os em especificações do produto por forma a garantir a satisfação do cliente e um produto mais funcional que corresponda somente às expectativas e requisitos esperados, sem atributos desnecessários e que encarecem o produto final.

Em 1966, o japonês Yoji Akao criou uma ferramenta que permite a partilha de informação entre empresas e clientes, por forma a orientar e melhorar a gestão do desenvolvimento do produto: o QFD. (Relvas, 2017)

3.3.1 QFD (Quality Function Deployment)

O QFD (*Quality Function Deployment*) ou Desdobramento da Função Qualidade, introduz as necessidades dos clientes transformando-as em especificações técnicas, para que se estabeleçam prioridades de requisitos e características, o que torna o processo de desenvolvimento mais eficiente. São identificadas e desdobradas as variáveis que compõem o desenvolvimento do produto (requisitos dos clientes, funções e características do produto, especificações dos mecanismos e componentes, etc.) através do uso de tabelas e matrizes.

Geralmente, são utilizadas quatro matrizes numa abordagem completa ao método QFD: matriz da qualidade; matriz do produto; matriz do processo e matriz de fabrico. No entanto, no âmbito deste projeto, apenas serão levadas em conta as duas primeiras matrizes (qualidade e produto).

Na matriz da qualidade, onde é feito o planeamento do produto, são processadas, à entrada, as informações relativas aos requisitos do cliente (“Voz do Cliente”) e cruzadas, à saída, com as especificações do produto, obtendo-se um conjunto de características técnicas do produto.

Na matriz do produto, onde ocorre o planeamento dos componentes, relacionam-se as especificações do produto com os componentes que o constituem. Esta matriz explicita e hierarquiza, as partes que constituem o produto final, sendo assim identificados todos os componentes críticos.

3.3.2 Matriz da qualidade

A caracterização das necessidades dos clientes permite aferir noções acerca daquilo que o cliente-alvo espera que o produto apresente, aquilo que irá valorizar no produto e no que o produto se deverá destacar e diferenciar da concorrência. O cliente-alvo será qualquer pessoa, família ou pequena empresa/organização que pretenda uma solução construtiva flexível e adaptável.

A obtenção dos requisitos dos clientes neste trabalho é realizada através da análise e interpretação, daqueles que foram os requisitos recolhidos através de questionários em outras dissertações (Bastos, 2019; Gonçalves, 2020; Varela, 2015) de tema muito semelhante ao presente projeto, realizadas na universidade de Aveiro.

A priorização inicial dos requisitos, para além de ser feita numericamente com valores entre 1 e 13 conforme o grau de importância para o cliente, distinguiu também os requisitos, segundo o modelo de Kano, em obrigatórios (O), unidimensionais (U) e atrativos (A). Os requisitos obrigatórios são, como o nome indica, atributos que se espera encontrar imperativamente e que em caso de estarem ausentes, causam enorme insatisfação ao cliente. Por outro lado, os requisitos unidimensionais transmitem um grau de satisfação que varia linearmente com o desempenho do atributo. Os requisitos atrativos, correspondem a atributos inesperados que provocam satisfação ao cliente.

Na Figura 3.1 encontra-se a hierarquização dos requisitos dos clientes, resultante da comparação entre a prioridade inicial imposta para cada requisito, e as avaliações dos produtos da concorrência (apresentados na secção 2.3.6) e da estratégia de mercado, que distingue os requisitos nos quais o produto deste trabalho se deverá dedicar e destacar dos produtos da concorrência.

Seguidamente foram identificadas as especificações técnicas e classificadas em relação à direção de melhoria: positiva (▲); negativa (▼); neutra (◇). A direção de melhoria positiva (▲) diz respeito às especificações com vista a melhorar / aumentar, a negativa (▼) com vista a diminuir e a neutra (◇) a manter (não investir muito tempo e esforço na sua melhoria). Após serem avaliadas relativamente à sua relação forte (9), média (3), fraca (1) ou não relacionável (em branco) com os requisitos de nível secundário dos clientes, e relativamente ao mercado de concorrência e dificuldade de atuação, obtém-se a hierarquização das especificações técnicas apresentada na Figura 3.2.

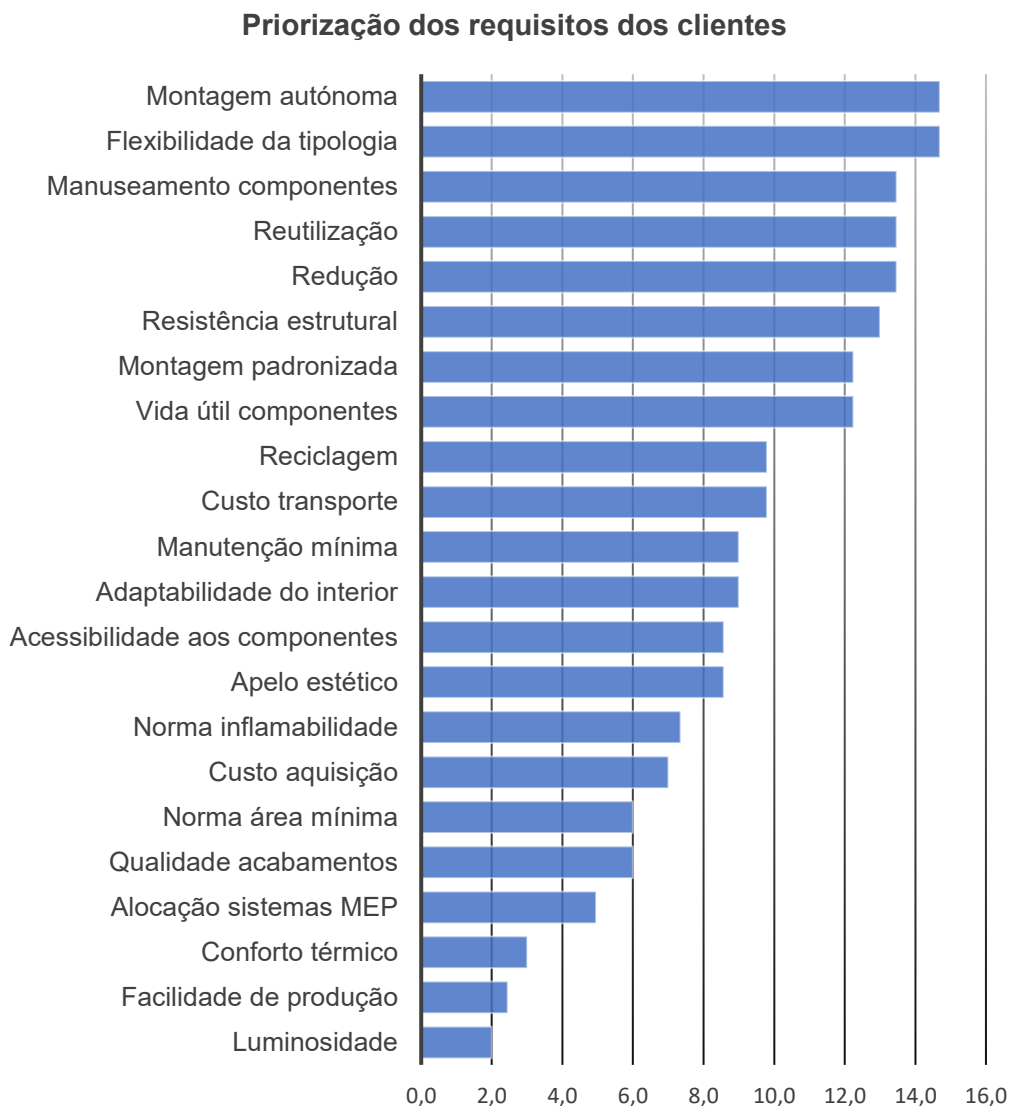


Figura 3.1 - Priorização dos requisitos dos clientes



Figura 3.2 - Priorização das especificações técnicas do produto

A matriz da qualidade, da qual se obtêm estes dois gráficos de priorização, pode ser consultada no Apêndice B.

3.3.3 Matriz do produto

Obtida a hierarquização das especificações técnicas do produto, segue-se a hierarquização dos componentes do produto através da matriz do produto, presente no apêndice B, à semelhança da matriz da qualidade. Para tal, são cruzadas as especificações técnicas utilizadas na matriz da qualidade, com os componentes que constituem o produto e, à semelhança do procedimento da matriz da qualidade, é analisada a sua relação (forte, média, fraca) e avaliada a concorrência e estratégia de mercado. Dessa forma, obtém-se a priorização dos componentes do produto demonstrada na Figura 3.3. Com as três priorizações obtidas anteriormente através da ferramenta QFD, torna-se deste modo possível, avançar para a fase de projeto do conceito de uma forma fundamentada e convergente para as necessidades identificadas.

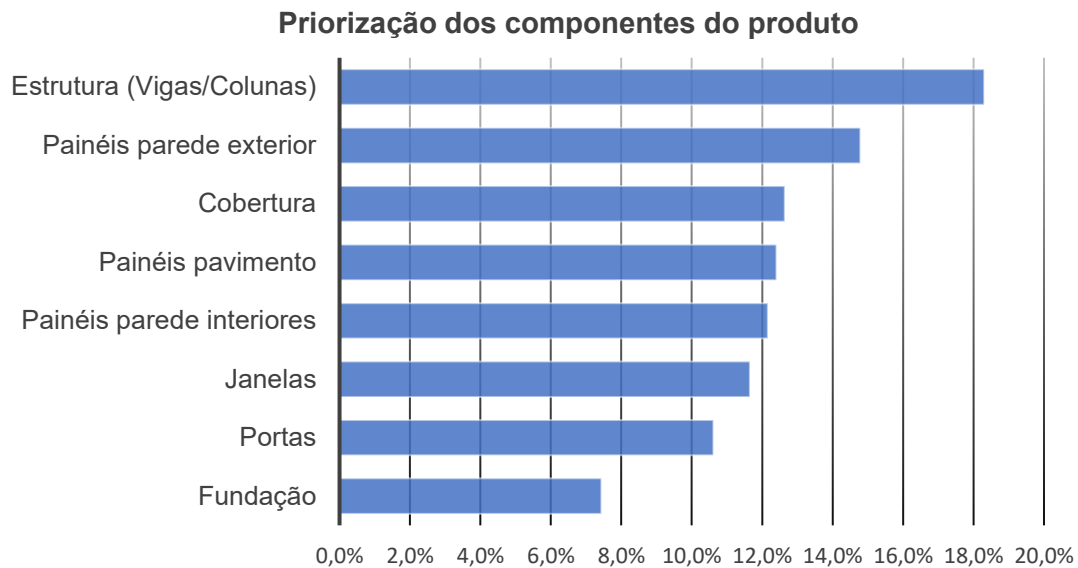


Figura 3.3 - Priorização dos componentes do produto

3.4 Escolha do material da estrutura

Tendo em conta o contexto da economia circular, no qual a construção do módulo se baseia, é essencial que a escolha dos materiais que o constituem vá de encontro aos princípios impostos pelo tema, levando em consideração aspetos como a reutilização e a reciclagem, bem como a sustentabilidade e o meio ambiente.

3.4.1 Avaliação da taxa de reutilização e reciclagem de estruturas em aço, madeira e betão

Num estudo realizado pelos investigadores Akanbi *et al.*, (2018), foi avaliado o desempenho relativamente à recuperação para fins de reutilização e reciclagem, dos três tipos de componentes mais utilizados na construção das estruturas de edifícios: aço, madeira e betão.

Este estudo, denominado *BIM-based Whole-life Performance Estimator (BWPE)*, foi implementado usando um edifício de escritórios de dois andares no Reino Unido, no qual, através de modelos matemáticos e das ferramentas BIM do software Autodesk Revit, foram comparados os níveis de reutilização e reciclagem para os diferentes materiais constituintes ao longo da vida útil do edifício, considerando os aspetos de *design* e conexões entre elementos que são decididos na fase de projeto.

Os resultados (Figura 3.4 a Figura 3.6) mostram que 50 anos após a construção dos edifícios, cerca de 85% da estrutura em aço é reutilizável, enquanto que nos casos da madeira e do betão, a reutilização dos materiais é de aproximadamente 60% e 39%, respetivamente. No que diz respeito à possibilidade de reciclagem, esta ronda os 7% para o aço, 32% para a madeira e 54% para o betão.

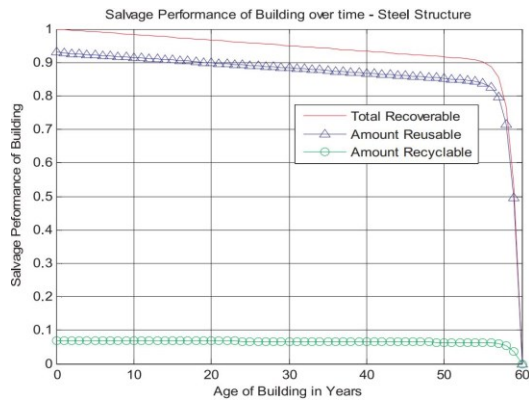


Figura 3.4 - Desempenho de recuperação para estrutura em aço (Akanbi et al., 2018)

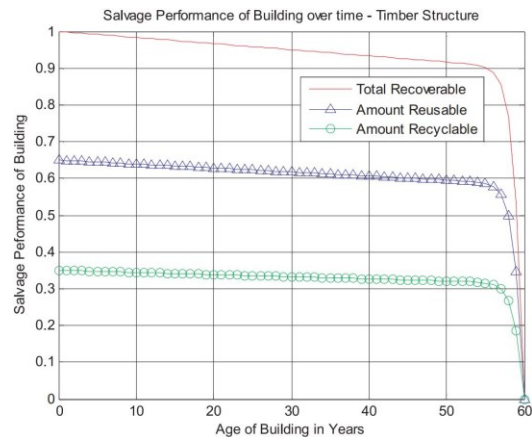


Figura 3.5 - Desempenho de recuperação para estrutura em madeira (Akanbi et al., 2018)

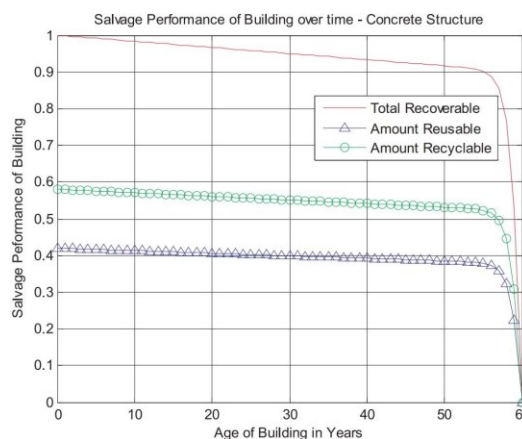


Figura 3.6 - Desempenho de recuperação para estrutura em betão (Akanbi et al., 2018)

Nestes valores está implícito, de acordo com os autores, que no caso do aço, por exemplo, 85% (após 50 anos) dos materiais recuperáveis serão reutilizáveis para funções iguais ou semelhantes, e 7% terão que ser submetidos a processamento antes de serem utilizáveis.

Nos gráficos pode ver-se também, que a diferença nas percentagens de recuperação e reciclagem dos componentes entre as estruturas compostas por aço, madeira e betão, surge imediatamente após a construção do edifício (0 anos). Isto deve-se essencialmente ao tipo de ligação entre os elementos. Neste estudo, foram consideradas ligações desmontáveis (maioritariamente aparafusadas) entre os elementos da estrutura em aço, enquanto que, na de madeira foram utilizados sobretudo pregos (que impedem a desmontagem fácil, rápida e com muito menos danos provocados aos elementos) (Akanbi et al., 2018, p.8).

Tal como referem os autores, no caso do edifício com estrutura em madeira, as percentagens de componentes reutilizáveis e recicláveis que a constituem, pode aumentar significativamente, caso se opte por utilizar, à semelhança da estrutura em aço, conexões

desmontáveis como “cavilhas e parafusos e porcas em vez de pregos” (Akanbi *et al.*, 2018, p.9).

3.4.2 Potencial de Aquecimento Global de estruturas em aço vs madeira

Como vimos anteriormente, quando montadas através de ligações desmontáveis, quer as estruturas em aço quer em madeira têm elevada taxa de recuperação para fins de reutilização, que, tal como pudemos compreender no capítulo do estado de arte, é uma das máximas da economia circular.

No entanto, como sabemos, as medidas e conceitos associados à economia circular surgiram numa perspetiva de reduzir o desperdício, com vista na diminuição do impacto ambiental da presente crise climática provocada pelas elevadas taxas de emissão de gases com efeito de estufa, causadas quer pelo descarte em aterros (entre outros) dos materiais, quer pela produção de novos materiais que muitas vezes requerem a utilização de enormes quantidades de combustíveis fósseis nas fases de extração e produção.

Assim sendo, mais do que apurar o desempenho de determinado material que compõe a estrutura de um edifício no que diz respeito à sua recuperabilidade para fins de reutilização e reciclagem, é de extrema importância contabilizar o impacto que a escolha desse mesmo material terá na emissão de gases poluentes para o meio ambiente ao longo das várias fases da sua vida.

Neste sentido, o método mais utilizado e reconhecido internacionalmente para quantificar o potencial de aquecimento global (do inglês, *Global Warming Potential* (GWP)), e outros impactos ambientais dos produtos de construção, é o da avaliação do ciclo de vida, que deriva também do inglês *Life Cycle Assessment* (LCA) (Morris, Allen e Hawkins, 2021).

Este método permite investigar o consumo energético e as emissões de gases com efeito de estufa dos edifícios ao longo da sua vida útil, tornando-se uma excelente ferramenta para melhorar a sustentabilidade dos projetos de construção, uma vez que expõem informação acerca do contributo dos diferentes materiais e processos no impacto ambiental do edifício (Allan e Phillips, 2021).

Num estudo assente neste método, Allan e Phillips (2021) compararam o impacto ambiental de dois edifícios de cinco andares para escritórios e de outros dois edifícios residenciais de doze andares em que “cada par de edifícios era idêntico em termos de área, altura piso a piso, altura total e planta” (Allan e Phillips, 2021).

Os principais materiais objeto de comparação, foram a madeira, mais propriamente madeira do tipo *mass timber* (também conhecida como *engineered wood*) que é composta por pequenas secções ou camadas de madeira geralmente coladas (podendo também ser pregadas ou unidas por cavilhas), e o aço. No caso dos edifícios em madeira, foram utilizadas vigas e colunas de madeira laminada colada (conhecida como *glulam*, devido à designação do inglês, *glued laminated timber*) para construção da estrutura, e painéis de madeira laminada cruzada (CLT, do inglês *cross laminated timber*) nas paredes e pavimento. Por outro lado, os edifícios com estrutura em aço foram concebidos usando vigas e colunas de aço em formato W. A avaliação ao nível do impacto ambiental incluiu, nas simulações efetuadas por software, outros materiais que foram utilizados para as fundações, acabamentos, entre outros.

Para a realização das simulações, os autores utilizaram a ferramenta Athena IE4B para comparar o impacto ambiental das diferentes configurações de edifícios durante as fases de produção, construção, fim de vida e nas fases após o fim de vida, por um período de 60 anos. O limite do sistema foi definido numa perspetiva de berço ao túmulo (*cradle-to-grave*) na qual se excluiu a fase de utilização do edifício (fase B1-B7), como vemos na figura abaixo.

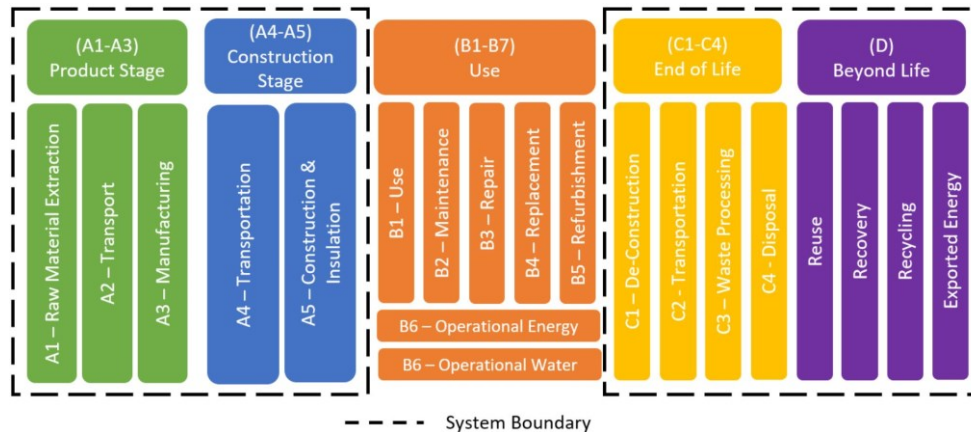


Figura 3.7 - Limite do sistema de avaliação (LCA) [Allan e Phillips (2021)]

O *software* IE4B segue a norma EN15978 que inclui o impacto da produção, transporte, construção e demolição. Esta ferramenta, utiliza uma metodologia denominada TRACI, para agregar e quantificar o impacto ambiental de seis diferentes categorias: (1) potencial de aquecimento global, (2) potencial de acidificação, (3) potencial de eutrofização, (4) partículas HH, (5) potencial de destruição de ozono e (6) potencial de *smog*.

O potencial de aquecimento global, como já referido, mede a emissão de gases com efeito de estufa que contribuem para as alterações climáticas. O potencial de acidificação, mede os ácidos admitidos na atmosfera que contribuem para as chuvas ácidas. O potencial de eutrofização mede o potencial da poluição de sistemas de água e ecossistemas aquáticos. As partículas HH são uma medição das finas partículas emitidas para o ar e atmosfera que causam risco para a saúde humana através das vias respiratórias e doenças cardiovasculares. O potencial de destruição do ozono, mede a quantidade de hidrocarbonetos emitidos que contribuem para a destruição da camada de ozono. Finalmente, o potencial de *smog* mede o ozono ao nível do solo, criado por compostos orgânicos voláteis e óxidos nitrosos que ao interagirem com a radiação solar provocam a poluição do ar com um efeito de fumaça. (Allan e Phillips, 2021)

Na Figura 3.8, vemos os resultados da avaliação do ciclo de vida (LCA) durante as fases A a C (Allan e Phillips, 2021, pg.8) obtidos pelos autores, que comparam o impacto nas seis categorias referidas anteriormente. É importante referir também que, a medição do potencial de aquecimento global (GWP) desta avaliação, não inclui o sequestro / captura de carbono biogénico da fase D.

Verifica-se que os edifícios em *mass timber* têm um potencial de aquecimento global consideravelmente inferior aos edifícios em aço, mesmo desprezando a captura de carbono biogénico. Segundo os dados obtidos, o GWP dos edifícios em aço é aproximadamente 31 - 41% superior aos de *mass timber*. Por outro lado, a escolha do aço em detrimento da madeira, diminui o impacto nas categorias de avaliação do potencial de

acidificação, do potencial de destruição de ozono (em cerca de 45 – 55 %) e do potencial de *smog*. Nas construções em madeira, obtêm-se vantagens ao nível da redução do potencial de eutrofização e de partículas HH que rondam os 15% (Allan e Phillips, 2021, pg.8).

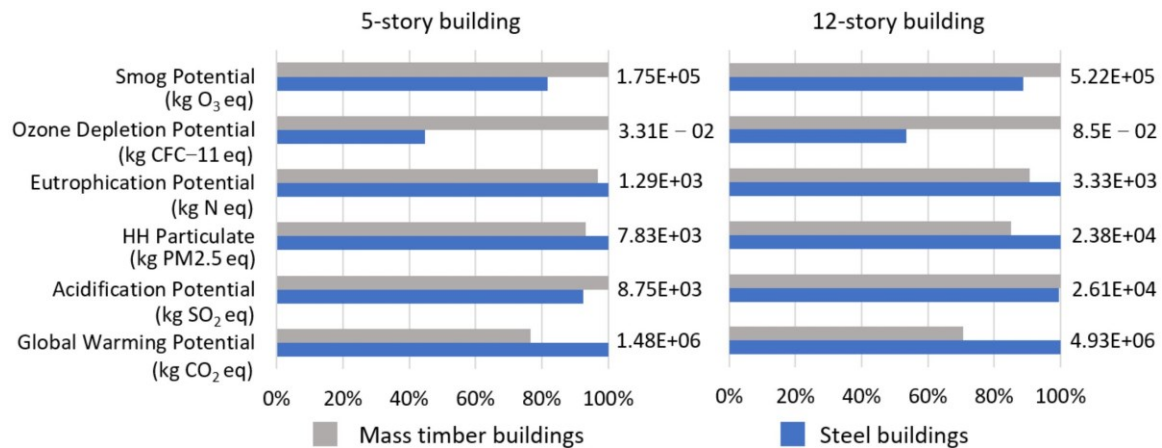


Figura 3.8 - Comparação do impacto ambiental de edifícios em mass timber e aço [(Allan e Phillips, 2021)]

Os autores identificaram também que “os componentes que são maioritariamente compostos de betão, contribuem para o aumento de metade do total de emissões GWP”, e portanto, no caso dos edifícios em *mass timber* que utilizaram betão nas fundações e subpisos, “só as fundações contribuíram 30% a 40% do total de emissões GWP para os edifícios de 5 e 12 andares, respetivamente” (Allan e Phillips, 2021, pg.9).

Apesar de existirem bastantes estudos comparativos idênticos a este, onde se utiliza o método LCA para comparar o impacto ambiental de materiais como o aço e a madeira, um dos pontos de grande debate e dúvida em todos eles, prende-se com a inclusão, ou não, da quantidade de carbono biogénico capturado na fase D, que procede o fim de vida do material. Quando contabilizado, o GWP dos edifícios em *mass timber*, pode ser bastante menor.

A madeira, é muitas vezes referida como sendo neutra em carbono, ou até mesmo sequestradora de carbono, graças ao processo biológico de remoção de CO₂ da atmosfera através da fotossíntese. No entanto, existem algumas ressalvas neste aspeto, uma vez que, embora a madeira sirva como um acumulador de carbono, isto aplica-se temporariamente. Isto porque, o CO₂ sequestrado na biomassa de madeira, será emitido para a atmosfera caso a madeira apodreça ou seja incinerada. Ainda assim, é geralmente aceite pela maioria dos investigadores, que “existe alguma acumulação permanente, ou de longo termo criada pelos produtos de madeira” (Allan e Phillips, 2021). Na Figura 3.9 é apresentada a tabela com o GWP no caso de incluir a fase D no LCA, e percebe-se assim, que contabilizando esta fase, os edifícios em *mass timber* “têm um impacto ambiental significativamente inferior às alternativas em aço” (Allan e Phillips, 2021).

Building	Stage D GWP (10 ³ kg CO ₂ eq.)	GWP for Stages A–C (10 ³ kg CO ₂ eq.)	GWP for Stages A–D (10 ³ kg CO ₂ eq.)
5-story steel	–71.2	1350	1280
5-story mass timber	–1140	1000	–141
12-story steel	–132	4590	4460
12-story mass timber	–3230	3150	–84.0

Figura 3.9 - Potencial de aquecimento global para ciclo de vida da fase D do aço [(Allan e Phillips, 2021)]

Neste estudo realizado por Allan e Phillips (2021), os autores concluíram então que os edifícios de *mass timber* têm vantagens em relação aos edifícios de construção em aço no que diz respeito a algumas categorias da análise de impacto ambiental, sobretudo, no potencial de aquecimento global (GWP). Mais ainda, se for incluída a fase D, onde se insere o efeito da captação / sequestro do carbono, as estruturas compostas essencialmente por *mass timber* tornam-se praticamente carbonicamente neutras, ao contrário das estruturas de aço, que permanecem relativamente inalteradas a esse nível. Por outro lado, nas categorias do potencial de acidificação, potencial de destruição de ozono e potencial de *smog*, o aço apresenta valores inferiores de impacto no ambiente. Este facto deve-se largamente ao facto de, como nos referem os autores, o estudo ter sido realizado assumindo uma produção de aço que utiliza maioritariamente sucata reciclada. De outra forma, valores como o GWP seriam claramente superiores para o caso do aço (Allan e Phillips, 2021).

Noutro estudo, com bastantes semelhanças ao apresentado anteriormente, Morris, Allen e Hawkins (2021), comparam também através do método LCA os materiais madeira, mais propriamente *glulam*, e aço, relativamente ao seu potencial para o aquecimento global, usando como amostra um viga estrutural de cada um destes materiais.

Dentro das várias conclusões que os autores puderam obter, algumas delas com simulações para obtenção dos mesmos dados comparativos que o estudo anterior (e com resultados concordantes), destacam-se dois aspetos que não foram investigados no estudo previamente apresentado.

Em primeiro lugar, os autores observaram que, comparativamente à análise do berço ao túmulo ao longo de 60 anos, onde se excluíram as fases A5 a C1, e numa linha de avaliação base (Figura 3.10) na qual foram contabilizadas todas as absorções e emissões de carbono biogénico sem considerar o tempo de emissões, existe uma diferença substancial quando, por outro lado, se incluem na avaliação do potencial para o aquecimento global esse mesmo tempo de emissões (Figura 3.11). O tempo de emissões, representa a assincronia entre o momento das emissões e o sequestro do carbono (*Timing of greenhouse gas emissions* | *Bioenergy*, [s.d.]), aspeto que muitas vezes é desprezado em estudos deste género, e que tem grande influência nos resultados obtidos.

Quando essa assincronia é tomada em conta, o GWP da *glulam* é notavelmente reduzido independentemente do cenário de fim de vida, com todos (excetuando um), os resultados a demonstrar um balanço negativo das emissões ao longo de todo o ciclo de vida.

Este facto pode explicar-se pela contabilização do sequestro no início da vida. Assim, a *glulam* é reconhecida pela total pela remoção de CO₂ da atmosfera. Quando esse carbono biogénico é reemitido (parcialmente ou totalmente no final da vida), e dado que

isso só acontecerá 60 anos depois, o sistema é recompensado por ter retardando ao longo dessa vida útil, o impacto radiativo. Portanto, o valor negativo de emissões, associado à acumulação inicial de carbono, é superior, às emissões positivas ligadas à liberação de CO₂ (e a emissão agregada em outras fases do ciclo de vida). Isso significa que existe uma redução geral no GWP em comparação com o caso base.

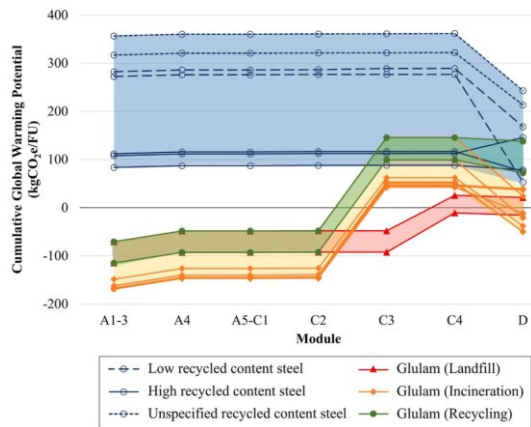


Figura 3.10 – GWP do berço ao túmulo – Avaliação com critérios base [(Morris, Allen e Hawkins, 2021)]

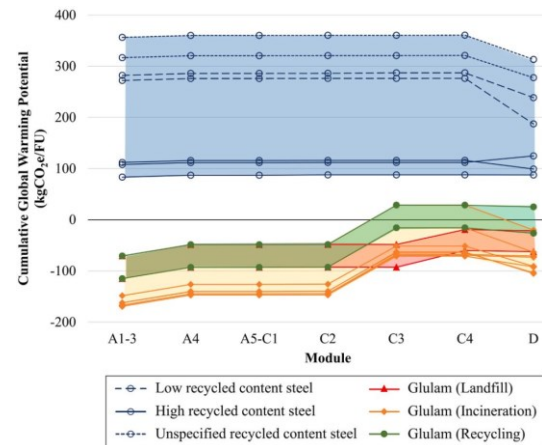


Figura 3.11 – GWP do berço ao túmulo – Análise sensível contabilizando o tempo das emissões [(Morris, Allen e Hawkins, 2021)]

Por último, o outro aspecto de destaque neste estudo, foi a adição de duas categorias de análise de impacto ambiental à comparação entre as vigas de *glulam* e aço, com respeito ao uso de recursos energéticos renováveis e não renováveis ao longo das várias fases (A1 a D): PENRT (*non-renewable primary energy resources*) e PERT (*renewable primary energy resources*).

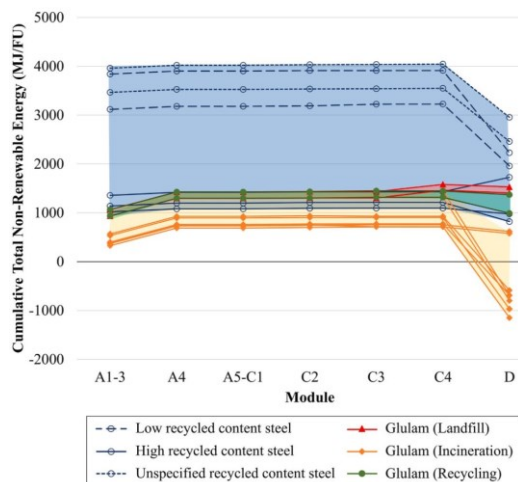


Figura 3.12 – Uso total de recursos de energia primária não renovável (PENRT), do berço ao túmulo [(Morris, Allen e Hawkins, 2021)]

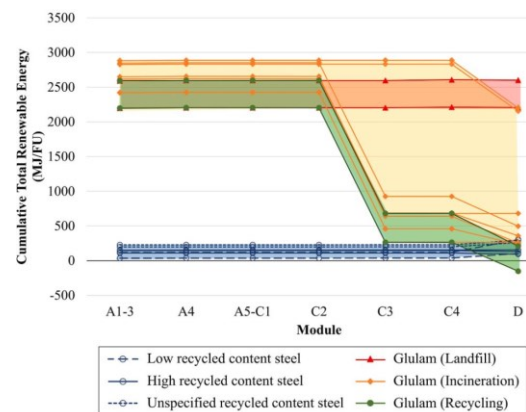


Figura 3.13 – Uso total de recursos de energia primária renovável (PERT), do berço ao túmulo [(Morris, Allen e Hawkins, 2021)]

Conclui-se pela análise dos gráficos das figuras anteriores, que a *glulam* utiliza sobretudo energia de fontes renováveis durante a fase de produção e igualmente nas restantes fases, ao invés do aço, que requer a utilização substancialmente de energias não renováveis. Desta forma, a *glulam*, tem uma vez mais vantagem sobre o aço.

Posto isto, e após analisar os resultados de ambos os estudos, que, segundo os seus autores, se encontram em concordância com resultados obtidos em estudos semelhantes aos quais estes recorreram durante as suas pesquisas bibliográficas, a escolha para o material que irá compor a estrutura do módulo recai sobre a madeira. Embora se possam encontrar algumas vantagens no aço que superam a madeira, na generalidade das categorias avaliadas relativamente ao seu impacto a nível de economia circular e ambiental, a vantagem encontra-se do lado dos materiais compostos por madeira.

3.5 Proposta inicial

Em primeiro lugar, na idealização do conceito do módulo habitacional, tomam-se em consideração os objetivos específicos do projeto descritos na secção 2.3.5. Tal como foi referido, pretende-se criar um módulo composto por elementos de pré-montagem não volumétrica. Desta forma, além das vantagens já mencionadas, diminui-se o volume da carga para transporte até ao local de montagem (uma vez que é transportado desmontado), diminuindo custos quer a nível económico, quer ambiental, pois não serão necessários transportes especiais capazes de albergar o módulo totalmente montado, que implicam maiores custos e maiores emissões poluentes.

Posto isto, optou-se pelo método construtivo conhecido como construção de madeira de estrutura leve (do inglês, *light frame timber construction*) composto por montantes e vigas de madeira formando a estrutura que resistirá aos esforços quer externos quer dos próprios componentes de revestimento e isolamento que a esta serão acoplados.

As decisões associadas aos sistemas de ligação entre componentes e de outras questões como a acessibilidade aos componentes, terão também que ter em conta as prioridades obtidas nas matrizes da qualidade e do produto, para que sejam tomadas decisões que vão de encontro às necessidades dos clientes.

3.5.1 Elementos estruturais da parede

3.5.1.1 Montante

Para erguer as paredes do módulo, um dos componentes utilizado é o montante, ou coluna. Este elemento estrutural de madeira de secção retangular, é disposto verticalmente e, sendo sequencialmente dispostos outros montantes iguais por uma determinada cota de espaçamento igual entre estes, irão assim formar as paredes externas do módulo.

Para além de suportar as cargas verticais provocadas pelo peso das vigas e dos restantes componentes da cobertura, o montante funciona como elemento de ligação e igualmente suporte de carga, de placas de revestimento exterior e interior, criando desta forma a barreira de vedação / isolamento e privacidade necessária no interior do módulo.

3.5.1.2 Placa superior e inferior

Os montantes descritos anteriormente, necessitam de ser unidos a uma placa / tábua quer na base, quer no topo. Desta forma, é criada uma ligação que impede o seu deslocamento pois é feito um travamento da estrutura da parede, garantindo-se igualmente o correto distanciamento entre os mesmos. As dimensões de secção destas placas (altura x largura), são iguais às dos montantes. O comprimento das placas superiores e inferiores, é igual ao comprimento total das paredes longitudinais e laterais do módulo. Pretende-se que o módulo tenha um formato retangular, pelo que, são necessárias placas de duas medidas diferentes de comprimento.

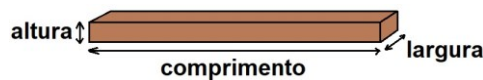


Figura 3.14 – Sistema de medidas adotado



Figura 3.15 - Parede longitudinal contendo porta e janela pequena (comprimento do módulo), e parede lateral contendo janela grande (largura do módulo)

Sendo a montagem autónoma a prioridade dos requisitos dos clientes com maior importância, utilizam-se pequenos elementos de madeira aparafusados previamente em ambiente de fábrica às placas superior e inferior, que permitem ao cliente a fácil identificação do posicionamento dos montantes, evitando falhas de montagem e rejeitando a necessidade de medições, diminuindo assim, consideravelmente, o tempo de montagem do módulo, outra priorização identificada na matriz da qualidade (neste caso das especificações técnicas do produto). Além disto, estes elementos guia, servem também como meio de ligação mecânica entre as placas (tanto superior como inferior), e os montantes e vigas, funcionando como um esquadro.

A secção (altura x largura) destes elementos é igual à dos montantes e placas, o que, relativamente à sua produção, permite diminuir custos e aumentar a facilidade de produção, priorizações dos requisitos dos clientes.

Como se pode ver pela Figura 3.16, os elementos de madeira são aparafusados nas placas superiores acima e abaixo destas, para que sejam inseridos os montantes (abaixo) e as vigas (acima). Por cada par de elementos aparafusados, é depois dado, em fábrica, o espaçamento que define a distância entre montantes (e consequentemente vigas) até ao próximo par destes pequenos elementos guia que será aparafusado.

Na placa inferior (Figura 3.17) os elementos de esquadro, são voltados apenas para a face superior, visto que esta placa será colocada sobre o piso da fundação, servindo apenas à fixação dos montantes.



Figura 3.16 - Placa superior



Figura 3.17 - Placa inferior

Com o objetivo de criar uma união mais forte entre as paredes longitudinais e laterais, é realizado em fábrica um entalhe em cada extremidade das placas superiores e inferiores, tanto nas placas das paredes longitudinais (Figura 3.18), como nas laterais (Figura 3.19). Os entalhes das placas são realizados em faces contrárias, como se pode ver pelas figuras, permitindo a sobreposição das placas das paredes longitudinais sobre as placas das paredes laterais. Assim é criada uma maior superfície de contacto, melhorando a solidez da ligação entre as paredes.

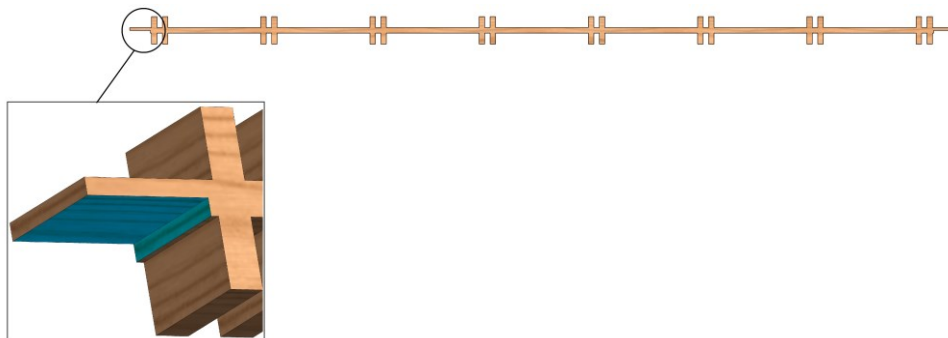


Figura 3.18 - Pormenor dos entalhes inferiores feitos nos extremos (representado a azul) das placas superiores das paredes longitudinais

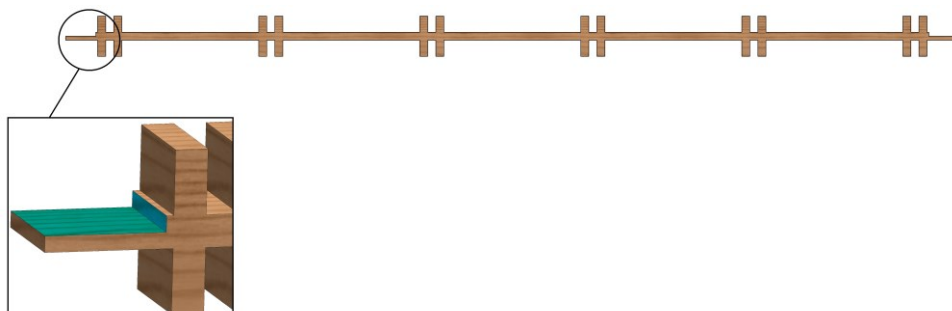


Figura 3.19 - Pormenor dos entalhes superiores feitos nos extremos (representado a azul) das placas superiores das paredes laterais

3.5.2 Elementos estruturais da cobertura

3.5.2.1 Viga da cobertura

Sendo elevadas as paredes do módulo, é necessária a montagem da estrutura que irá conter e suportar a sua cobertura, que, no caso deste projeto, se decidiu ser do tipo plana. Para tal, o elemento base é a viga. À semelhança dos elementos estruturais da parede, a secção da viga é também ela retangular, sendo posicionada perpendicularmente aos montantes e com o plano da maior dimensão da secção, a largura, paralelo ao plano xy, conferindo assim maior resistência às cargas fletoras no eixo y do sistema de coordenadas adotado (Figura 3.20), provocadas quer pelo peso dos componentes da cobertura, quer por outras cargas externas.

A viga, como foi descrito na secção 3.5.1.2, é apoiada sobre as placas superiores, que por sua vez significa também que estarão apoiadas sobre os montantes. Atendendo ao requisito de flexibilidade da tipologia, decidiu-se que as vigas são apoiadas sobre as paredes longitudinais, sendo posteriormente fixadas a estas por ligação mecânica. Desse modo, o comprimento total do módulo (Figura 3.15) pode ser decidido pelo cliente, consoante as suas necessidades, podendo mais tarde, ser aumentado ou diminuído, com relativa facilidade, sem que para isso precise de adquirir novas vigas com comprimento por encomenda. No entanto isto significa que, a largura do módulo, fica assim condicionada pelo comprimento da viga. Por conseguinte, idealizou-se que no interior do módulo, a largura deveria ser igual a 4 metros, possibilitando uma largura razoável podendo o módulo ser adaptável a várias utilizações, conforme a necessidade do cliente.

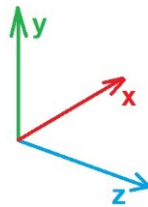


Figura 3.20 - Sistema de coordenadas adotado

3.5.2.2 Travessa ou bloqueador

Unidas perpendicularmente às vigas, quer da cobertura, quer da fundação, são inseridas travessas, também conhecidas como bloqueadores, que irão criar o efeito de uma malha quadrangular.

As travessas impedem a encurvadura lateral com torção das vigas. Permitem também distribuir as cargas às quais as vigas estão sujeitas, melhorando o desempenho em relação à resistência à flexão, diminuindo a flecha das placas de revestimento da cobertura e do piso. Sobretudo na fundação, as travessas têm grande importância, uma vez que a fundação se encontra sujeita à carga gravitacional de todo o módulo e porque o piso deverá aceitar a aplicação de uma carga vertical de 150 kg/m^2 (Diário da República, 1983), além do peso do próprio módulo.



Figura 3.21 - Travessas

3.5.2.3 Ligações viga da cobertura – placas superiores das paredes laterais

A cruzar perpendicularmente as vigas da cobertura, são inseridas as travessas que distam de 800 mm entre si. Junto às paredes laterais, dada a elevada proximidade entre os montantes que definem as arestas verticais do módulo, as vigas das extremidades ficam bastante próximas das placas das paredes laterais, pelo que, nessas mesmas vigas, não são inseridas travessas no lado voltado para as paredes laterais.

Na secção 3.5.1.2, vimos que as paredes longitudinais e laterais são unidas entre si nas suas extremidades. No entanto, dada a extensão das paredes laterais, a sua ligação com as paredes longitudinais somente pelas extremidades não seria viável.

Desta forma, são inseridos nos encaixes das placas superiores das paredes laterais, pequenos elementos de ligação em madeira, que, dada a sua localização, irão coincidir com o alinhamento das travessas. Assim, estes pequenos elementos, fixados posteriormente no local de montagem às vigas, garantem a ligação das placas superiores das paredes laterais às vigas colocadas nas extremidades junto às paredes laterais, conferindo uma união muito mais reforçada entre as paredes laterais e longitudinais.

3.5.3 Elementos estruturais da fundação

3.5.3.1 Viga da fundação

Em tudo semelhantes às vigas da cobertura, também na fundação são utilizadas vigas que suportam a carga gravítica, neste caso de todo o módulo. A única diferença que as distingue, é o seu comprimento. As vigas da fundação têm um comprimento inferior, uma vez que aos seus extremos é ligada, perpendicularmente, uma tábuas de cintamento (em cada extremo) ao longo de toda a extensão da parede longitudinal. Portanto, a diferença de comprimento entre as vigas da fundação e as vigas da cobertura, é igual à soma da altura das tábuas laterais de cintamento (secção 3.5.3.3).

3.5.3.2 Travessa ou bloqueador

As travessas ou bloqueadores utilizadas na fundação são iguais às que se utilizam na cobertura. A sua função foi também já esclarecida na secção 3.5.3.2.

3.5.3.3 Tábuas de cintamento da fundação

Como mencionado na secção 3.5.3.1, para cintar o conjunto das vigas e travessas da fundação, são utilizadas, ao longo das extremidades perimetrais da fundação, tábuas ligadas perpendicularmente que fazem o fecho da malha quadrangular criada pelas vigas e travessas.

3.5.3.3.1 Tábuas de cintamento da fundação – paredes longitudinais

Tal como acontece na cobertura, também na fundação as vigas são dispostas perpendicularmente às paredes longitudinais. Nos seus extremos, são adicionadas as tábuas de cintamento de comprimento igual à distância (pelo exterior do módulo) entre paredes laterais, que têm uma função muito semelhante às placas superiores e inferiores ligadas aos montantes. A sua ligação mecânica, evita o deslocamento das vigas, garantindo-se igualmente o correto distanciamento entre os mesmos.

3.5.3.3.2 Tábuas de cintamento da fundação – paredes laterais

Tal como na cobertura, na fundação as travessas cruzam perpendicularmente as vigas, distadas de 800 mm entre si, criando no final a malha quadrangular. Nas vigas das extremidades, junto às paredes laterais, também não são inseridas travessas no lado voltado para as paredes laterais. No seu lugar, são adicionadas tábuas de cintamento, tal como nas paredes longitudinais. Estas, são ligadas às tábuas de cintamento das paredes longitudinais pelo interior das mesmas. Ou seja, o comprimento das tábuas das paredes laterais, é menor que a distância entre as paredes longitudinais, em medida igual à altura de cada uma das tábuas das paredes longitudinais.

Ligações viga da fundação – tábuas de cintamento das paredes laterais da fundação

À semelhança das placas superiores das paredes laterais, as tábuas de cintamento da fundação paralelas às paredes laterais, incluem pequenos elementos de madeira aparafusados previamente em ambiente de fábrica, colocados nos encaixes de forma a coincidirem com o alinhamento das travessas. Assim, estes pequenos elementos, garantem a ligação das tábuas às vigas colocadas nas extremidades junto às paredes laterais.

3.5.3.4 Estacas helicoidais

Os componentes referidos anteriormente, perfazem a plataforma da fundação, que deve ser elevada do solo, para que se melhore o isolamento térmico e crie a ventilação natural da fundação evitando problemas como a humidade. Além disto, cria um espaço de acomodação para os sistemas de saneamento, eletricidade e AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado).

Para o fazer, optou-se por utilizar estacas helicoidais. As estacas helicoidais, são fabricadas em aço, que é menos poluente do que as soluções de fundação em betão. A sua instalação é também mais rápida e simples. Além disto, permite a sua fácil desmontagem no fim de vida do módulo, sendo totalmente recuperáveis para reutilização ou reciclagem, ao contrário das construções em betão que dificilmente são reutilizáveis. Foi utilizada a estaca helicoidal da marca KRINNER, modelo KSF M 76x1600-M16, obtido no grabcad pelo autor Wolfgang Fischer (Wolfgang Fischer, 2021)



Figura 3.22 - Estaca helicoidal

3.5.4 Revestimento das paredes interiores

3.5.4.1 Placas de revestimento interior

Os requisitos de montagem autónoma, fácil manuseamento / acessibilidade dos componentes e adaptabilidade do interior, e ainda as medidas para o *design* com vista à desmontagem apresentadas na secção 2.2.3 em contexto de economia circular, conduziram o conceito de vedação das paredes interiores, para a criação de placas com ligação aos montantes, sem necessidade de aparafusamento, e de fácil montagem / desmontagem.

Assim sendo, a montagem das placas sobre os montantes, é feita através de um sistema deslizante por pino contido num mancal.

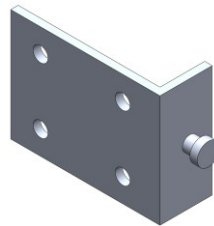
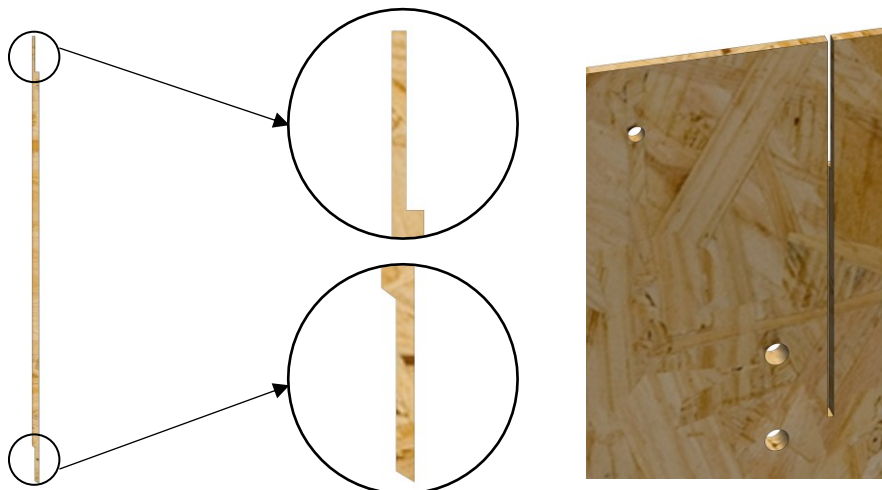


Figura 3.23 - Mancal com pino para montagem das placas nos montantes

Ao longo de todo o comprimento, a placa tem dois entalhes, superior e inferior, de largura 50mm que servem como zona de encosto e vedação / isolamento entre as placas adjacentes. São também feitos dois cortes verticais, para que a placa possa ser rodada no eixo dos pinos sem embater nas régua, apresentadas na secção seguinte, que as suportam.



*Figura 3.24 – (à esquerda) - Placa de revestimento interior com detalhe do entalhe superior (acima) e entalhe inferior com chanfros (abaixo)
(à direita) - Cortes verticais junto às extremidades das placas*

No entalhe inferior, são ainda feitos dois chanfros com se pode verificar pela imagem acima, que permitem remover uma placa de cada vez, sem que haja obstrução pelas que se encontram acima.

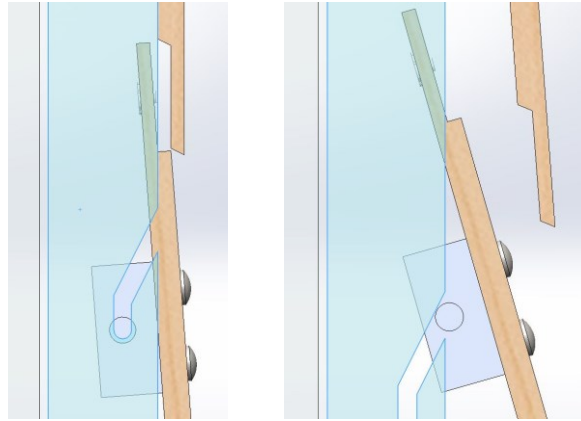


Figura 3.25 - Desmontagem das placas sem intersecções ou impedimentos

Para garantir o funcionamento do sistema de montagem, é necessário considerar uma folga na primeira placa junto ao teto, igual ou superior à altura do rasgo no qual o pino encaixa, para que a placa possa ser removida. Quer isto dizer, que é necessário criar uma sanca, que preencherá essa mesma folga.

As placas de revestimento interior e exterior, são pré-montadas em fábrica com o mancal que contém o pino através de rebites (Figura 3.26). Além deste, são também adicionadas em fábrica, duas porcas de garra (Figura 3.27) nas furações do entalhe superior, que servem o propósito de apertar os entalhes inferiores das placas antecedentes com os entalhes superiores.

As placas de revestimento são compostas por uma placa de 8mm em OSB 3 (*Oriented Strand Board*), e por uma folha de laminado a alta pressão (HPL – *High Pressure Laminate*), que lhes confere impermeabilidade. Dada a larga variedade de padrões e cores que é possível obter nas folhas de HPL, é possível oferecer ao cliente uma vasta escolha de opções, respeitando desta forma o requisito dos clientes relativo ao apelo estético.



*Figura 3.26 - Rebites para fixação entre o mancal e as placas
(www.bralo.com)*



*Figura 3.27 - Porcas de garra - DIN 1624
(www.allfasteners.com)*

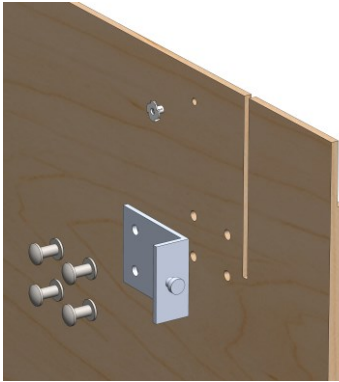


Figura 3.28 - Rebitagem do mancal e inserção da porca de garra na face não visível (voltada para o interior da estrutura) – Pré-montagem em fábrica. Porca de garra obtida no grabcad por (Insertsdirect.com Ltd, 2015)



Figura 3.29 - Vista da face visível das placas, após rebitagem e inserção das porcas de garra

No fabrico das placas de revestimento, podem ser incluídos elementos funcionais de acabamento como tomadas, interruptores, entre outros. Tendo em conta a facilidade de desmontagem das placas, a alteração da localização de placas que incluam estes elementos, ou a substituição de placas simples por uma destas, torna-se muito mais fácil e não produz desperdícios. Os técnicos de eletricidade, mesmo que necessários, têm também uma operação muito mais simples na recolocação ou adição de cablagens.



Figura 3.30 - Placa de revestimento das paredes interiores com uma tomada de eletricidade obtida no grabcad por (scarus, 2020b)

3.5.4.2 Régua para encaixe das placas de revestimento interior e passagem de sistemas

Para comportar o sistema de encaixe por mancal com pino das placas, criou-se uma “régua”, em aço, na qual são cortados, por corte *laser*, os rasgos para inserção dos pinos.

Além disto, e com o intuito de satisfazer as especificações técnicas do produto, são cortadas também aberturas ao longo da régua, por forma a oferecer espaços de passagem a sistemas técnicos de eletricidade, canalização e AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado).

Em fábrica, são pré-montadas duas régua em cada montante que no momento da montagem do módulo ficarão voltadas para o interior do mesmo, de forma que, de cada montante saia uma placa voltada para a direita e outra para a esquerda. O seu posicionamento de fixação nos montantes, garante a existência do espaçamento necessário à montagem / desmontagem das placas superiores, que é preenchido com a sanca, e igualmente de um espaço na placa inferior, preenchido com um rodapé.



Figura 3.31 – Régua para encaixe das placas de revestimento interior e passagem de sistemas

3.5.4.3 Sanca e rodapé

Como mencionado nas secções anteriores, para preencher a folga criada no revestimento das paredes interiores, quer junto ao teto, quer junto ao revestimento do chão / piso, foi criada uma sanca, e um rodapé. A sanca é utilizada na placa que se situa junto ao teto, enquanto que o rodapé, é fixo à placa de revestimento junto ao piso. Em ambos os componentes, é cortado, tal como nas placas de revestimento, um entalhe.

A fixação destas, não é feita através do mancal com pino visto que, se assim fosse, embora o rodapé pudesse ser retirado, o mesmo não se aplicaria à sanca, pois não havia espaço para a fazer deslizar ao longo do rasgo da régua para o encaixe das placas. Assim sendo, fixação é realizada apenas pelo aparafusamento às placas. Uma vez que a sua largura é reduzida, este sistema é seguro e viável.



Figura 3.32 – Sanca para placas de revestimento interior

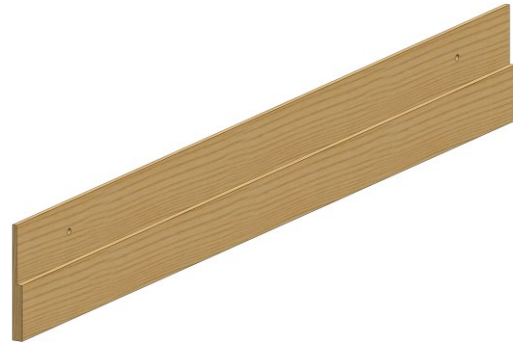


Figura 3.33 – Rodapé para placas de revestimento interior

3.5.5 Revestimento do teto

Tal como é feito nas paredes interiores, em relação ao revestimento do teto considerou-se também a acessibilidade aos componentes e adaptabilidade do interior, requisitos dos clientes. Por conseguinte, decidiu-se pelo desenvolvimento de um teto falso amovível.

3.5.5.1 Perfil de teto falso para as vigas

Foi criado um perfil W, em alumínio, para fixação prévia em fábrica sob as vigas da cobertura, e que serve de suporte às placas de revestimento do teto. A sua instalação em ambiente de fábrica evita falhas de montagem, e reduz o tempo de montagem do módulo.

À semelhança das régua, este perfil inclui aberturas de passagem a sistemas técnicos. Mais ainda, inclui também cortes retangulares para inserir perfis T, apresentados na secção seguinte, e furos ao longo das abas maiores, para colocação dos parafusos de fixação às vigas em fábrica.

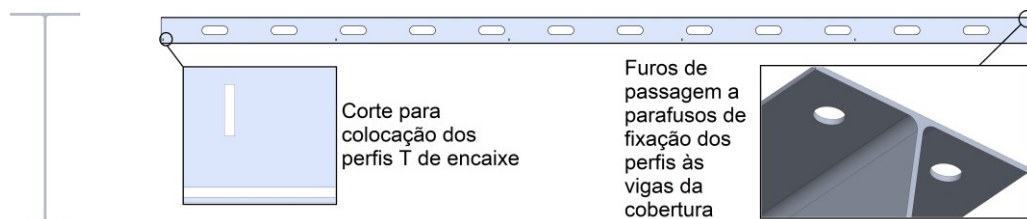


Figura 3.34 - Perfil W de teto falso para fixação prévia nas vigas de cobertura

3.5.5.2 Perfil de teto falso para encaixe nos perfis das vigas

Para criar uma malha quadrangular capaz de auxiliar no suporte das placas, e para que cada placa seja colocada ou retirada de forma independente das que a rodeiam, tal como se utiliza na grande maioria dos sistemas de suporte de teto falso amovível, foi desenvolvido um perfil T, igualmente em alumínio.

Este perfil é encaixado, no local de montagem, nos cortes de secção retangular dos perfis W detalhados na Figura 3.34 e a sua fixação é garantida pela pequena patilha que estará ligeiramente dobrada. Quando pressionada, permite também a remoção do perfil T dos encaixes.

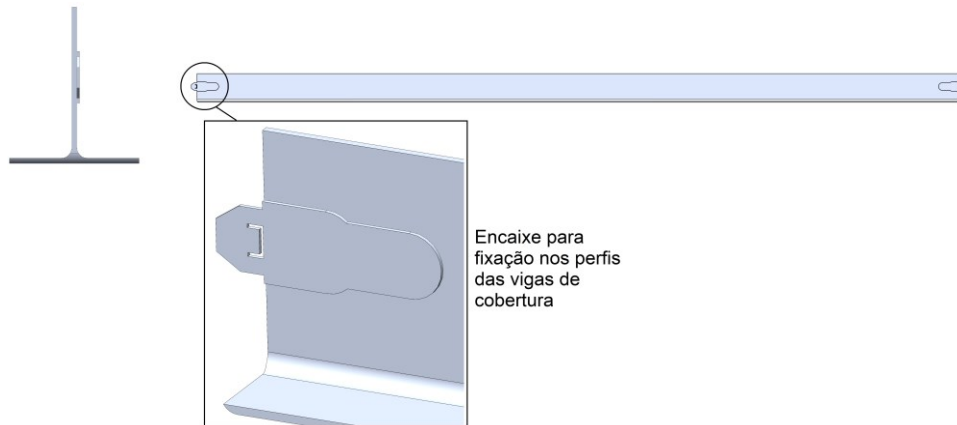


Figura 3.35 - Perfil T para encaixe nos perfis W das vigas

3.5.5.3 Placas de revestimento do teto

Após o desenvolvimento dos perfis de suporte às placas do teto falso, passou-se à criação das mesmas. As placas de revestimento de teto são compostas por OSB 3 de 6mm e uma folha de laminado a alta pressão de 1mm. No OSB é cortada numa das faces maiores, uma secção em todo o perímetro da placa, que servirá de rebordo de encaixe nos perfis, mantendo a placa suspensa. A folha de laminado, é colada em todas as faces exceto a que fica voltada para o exterior do módulo.

3.5.5.4 Placas de iluminação LED

No que diz respeito à iluminação de teto, concebeu-se uma placa luminária simplificada, composta por LED's que tal como as placas de revestimento, assenta sobre os perfis do teto falso. Embora não tenha sido explorada, outra possibilidade seria aplicar outra placa idêntica ou focos de iluminação retangulares ou redondos à venda no mercado.

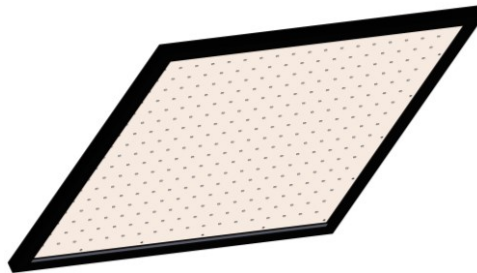


Figura 3.36 - Placa de iluminação LED

3.5.6 Revestimento do piso

No revestimento do piso, que é aplicado até aos extremos da fundação do módulo (tábuas de cintamento da fundação) utiliza-se, tal como nas restantes placas de revestimento, a combinação de uma placa OSB 3, de 8mm neste caso, com uma folha de laminado a alta pressão. Exclusivamente no piso, optou-se pela utilização de folhas de 2mm, uma vez que estão mais sujeitas ao desgaste, e também por melhorarem o desempenho aquando da aplicação de cargas de flexão, uma vez que apresentam propriedades mecânicas superiores às do OSB.

Ao longo de todo o comprimento das placas de revestimento do piso, são feitos entalhes em faces contrárias, para melhorar a vedação da união de placas adjacentes.

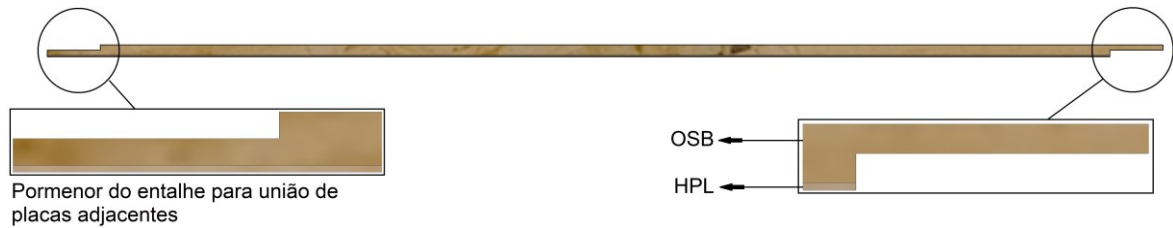


Figura 3.37 - Detalhes do revestimento do piso

Nas extremidades do módulo, junto às paredes laterais, é necessária a utilização de placas com largura superior. Ademais, nestas placas é feito apenas um entalhe.

3.5.7 Revestimento exterior (paredes e cobertura)

Pelo exterior do módulo, tanto nas paredes (longitudinais e laterais) como na cobertura, as placas de revestimento utilizadas são iguais às que se utilizam no piso (secção 3.5.6). A única distinção entre elas, é o comprimento total de cada placa, e a utilização de folhas HPL de 1mm (tal como no revestimento de paredes interiores), em vez dos 2mm. No Apêndice C, podem verificar-se as dimensões de cada uma destas placas de revestimento.

Tal como se referiu na secção 3.5.4.1, qualquer um dos revestimentos anteriormente apresentados, e inclusive o revestimento exterior, pode ser escolhido com diferentes padrões e cores graças à utilização das folhas de HPL.

3.5.8 Isolamento XPS

O isolamento térmico do módulo é realizado através de placas de espuma rígida de poliestireno extrudido (XPS).

Este produto é inerte e reciclável, e, não só proporciona isolamento térmico num amplo espectro de temperaturas, como é resistente à água, pelo que reduz o risco de infiltrações para o interior do módulo (*Isolamentos | XPS – Placogesso*, [s.d.]).

As placas XPS são utilizadas no interior das paredes (entre o revestimento exterior e interior), no interior da cobertura (entre o revestimento exterior da cobertura e as placas de teto falso) e no piso (junto à fundação). Portanto, são necessários cinco formatos diferentes de placas para preencher todos estes espaços. Isto porque, tal como nas placas de revestimento do piso e exterior, as que se situam junto às arestas verticais do módulo, têm largura superior às restantes. O mesmo acontece no caso das arestas horizontais. Por último, também nos vértices é necessário um bloco de XPS com formato específico.

Todos eles são previamente cortados à medida em fábrica, sendo que no local de montagem do módulo, a sua aplicação é rápida e intuitiva.

4 Projeto de sistemas

No projeto de sistemas, são definidos os modos e elementos de ligação e interação entre componentes, para que o produto final não seja somente um conceito, mas sim, um produto funcional. São levadas em conta as prioridades obtidas nas matrizes da qualidade e produto, que ao longo das secções que seguem, servem de ponto de partida e fator decisivo na escolha dos elementos de ligações entre componentes. Tendo em conta que este projeto se insere num contexto de economia, e tal como já foi mencionado em vários capítulos, são utilizados apenas elementos de ligação mecânica que permitam a desmontagem de todos os elementos, eliminando a necessidade de demolição, o que permite a reutilização pela reintrodução de componentes em bom estado na cadeia de produção.

4.1 *Design for Assembly*

O *Design for Assembly* (DFA) consiste na apresentação do produto na perspetiva da montagem, e da ordem lógica pela qual esta é realizada. De certa forma, o DFA pode ser visto como um manual de instruções para oferecer ao cliente um guia passo a passo da construção do módulo onde se evidenciam as ligações entre componentes, e de que forma estas se realizam.

Na secção 3.5 foram apresentados alguns detalhes de elementos de ligação e de características dos componentes do módulo. Nesse caso, foram esclarecidos previamente por se destinarem à pré-montagem em fábrica e não no local de montagem, e para darem uma visão mais esclarecedora do conceito idealizado. No entanto, nesta secção, são também apresentados elementos de ligação que se destinam igualmente à pré-montagem em ambiente de fábrica.

Em primeiro lugar, e por existirem componentes cuja dimensão depende desta, é definida uma área interior do módulo como configuração exemplo, de forma a definir os ditos elementos e outras características.

De acordo com o título, pretende-se a criação de um pequeno edifício de construção modular, pelo que, escolheu-se uma tipologia T0. Uma vez que a distância entre cada uma das placas de revestimento das paredes interiores é igual a 800mm, então, a utilização de 7 placas ao longo das paredes longitudinais do módulo, e 5 placas nas paredes laterais, perfazem uma área útil interior igual a 22.4m², o que garante o cumprimento da área mínima (Tabela 1). De lembrar que, o interior do módulo não considera paredes de divisórias, pelo que, se utilizadas, e devido à sua espessura, seria eventualmente necessária a extensão do módulo em mais uma placa ao longo das paredes longitudinais.

Primeira etapa de montagem (fundação)

A montagem do módulo inicia-se pela fundação. Em primeiro lugar, são dispostas as estacas helicoidais, conforme a disposição explícita no apêndice C. Por necessitar de um equipamento especializado para a inserção das estacas (tipo parafuso) no solo, esta etapa requer um especialista. No entanto, à exceção também da instalação dos sistemas técnicos

(que não são abordados neste projeto), as restantes etapas podem ser todas concretizadas pelo cliente, que é um dos objetivos pretendidos.

Concluída a colocação das estacas helicoidais, passa-se então à colocação das tábuas de cintamento da fundação.

Elementos de pré-montagem em fábrica (tábuas de cintamento)

Em ambiente de fábrica, são pré-montados nas tábuas de cintamento das paredes longitudinais, suportes de viga que vão tornar a montagem no local muito mais simples e rápida, uma vez que dispensa a necessidade de medições, evitando erros de montagem, melhorando assim também a qualidade e eficácia dos acabamentos, requisitos do QFD.

São utilizados suportes de viga existentes no mercado, da marca Strong-Tie, mais propriamente, do modelo SBE (Strong-Tie, [s.d.]). Estes permitem a aplicação de vigas em elementos de madeira laminada colada, entre outras, com grande resistência a esforços de carga. Para fixação dos suportes às tábuas de cintamento, utilizam-se parafusos Ø5.0 x 35mm, modelo CSA da marca Strong-Tie, recomendados para fixações entre madeira-madeira, com espessuras inferiores a 60mm.

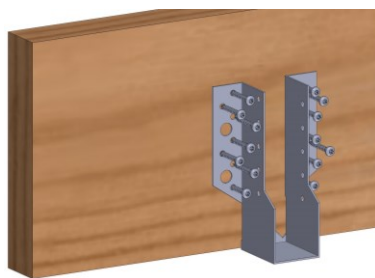


Figura 4.1 - Representação da pré-montagem em fábrica dos suportes de viga (SBE) nas tábuas de cintamento das paredes longitudinais fixos com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm

Nas tábuas de cintamento das paredes laterais, é realizada também uma operação de pré-montagem em fábrica. Neste caso, como referido na secção 3.5.3.3.2, são aparafusados pequenos elementos de madeira (similares às travessas / bloqueadores), por forma a coincidirem com o alinhamento das travessas. São utilizados parafusos Ø6.0 x 120mm, denominados TTSFS (Strong-Tie). Assim, estes pequenos elementos, garantem a ligação das tábuas de cintamento das paredes laterais, às vigas colocadas nas extremidades (junto às paredes laterais).

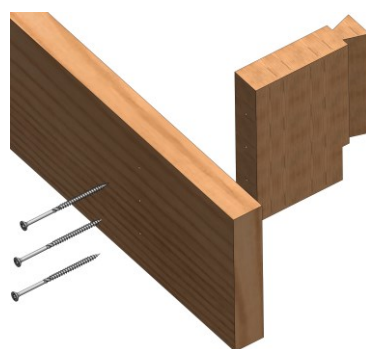


Figura 4.2 – Representação da pré-montagem em fábrica das ligações viga da fundação-tábuas de cintamento das paredes laterais da fundação, com parafusos TTSFS Ø6.0 x 120mm

Continuação da primeira etapa

Como referido, na figura abaixo vemos então as estacas helicoidais devidamente dispostas (a parte da rosca não é visível para exemplificação da sua inserção no solo), assim como a colocação das duas tábuas de cintamento das paredes longitudinais da fundação que contêm os suportes de viga pré-montados em fábrica.

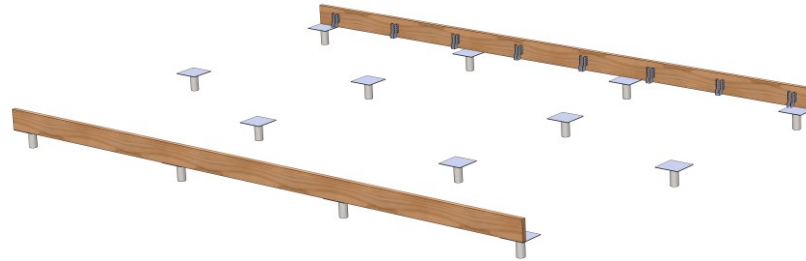


Figura 4.3 – Montagem (no local) das estacas helicoidais e das tábuas de cintamento das paredes longitudinais

Em seguida, são inseridas e aparafusadas as vigas da fundação. Estas, contêm, à semelhança das tábuas de cintamento, elementos pré-montados em fábrica que facilitam a montagem no local.

Elementos de pré-montagem em fábrica (vigas da fundação)

Tal como já foi mencionado na secção 3.5.2.2, quer nas vigas da fundação, quer da cobertura, são colocadas travessas ou bloqueadores. Estas distam de 800mm entre o seu plano central.

Por forma a criar um sistema de fixação dos mesmos nas vigas que não precise de qualquer meio de ligação mecânica (parafuso, pino, etc.) e que permita muito facilmente identificar a localização do seu encaixe nas vigas, são pré-montados em fábrica, conjuntos de três pequenos elementos de apoio, em *glulam*, ao longo de ambas as faces das vigas com distância que garante os 800mm entre travessas. Na fixação destes elementos, são apertados, em apenas uma das faces (Figura 4.4), parafusos TTSFS de Ø6.0 x 120mm (tal como nas tábuas de cintamento das paredes laterais da fundação).

No intervalo entre cada par de conjuntos de apoios para encaixe das travessas, são pré-montados, em ambas as faces das vigas da fundação e cobertura, pequenos elementos retangulares de 20x20x50mm, para apoio das placas de isolamento em XPS. A sua fixação é feita com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm.

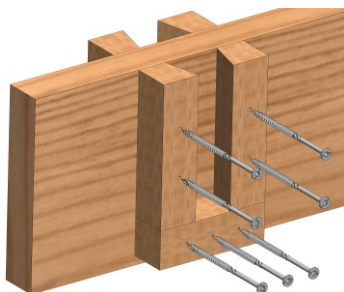


Figura 4.4 - Representação da pré-montagem em fábrica dos apoios (para encaixe das travessas / bloqueadores) nas vigas da fundação

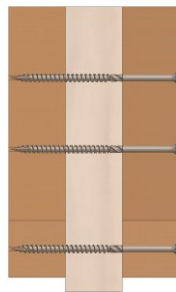


Figura 4.5 - Detalhe do comprimento dos parafusos utilizados na pré-montagem dos apoios

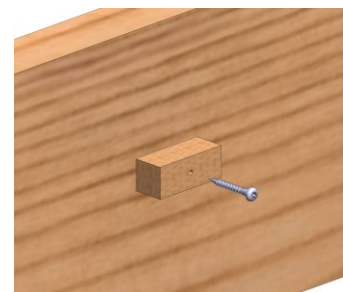


Figura 4.6 - Representação da pré-montagem em fábrica dos apoios para as placas de isolamento XPS

Continuação da primeira etapa

No local de montagem do módulo, segue-se então, a colocação das vigas da fundação que contêm os encaixes das travessas / bloqueadores previamente montados em fábrica. São inseridas uma a uma, no interior dos suportes de viga contidos nas tábuas de cintamento das paredes longitudinais, e fixas a estes, no local de montagem, com uso de parafusos CSA Ø5.0 x 35mm. As furações à esquerda e direita dos suportes de viga destinadas à passagem dos parafusos, não são concêntricas, pelo que, os parafusos não se intersejam, mesmo sendo a espessura da viga igual a 40mm.

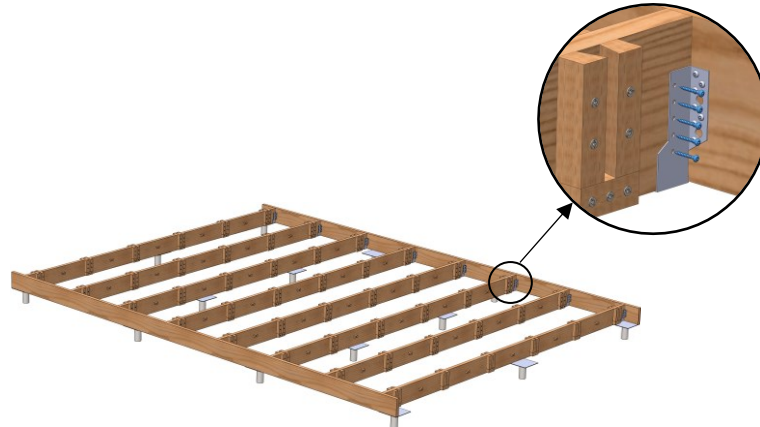


Figura 4.7 - Colocação das vigas da fundação nos suportes pré-montados das tábuas de cintamento das paredes longitudinais, e pormenor dos parafusos (a azul) de fixação no local de montagem

Após a colocação das vigas, são inseridas as tábuas de cintamento da fundação das paredes laterais. Como se pode observar no pormenor destacado à direita, na Figura 4.8, o seu posicionamento é muito simples e preciso. Basta encaixar os elementos de ligações, que vêm pré-montados de fábrica, nos apoios das vigas, que servem também ao encaixe das travessas.

Para uma fixação mais robusta, garantindo a resistência estrutural da ligação entre as paredes longitudinais e laterais, são apertados no local de montagem, esquadros reforçados (pormenor à esquerda, na Figura 4.8) da marca Strong-Tie (modelo ABR-S), indicados para uma grande variedade de materiais, incluindo madeiras maciças e laminadas coladas. No seu aparafusamento, usam-se uma vez mais, parafusos CSA Ø5.0 x 35mm.

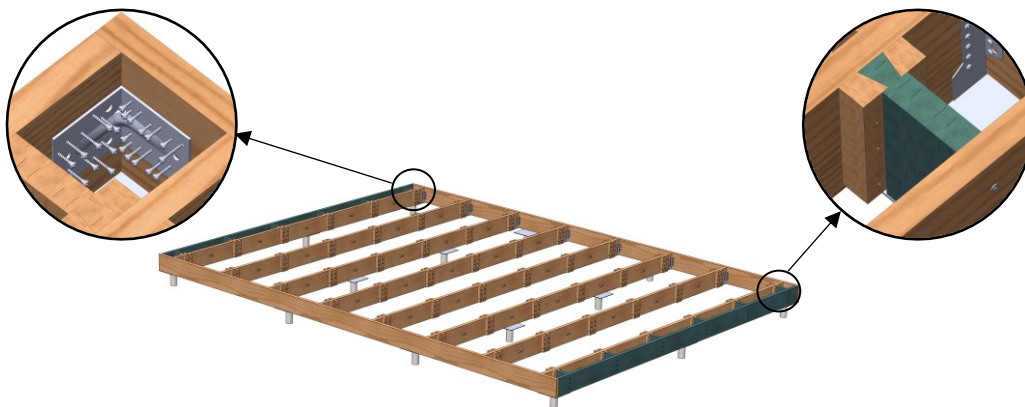


Figura 4.8 - Encaixe das tábuas de cintamento das paredes laterais (pormenor à direita) e detalhe da fixação dos esquadros (pormenor à esquerda)

Em seguida, são encaixadas todas as travessas / bloqueadores, nos respetivos apoios das vigas (pormenor detalhado na Figura 4.9).

Tal como nas vigas, nas travessas são igualmente pré-montados apoios para as placas de isolamento XPS na fase de produção, visíveis no pormenor destacado da figura abaixo.

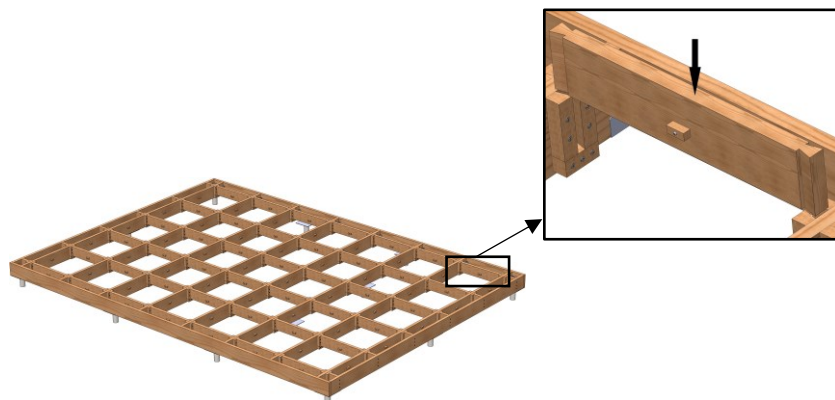


Figura 4.9 - Encaixe das travessas / bloqueadores nos respetivos apoios das vigas

Encaixadas as travessas, passa-se à colocação das placas de isolamento em XPS com espessura de 80mm.

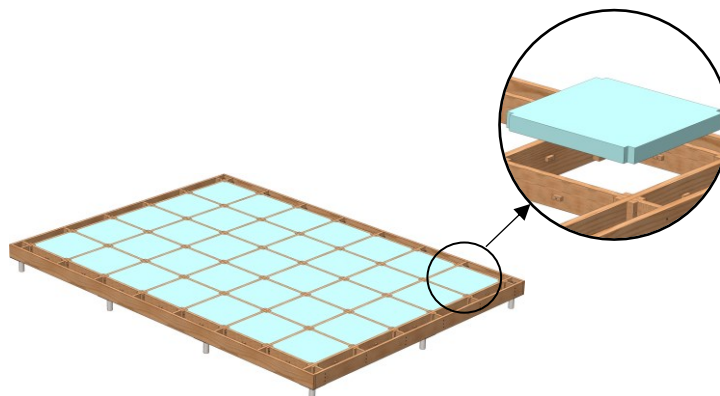


Figura 4.10 - Colocação das placas de isolamento térmico (XPS) na fundação

Por último, para finalizar esta primeira etapa de montagem na qual se forma a fundação, resta colocar e aparafusar as placas de revestimento do piso.

Na secção 3.5.6, vimos que estas possuem entalhes, previamente realizados em fábrica, que se sobrepõem entre placas adjacentes.

Também na fase de produção, são feitas furações ao longo de toda a extensão desses entalhes, que permitem a passagem de parafusos para fixação das placas, no local de montagem do módulo, aos componentes estruturais da fundação (vigas, travessas e tábuas de cintamento). Nesta fixação, utilizam-se parafusos CSA Ø5.0 x 35mm.

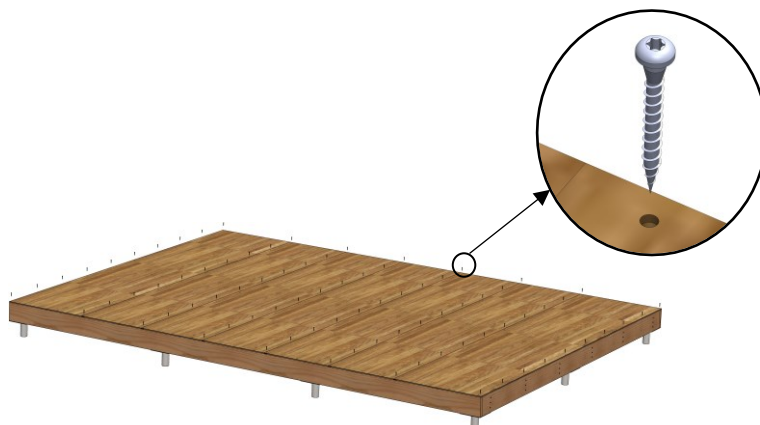


Figura 4.11 - Colocação e fixação das placas de revestimento do piso com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm

Segunda etapa de montagem

A segunda etapa de montagem do módulo, consiste em erguer a estrutura das paredes laterais e longitudinais e cobertura. Deste modo, é feita a montagem das placas inferiores, montantes e placas superiores, seguindo-se o encaixe das vigas da cobertura e travessas / bloqueadores.

Elementos e operações de pré-montagem em fábrica

Na secção 3.5.1.2, foi referida a utilização de pequenos elementos de madeira aparafusados previamente em ambiente de fábrica às placas superiores e inferiores, que permitem ao cliente a fácil identificação do posicionamento dos montantes, e funcionam também como esquadro para a ligação das placas aos montantes e vigas.

Assim, na fase de produção, são obtidos pelo corte das mesmas peças de madeira usadas para os montantes (40 x 150 mm), estes pequenos elementos, que designamos de apoio para encaixe dos montantes e vigas com 40 x 150 x 80 mm.

A estes, é feito, também em fábrica, um furo passante de Ø12mm com ajustamento P6/m6 (com aperto), para a inserção de um pino cilíndrico que impede os deslocamentos das vigas e montante, através de uma montagem no local, muito simples e rápida (Figura 4.12). Os 6 furos passantes visíveis na face superior da Figura 4.12, servem à passagem de parafusos de fixação entre os apoios e as tábuas, embora na prática sejam dispensáveis, uma vez que, segundo o fabricante, os parafusos utilizados não requerem pré-perfuração. Foram realizados para facilitar o correto posicionamento dos parafusos no software Solidworks. São utilizados os parafusos TTSFS Ø6.0 x 120mm.

Mais ainda, nos entalhes de ambos os extremos das placas, inferiores e superiores, que se cortam também em fábrica, são feitos 4 furos para passagem de parafusos de fixação entre as placas das paredes laterais e longitudinais (assinalados com setas a azul na Figura 4.13), e 5 furos para passagem de parafusos de fixação das placas inferiores às tábuas de cintamento da fundação (assinalados com setas a verde na Figura 4.13). No espaçamento entre apoios, onde serão colocados os montantes e vigas, são feitos mais 5 furos para inserção de parafusos, no local de montagem, de fixação das placas inferiores às ligações viga da fundação-tábuas de cintamento das paredes laterais da fundação (Figura 4.2). Por último, entre cada par de apoios, são também realizados, na fase de

produção, 7 furos (assinalados com setas a verde na Figura 4.14) para fixação das placas inferiores às tábuas de cintamento da fundação, no local.

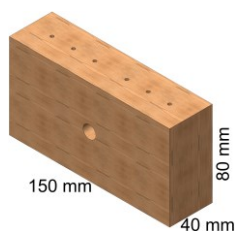


Figura 4.12 - Apoio para encaixe dos montantes e vigas

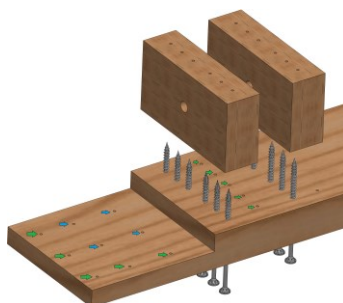


Figura 4.13 - Pré-montagem, em fábrica, dos apoios fixos com parafusos TTSFS Ø6.0 x 120mm

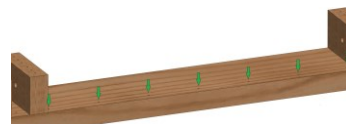


Figura 4.14 - Pré-perfuração das placas inferiores, para passagem de parafusos de fixação (TTUFS Ø6.0 x 180mm), no local de montagem, das mesmas às tábuas de cintamento

No local de montagem do módulo, o primeiro passo desta segunda etapa consiste no posicionamento das placas inferiores das paredes laterais, dado pelo alinhamento com as faces das extremidades das placas de revestimento do piso e tábuas de cintamento.

Em seguida, são colocados e aparafusados, 5 parafusos Ø6.0 x 70mm do modelo TTUFS da marca Strong-Tie em cada espaçamento entre apoios, e 7 parafusos TTUFS de Ø6.0 x 180mm, entre cada par de apoios.

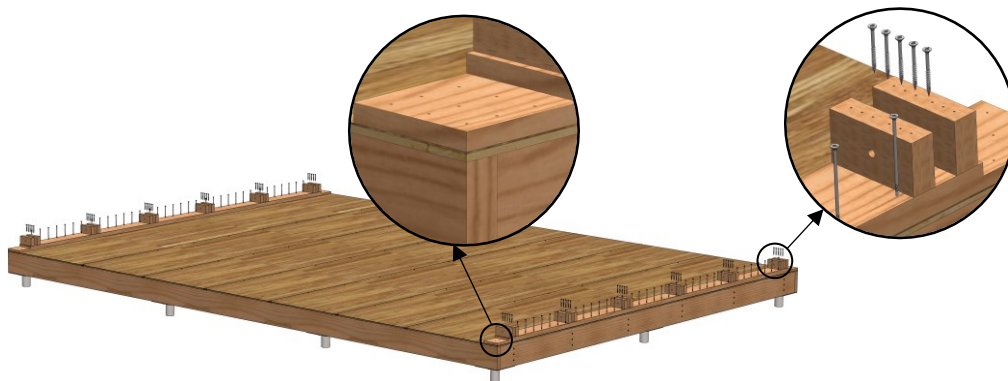


Figura 4.15 - Posicionamento das placas inferiores das paredes laterais (destaque à esquerda) e fixação com parafusos TTUFS Ø6.0 x 70mm e Ø6.0 x 180mm (destaque à direita)

Segue-se a colocação das placas inferiores das paredes longitudinais sobre as das paredes laterais previamente inseridas, que, tal como estas, são pré-montadas em fábrica com os apoios para o encaixe dos montantes, bem como feitos os entalhes e furações.

Como vemos no pormenor destacado da Figura 4.16, os entalhes das extremidades das placas das paredes longitudinais sobrepõem-se aos das placas das paredes laterais.

Para fixação, na zona dos entalhes (destacada na imagem), são usados 5 parafusos TTUFS Ø6.0 x 180mm que unem as duas placas às tábuas de cintamento, e 4 parafusos CSA Ø5.0 x 35mm, que reforçam a fixação somente das placas.

À semelhança das placas inferiores das paredes laterais, são usados 5 parafusos TTUFS Ø6.0 x em cada espaçamento entre apoios, e 7 parafusos TTUFS de Ø6.0 x 180mm, entre cada par de apoios.

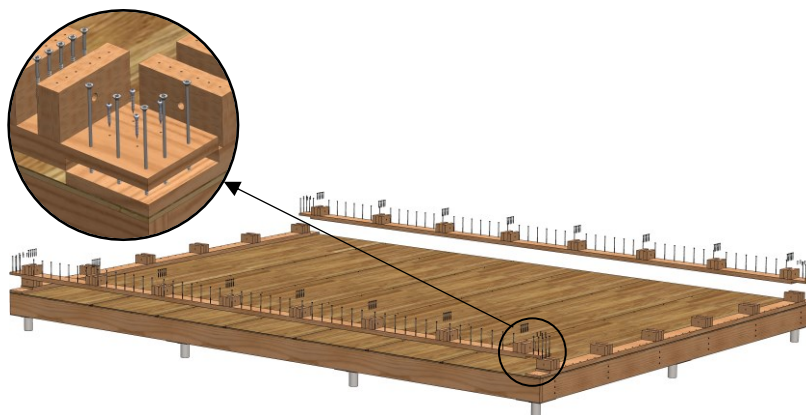


Figura 4.16 - Colocação e fixação das placas inferiores das paredes longitudinais

Tendo sido as placas inferiores posicionadas e devidamente aparafusadas, passa-se à montagem dos montantes.

Elementos e operações de pré-montagem em fábrica (montantes, réguas, e placas superiores)

Na fase da produção dos montantes, é realizado um furo em cada extremo destes, destinado à colocação dos pinos cilíndricos de 12mm para fixação dos montantes às placas superiores e inferiores. Ao longo do montante, são também aparafusados, em ambas as faces, apoios / batentes para as placas de isolamento XPS das paredes, usando parafusos CSA Ø5.0 x 35mm.



Figura 4.17 - Montante pré-perfurado para fixação por pino cilíndrico, e aparafusado com apoios para placas de isolamento XPS

Aos montantes, são ainda aparafusadas as Régua para encaixe das placas de revestimento interior e passagem de sistemas técnicos. Existem 3 variantes de montantes previamente aparafusados com réguas: com duas réguas, com uma régua à esquerda e com uma régua à direita. Isto porque, nos cantos do módulo, não é necessária a utilização de duas réguas.

Para que os parafusos de fixação das réguas aos montantes não se intersetem, no caso dos que são pré-montados com duas réguas, na produção destas, são concebidas duas variantes, em que a única diferença, é a cota dos furos de passagem dos parafusos de fixação ao longo das réguas, tendo sido nomeadas como régua esquerda e régua direita, para distinção.



Figura 4.18 - Montante com duas régua (esquerda e direita) pré-montadas pela fixação com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm

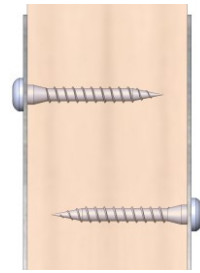


Figura 4.19 - Detalhe da furação excêntrica entre régua e montante

Relativamente às placas superiores das paredes longitudinais e laterais, são, assim como nas placas inferiores, pré-montados em fábrica apoios para encaixe dos montantes e vigas. Com a diferença que, nas placas superiores, estes são montados quer acima, quer abaixo das placas, para que seja possível a fixação tanto dos montantes como das vigas da cobertura. Por conseguinte, são usados parafusos TTUFS Ø6.0 x 180mm, em vez dos TTUFS Ø6.0 x 120mm usados na montagem dos apoios nas placas inferiores (Figura 4.13).

Também no que diz respeito às furações efetuadas nas placas, estas são diferentes em relação às das placas inferiores. Nas placas superiores, são feitas apenas as furações nos extremos (nas faces com entalhe) e as furações para passagem dos parafusos de fixação dos apoios referidos anteriormente, todas nas mesmas cotas que as das placas inferiores, o que facilita imenso o processo de fabricação.

Continuação da segunda etapa

No local de montagem, são encaixados os montantes dos cantos do módulo. Isto é, os montantes com uma régua à direita (do ponto de vista do interior do módulo, para o exterior) e os montantes com uma régua à esquerda, que, para distinção, se encontram coloridos a verde. Em seguida, são colocados os pinos cilíndricos (EN ISO 2338 – 12 m6 x 120 - St) com o auxílio de um martelo, visto que o seu ajustamento é com aperto.

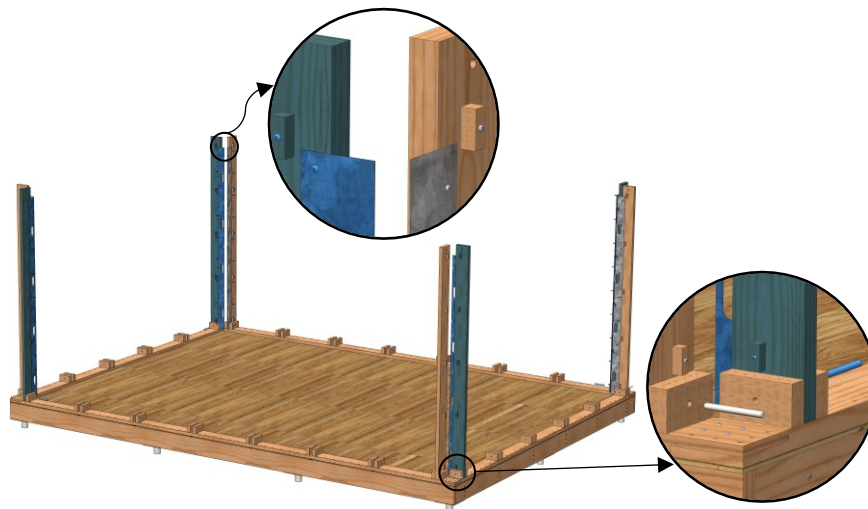


Figura 4.20 - Encaixe e fixação inferior por pino cilíndrico dos montantes das arestas verticais do módulo

Posteriormente, inserem-se as placas superiores das paredes laterais sobre os montantes nos respetivos encaixes, e em seguida, da mesma forma, as placas superiores das paredes longitudinais. Por fim, são colocados os pinos cilíndricos que atravessam os apoios da face inferior das placas, e são apertadas as placas, na zona dos entalhes (nas extremidades) através de parafusos CSA Ø5.0 x 35mm.

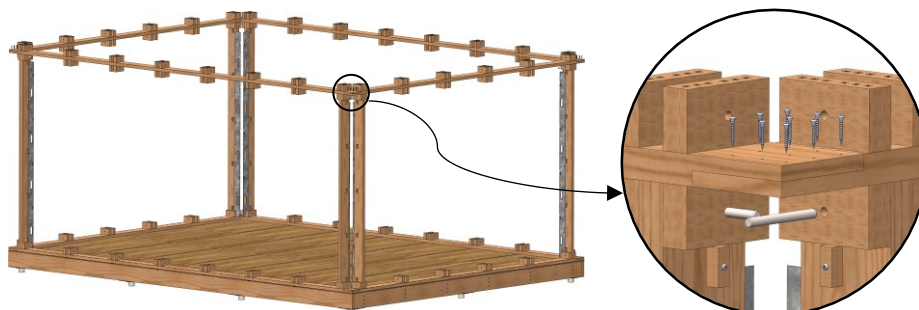


Figura 4.21 - Montagem das placas superiores e pormenor das fixações dos montantes (com pinos cilíndricos) e placas (com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm)

Prosseguindo, podem agora encaixar-se todos os montantes com duas réguas, e fixá-los tanto nas placas inferiores como superiores, através dos pinos cilíndricos, da mesma forma que é feito para os montantes previamente instalados.



Figura 4.22 - Finalização da montagem dos montantes

Elementos e operações de pré-montagem em fábrica (vigas da cobertura e elementos de ligação entre placas superiores das paredes laterais e vigas da cobertura)

Em fábrica, são previamente montados os apoios para encaixe das travessas / bloqueadores, e também os pequenos elementos de apoio para as placas de isolamento em XPS, tal como é feito para o caso das vigas da fundação, demonstrado na Figura 4.4 e Figura 4.6, respetivamente. Adicionalmente, nas vigas da cobertura são ainda previamente fixos com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm os perfis de teto falso, que servem igualmente à passagem de sistemas técnicos.

Como referido na secção 3.5.2.3, são criados pequenos elementos de ligação entre as placas superiores das paredes laterais e as vigas da cobertura, praticamente iguais aos que são pré-montados nas tábuas de cintamento das paredes laterais (Figura 4.2).

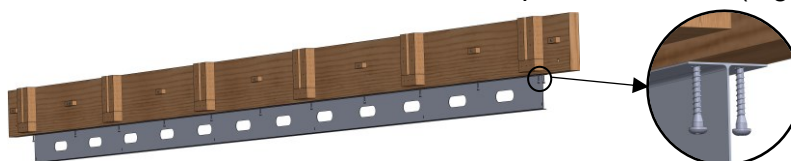


Figura 4.23 - Operação de pré-montagem dos perfis de teto falso nas vigas de cobertura com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm



Figura 4.24 – Ligação viga da cobertura – placa superior das paredes laterais

Continuação da segunda etapa

A montagem das placas superiores, cria, através dos apoios contidos nas suas faces superiores, um espaço confinado para o encaixe das vigas da cobertura e dos elementos de ligação entre as vigas das extremidades junto às placas das paredes laterais, e as próprias. A sua fixação é dada através dos pinos cilíndricos, tal como nos montantes.

Concluída a montagem das vigas e dos pequenos elementos de ligação, são inseridas as travessas / bloqueadores da mesma forma que é demonstrado na Figura 4.9.

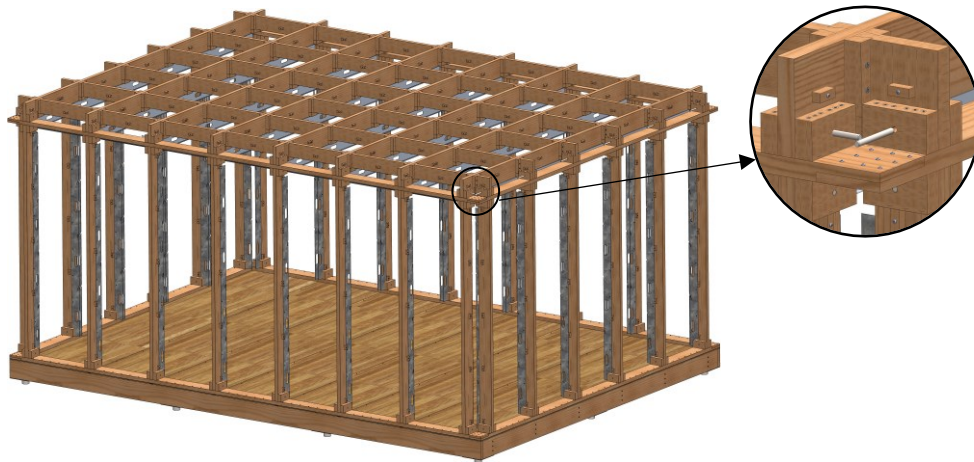


Figura 4.25 - Montagem das vigas da cobertura, das ligações entre placas laterais e vigas das extremidades, e das travessas / bloqueadores

Para finalizar a segunda etapa de montagem, são montados os perfis T (secção 3.5.5.2) com encaixes (Figura 3.35) que se inserem nos cortes dos perfis pré-montados nas vigas da cobertura (Figura 3.34). Na figura abaixo, representativa dos perfis devidamente montados (coloridos a azul para destaque), foram ocultados vários componentes do módulo para melhor visualização dos perfis do teto falso. A perspetiva da figura, simula a visão do interior do módulo para o exterior, olhando para o teto.

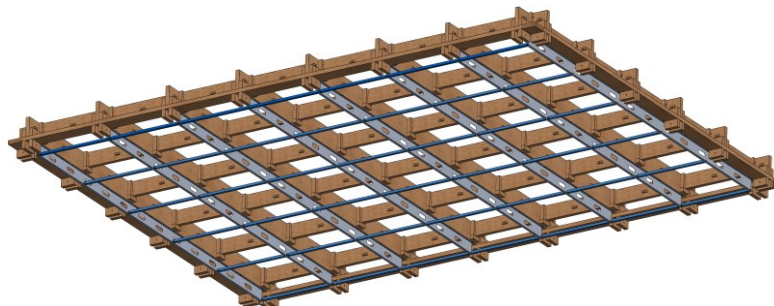


Figura 4.26 – Montagem dos perfis T (representados a azul) de encaixe nos perfis W das vigas da cobertura

Embora a montagem dos perfis seja bastante intuitiva, é de notar que, uma vez que os encaixes situados nas extremidades são fixos na mesma face, é necessário rodar os perfis 180° (relativamente ao eixo vertical) em relação ao seu antecedente já encaixado. Esta situação representa-se na figura abaixo, em que, o perfil T colorido a azul, se encontra rodado 180° em relação ao anterior, garantindo que as faces dos perfis coincidem, mas os encaixes ficam em lados opostos.

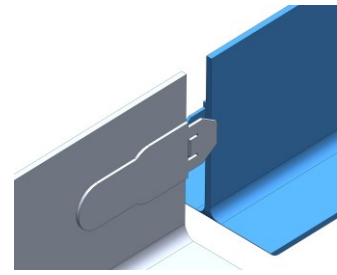


Figura 4.27 - Rotação dos perfis T de encaixe

Terceira etapa de montagem

A terceira etapa de montagem, consiste no revestimento do interior do módulo. Ou seja, a montagem das placas do teto falso e placas de luzes led, e, nas paredes, das placas de revestimento pré-montadas em fábrica com os mancais e porcas de garra.

A ordem de montagem é indiferente. Neste caso, começamos pela montagem das placas de revestimento do teto falso.

Escolheu-se uma cor clara, que geralmente é o utilizado nos tetos. No entanto, tal como já foi referido anteriormente, uma vez que as placas contêm uma folha de laminado e que existem inúmeras possibilidades de padrões e cores, poderiam ser escolhidas outras opções. São ainda colocadas quatro placas de iluminação led, com caixilharia de cor igual às placas de revestimento.

A montagem de ambos os componentes é muito simples. Como mencionado na secção 3.5.5.3, as placas de revestimento contêm um entalhe / aba a toda a sua extremidade, que permite o encaixe sobre os perfis W e T.

Para permitir uma melhor visualização do resultado final da montagem dos componentes, foram ocultados alguns montantes.

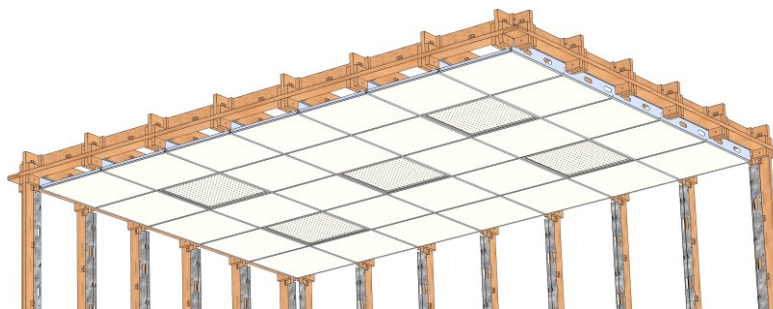


Figura 4.28 - Montagem das placas de revestimento do teto e placas de iluminação LED

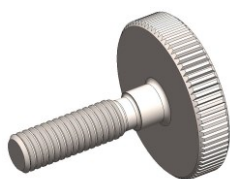
Após a montagem dos componentes do teto falso, segue-se a montagem dos componentes do revestimento interior das paredes, previamente apresentados, sob a forma de conceito, na secção 3.5.4.1.

Foi realizada uma alteração ao conceito do mancal com pino, que consistiu em reduzir o número de furos para passagem de rebites de fixação de quatro, para dois. Dessa forma, também as placas de revestimento passam a ter apenas dois furos de cada lado. Além

disto, foi definido que o material constituinte dos mancais é o aço galvanizado, tal como nas réguas. Assim, a sua fabricação é dada, pelo processo de quinagem, o que facilita a sua produção. Os restantes furos para a pré-fixação das porcas de garra DIN 1624 em fábrica, e para a passagem de parafusos que fixam umas placas às outras, mantêm-se.

No local de montagem, são então encaixadas as placas de revestimento nas réguas, através dos mancais com pino. Todas as fixações das placas, sancas e rodapés, na zona dos entalhes na qual se encontram as porcas de garra, são garantidas pelo uso de parafusos recartilhados DIN 653.

As placas junto ao piso devem ser previamente fixas juntamente com os rodapés, uma vez que estes são unidos pela face de trás (Figura 4.31).



*Figura 4.29 -
Parafusos
recartilhados - DIN
653*



*Figura 4.30 -
Fixação dos
rodapés às placas
junto ao piso*



*Figura 4.31 - Fixação
das sancas às placas
junto ao teto*

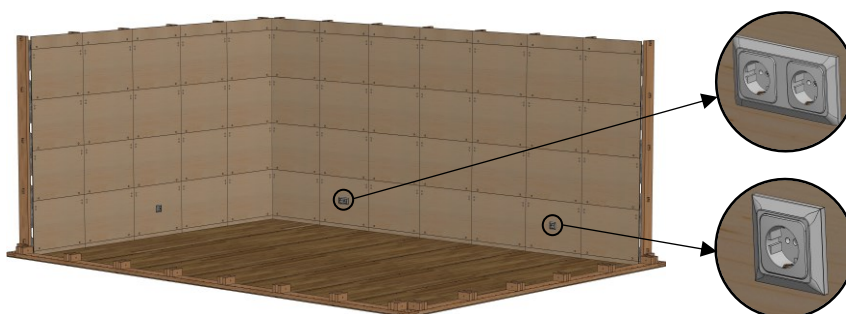


Figura 4.32 - Montagem das placas de revestimento das paredes interiores, sancas e rodapés. Tomada dupla obtida no grabcad por (scarus, 2020a)

Quarta etapa de montagem

A quarta, e última etapa, diz respeito à colocação das placas de isolamento térmico em XPS nas paredes e cobertura, pelo exterior, e da montagem das placas de revestimento exterior que se aparafusam posteriormente. Por último, é colocado o aro do módulo.

Como se pode observar pela figura que se segue, as placas de XPS encaixam nos montantes, vigas e travessas, de forma igual ao que se demonstrou na Figura 4.10 para o caso do isolamento térmico da fundação. É deixada uma abertura para porta, e podem ser deixadas outras para montagem de janelas. No entanto, estes elementos não foram concebidos.



Figura 4.33 - Colocação das placas de isolamento térmico XPS nas paredes e cobertura

Segue-se a montagem das placas de revestimento exterior. A sua fixação é dada pelo aparafusamento aos montantes (no caso das placas das paredes), e às vigas da cobertura (no caso das placas de cobertura) usando parafusos CSA Ø5.0 x 35mm. Para um melhor aspeto estético, podem ser posteriormente colocadas tampas de parafuso da mesma cor escolhida para o revestimento.

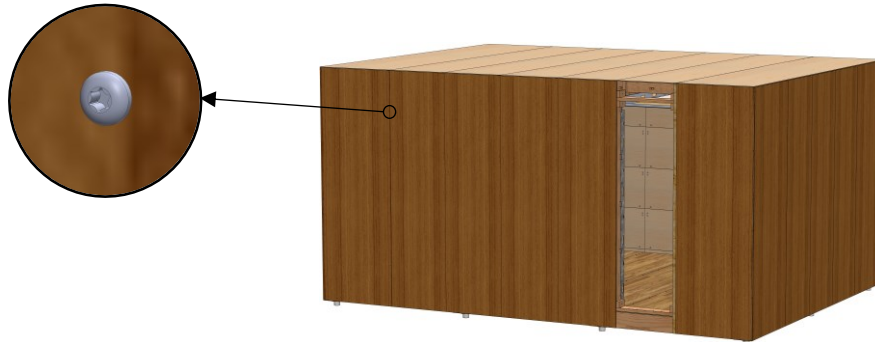


Figura 4.34 - Montagem das placas de revestimento exterior com parafusos CSA Ø5.0 x 35mm

Finalmente, para concluir a montagem do módulo, é inserido, de cima para baixo, o aro do módulo.

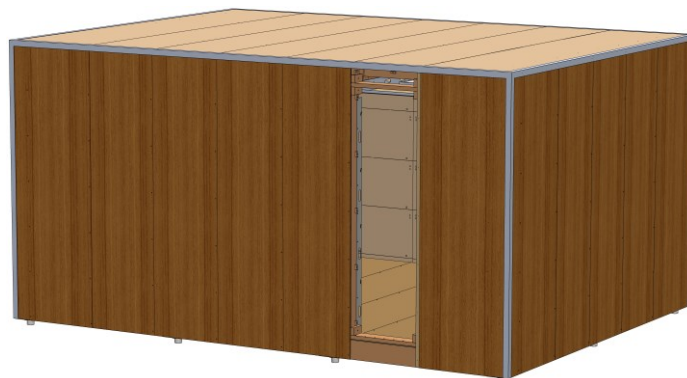


Figura 4.35 - Colocação do aro do módulo

4.2 Simulação e análise estrutural

4.2.1 Materiais e as suas propriedades mecânicas

4.2.1.1 Madeira laminada colada (*Glulam*)

A madeira é um material anisótropo uma vez que, as suas propriedades físicas e mecânicas, são diferentes consoante a direção da aplicação da força. Posto isto, na Tabela 3, são apresentadas as propriedades mecânicas da madeira laminada colada, mais conhecido como *glulam*, para a direção paralela e perpendicular ao grão, bem como a condutividade térmica e reação ao fogo. Escolheu-se utilizar *glulam* do tipo GL 24h, uma vez que é um dos mais comercializados e apresenta boas propriedades mecânicas.

Tabela 3 – Propriedades da *glulam* do tipo GL24h [(HASSLACHER NORICA TIMBER - From wood to wonders., [s.d.])]

Propriedades		Valor	Unidades
Módulo de Elasticidade	$E_{0,g,média}$	11.50e+03	MPa
	$E_{90,g,média}$	300.00	MPa
Módulo de cisalhamento	$G_{g,média}$	650.00	MPa
Densidade mássica	$\rho_{g,média}$	420.00	kg / m ³
Tensão de rutura (à tração)	$f_{t,0,g,k}$	19.20	MPa
	$f_{t,90,g,k}$	0.50	MPa
Tensão de rutura (à compressão)	$f_{c,0,g,k}$	24.00	MPa
	$f_{c,90,g,k}$	2.50	MPa
Condutividade térmica	λ	0.13	W / (m.K)
Reação ao fogo		D - s2 d0	N / A

4.2.1.2 Liga de alumínio

Para a fabricação dos perfis “W” e “T” que estruturam o teto falso, decidiu-se que o material a utilizar deve ser o alumínio, mais propriamente, da liga 6061-T4. O alumínio é largamente utilizado na indústria da construção civil, e, sobretudo por se tratar de perfis, a sua fabricação através da extrusão é bastante precisa. Além dos perfis do teto falso, também o aro do módulo, composto igualmente por perfis (neste caso em “L”), é composto por esta liga de alumínio. O alumínio, quando produzido através do reaproveitamento de material reciclado compatível que permita a produção da liga pretendida, tem uma baixa taxa de consumo energético, o que o torna um material pouco poluente (nessas condições).

Tabela 4 – Propriedades do alumínio da liga 6061-T4 no Solidworks

Propriedades	Valor	Unidades
Módulo de Elasticidade	69.00e+03	MPa
Coeficiente de <i>Poisson</i>	0.33	N / A
Tensão de rutura	240.00	MPa
Tensão de cedência	227.53	MPa
Coeficiente de expansão térmica	2.40e-05	/K
Densidade mássica	2700.00	kg / m ³

4.2.1.3 Aço galvanizado

Na secção 3.4, na qual se compararam o aço, madeira e betão em relação à sua recuperabilidade em fim de vida, e o aço e madeira relativamente ao impacto ambiental, pudemos concluir que o aço tem um enorme potencial de recuperação para fins de reutilização, o que é de extrema importância no contexto deste projeto. Para mais, o seu impacto ambiental é também reduzido, sobretudo quando a sua produção é baseada no aproveitamento de uma grande percentagem de material reciclado.

Pelas razões mencionados, escolheu-se o aço para a fabricação das régua de suporte e encaixe das placas de revestimento das paredes interiores (secção 3.5.4.2).

Uma vez que o preço do aço galvanizado é consideravelmente inferior ao do aço inoxidável, e que as régua de suporte se encontram no interior do módulo, sem exposição direta ou indireta às condições atmosféricas, optou-se pela sua escolha para o caso deste componente.

Tabela 5 - Propriedades do aço galvanizado no Solidworks

Propriedades	Valor	Unidades
Módulo de Elasticidade	200.00e+03	MPa
Coeficiente de <i>Poisson</i>	0.29	N / A
Tensão de rutura	356.90	MPa
Tensão de cedência	203.94	MPa
Densidade mássica	7870.00	kg / m ³

4.2.1.4 OSB 3 (Oriented Strand Board)

Como mencionado ao longo da secção 3.5, optou-se por escolher o OSB 3 para o revestimento exterior e interior do módulo.

As placas de OSB são fabricadas através da colagem de fibras de madeira com uso de resinas sob elevadas pressões e temperaturas. Embora a utilização de elevadas pressões e temperaturas no processo de produção requeira um consumo considerável de energia, mais de 75% desta é proveniente da queima de resíduos de madeira e madeira recuperada (SMARTPLY OSB | MEDITE SMARTPLY, [s.d.]).

Mais ainda, além de poderem ser fabricadas com uso de uma mistura entre madeiras virgens e recicladas, as madeiras virgens utilizadas dizem respeito a espécies de crescimento rápido como pinheiro e abeto, dos quais se aproveita a integridade da madeira inclusive os ramos das copas, e pedaços com nós, que na produção de qualquer outro produto à base de madeira seriam rejeitados. Quer isto dizer que, o OSB se integra

perfeitamente numa perspetiva de economia circular, uma vez que pode (e deve) fazer uso dos desperdícios da produção de outros materiais de madeira.

Embora seja um material anisótropo tal como a *glulam*, nas simulações efetuadas são aplicadas forças somente na direção perpendicular, pelo que foram utilizadas as propriedades mecânicas para o material OSB fabricado pela Egger presente nos materiais do Solidworks, que, quando comparadas com as propriedades mecânicas do OSB de outro fabricante (*SMARTPLY OSB | MEDITE SMARTPLY*, [s.d.]) se conclui que correspondem aos valores obtidos para os esforços na direção perpendicular.

Tabela 6 - Propriedades do OSB 3 [(Solidworks); [(SMARTPLY OSB | MEDITE SMARTPLY, [s.d.]])]

Propriedades	Valor	Unidades
Módulo de Elasticidade	3500.00	MPa
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.23	N / A
Densidade mássica	600.00	kg / m ³
Tensão de rutura (à tração)	7.20	MPa
Tensão de rutura (à compressão)	12.90	MPa
Condutividade térmica	0.13	W / (m.K)
Reação ao fogo (paredes e teto)	D - s2 d0	N / A
Reação ao fogo (pavimento)	D _{fl} -s1	N / A

4.2.2 Análise estrutural do conceito

Por forma a validar os componentes criados durante a fase de desenvolvimento do conceito, são realizadas algumas simulações usando a componente FEA (*Finite Element Analysis*) do *Solidworks*.

4.2.2.1 Viga da cobertura

O primeiro componente sujeito a simulação foi a viga da cobertura. Uma vez que os elementos que a esta são aparafusados previamente em fábrica acrescentam grande esforço computacional durante a simulação, foram eliminados para este procedimento. No entanto, a sua massa foi contabilizada.

Na definição das propriedades dos materiais, consideram-se para a viga as propriedades referentes à direção perpendicular ao grão (0,g) e para as colunas, à direção paralela ao grão (90,g).

Para simular a carga dos componentes que causam esforços na viga da cobertura, fez-se um levantamento desses mesmos componentes. Cada viga de cobertura sustenta, para além da sua própria massa (incluindo todos os elementos de pré-montagem), 12 travessas / bloqueadores, 10 placas de isolamento XPS, 10 placas de revestimento do teto falso, 12 perfis T de encaixe nos perfis W, e 2 placas de revestimento da cobertura. Tendo em conta que metade da massa de cada um destes componentes é suportada pelas vigas de cobertura imediatamente à esquerda e direita, são então considerados, metade de cada um deles.

Tabela 7 - Número e massa de componentes que implicam esforços nas vigas da cobertura

Quantidade	Componente	Massa aproximada (kg) / unid.
1	Viga pré-montada	20.0
6	Travessas / Bloqueadores	1.9
5	Placas de isolamento XPS	1.5
5	Placas de revestimento do teto falso	2.6
1	Placa de revestimento da cobertura	22.0
6	Perfis T de encaixe nos perfis W	0.7

Contabilizando a massa total dos componentes, obtêm-se o valor de 78.1 kg. Para efeitos de arredondamento, considerou-se, na simulação, uma carga distribuída de 80 kg. Foi também considerada a aceleração gravítica com valor de 9.8 ms^{-2} . Na figura abaixo, vemos, na imagem à esquerda, o vetor da aceleração gravítica (seta a vermelho) e as faces de encastramento, que correspondem às faces inferiores das placas inferiores (às quais são fixos por pino os montantes). À direita, a face superior das vigas de cobertura, à qual, além da força gravítica é então adicionada a carga distribuída de 80 kg.

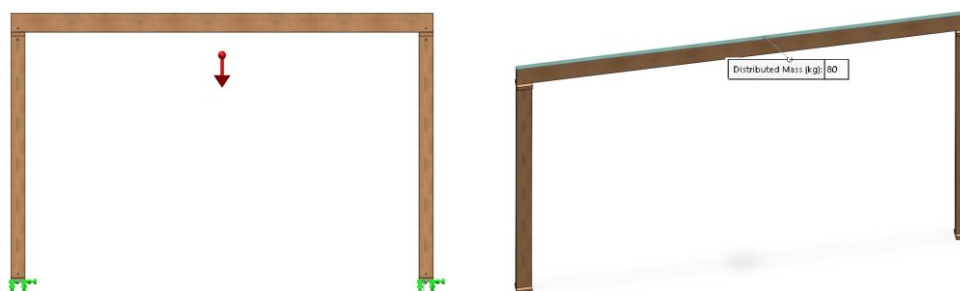


Figura 4.36 - Faces encastradas, sentido da aceleração gravítica e face de aplicação da carga distribuída

Na análise estática à simulação e usando um controlo de malha refinado com 29 pontos Jacobianos, foi obtido um deslocamento máximo de aproximadamente 3.6 mm, como verificamos pela figura abaixo.

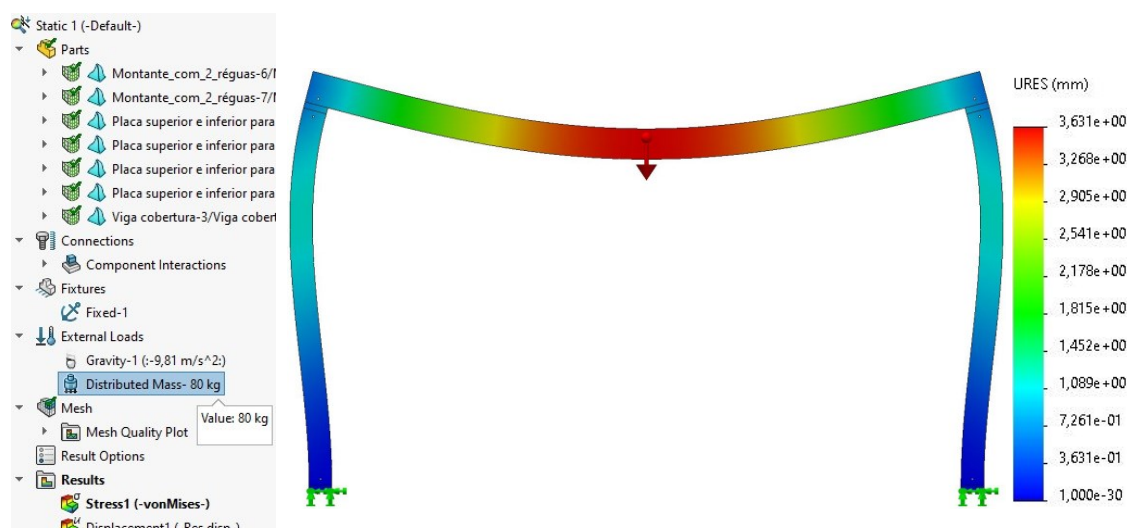


Figura 4.37 - Resultado à simulação de carga fletora na viga de cobertura - flecha

4.2.2.2 Montante

Em seguida, avaliou-se o comportamento do montante, em análise estática, à aplicação da carga gravitacional e dos componentes que a este aplicam esforços no sentido vertical. Tal como para a viga da cobertura, foi feito um levantamento da massa desses componentes.

Neste caso, como cada viga de cobertura se encontra suportada por dois montantes, significa que, dos componentes contabilizados que causam esforços de flexão nas vigas, se considera apenas metade desses em relação aos esforços no eixo vertical dos montantes, causados pelos componentes da cobertura.

No entanto, nos montantes é ainda necessário adicionar a massa das placas de revestimento interior que são colocadas nas régua fixas aos mesmos, e a massa das placas de revestimento exterior das paredes. Tal como nas vigas de cobertura, embora a cada montante sejam fixas placas à esquerda e à direita destes, quer pelo interior quer pelo exterior, metade da massa de cada um destes componentes é suportada pelos montantes adjacentes, pelo que, são então considerados, metade de cada um deles.

Tabela 8 - Número e massa de componentes que implicam esforços nos montantes

Quantidade	Componente	Massa aproximada (kg) / unid.
4	Placa de revestimento das paredes interiores pré-montada	2.6
1	Placa de revestimento das paredes exteriores	15

Contabilizando a massa dos componentes anteriores, obtêm-se uma massa igual a 25.4 kg. Este é o valor de carga que é aplicada sob a forma de carga distribuída, pois as placas estão dispostas ao longo de todo o montante. Por outro lado, no caso dos componentes da cobertura, a força não é aplicada de forma distribuída, mas sim de uma força externa aplicada na face superior do montante. Assim, contabilizando a massa de uma viga de cobertura pré-montada e metade da massa dos restantes componentes referidos na Tabela 7, obtêm-se o valor de 49.05 kg. Como as unidades da força são em Newton, é necessário multiplicar este valor, pelo valor da aceleração gravítica, resultando, aproximadamente, em 481.2 N. Foi também considerada a aceleração gravítica com valor de 9.8 ms^{-2} no caso da massa distribuída.

Na Figura 4.38, que se apresenta em seguida, à esquerda os valores das cargas aplicadas na análise estática, ao centro a direção do vetor da aceleração gravítica (seta a vermelho), a faces de encastramento (a verde) e a face e direção de aplicação da força de 481.2 N. À direita, as faces de aplicação da carga distribuída, igual a 25.4 kg.

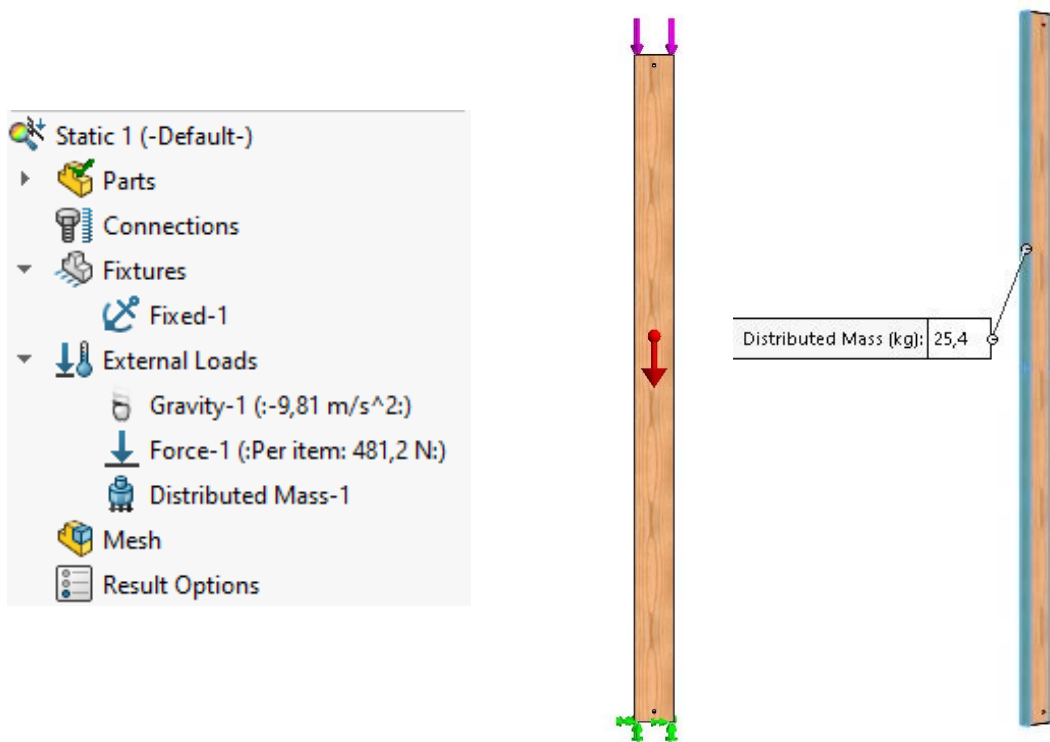


Figura 4.38 – Cargas aplicadas na simulação ao montante, Face encastrada e aceleração gravítica

Usando, à semelhança da viga da cobertura, um controlo de malha refinado com 29 pontos Jacobianos, foi obtido um deslocamento máximo de aproximadamente 0.9 mm, como verificamos pela figura abaixo.

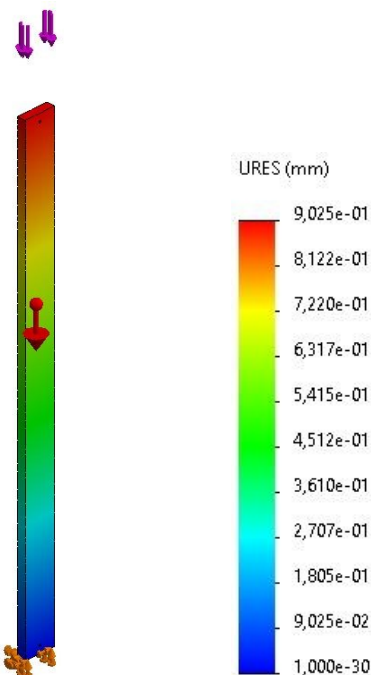


Figura 4.39 - Resultado à simulação das cargas fletoras no montante - flecha

4.2.3 Análise de resultados

As simulações efetuadas, embora em número muito reduzido e com relativamente pouco detalhe, permitem retirar algumas conclusões no que diz respeito aos componentes estruturais da viga de cobertura e do montante.

As análises estáticas, consideraram somente a carga gravitacional dos próprios componentes da estrutura da cobertura (no caso da viga) e da cobertura e paredes (no caso do montante). Não foram desenvolvidas análises a eventuais cargas externas, pelo que, os resultados obtidos, representam as flechas mínimas obtidas nos componentes simulados após a sua montagem com os restantes elementos e componentes que completam o módulo.

Da análise dos resultados, é possível concluir que a flecha máxima obtida para a viga de cobertura, igual a 3.6 mm, embora não seja muito elevada, quando o componente estiver sujeito a outros esforços, como vento, ou eventualmente o peso de uma pessoa sobre a mesmo, a integridade dos elementos que interagem com a viga de cobertura, como os perfis W, T e as placas de teto falso, poderá ficar comprometida.

No caso das vigas da fundação, visto que são utilizadas vigas de igual secção às da cobertura e que as mesmas se encontram sujeitas as cargas consideravelmente superiores, que por suportarem o peso de todo o módulo, quer de componentes de recheio da habitação (móveis, sofás, etc.), a sua flecha máxima, será, em princípio superior. No entanto, carece de análise com base em simulações, até porque, uma vez que essas vigas são apoiadas sobre várias estacas helicoidais, inclusive alguns localizados a meio das vigas, zona onde a flecha é máxima, eventualmente, poderão nem ser necessárias vigas de secção diferente das que se utilizam na cobertura.

Por último, em relação aos montantes, e tendo em conta o resultado obtido no ensaio à flexão, o deslocamento máximo obtido, igual a 0.9 mm, não representa uma situação alarmante no que se refere à integridade estrutural do componente, ou dos que a este se interligam.

5 Proposta final

No projeto de sistemas, foi apresentado o conceito do pequeno edifício de construção modular concebido, onde se verificou que este cumpre com a maioria dos objetivos propostos. Contém uma solução de passagem a sistemas técnicos, bem como uma alternativa interessante no sentido de garantir uma rápida e fácil acessibilidade aos componentes, oferecendo igualmente a possibilidade da adaptabilidade de placas de revestimento interior que contenham elementos funcionais de acabamentos, como tomadas, interruptores, entre outros. Esta poderá necessitar de serviços especializados, no entanto, muito mais simples e rápidos do que os procedimentos que seriam necessários, por exemplo, no caso de paredes com revestimento em *pladur*. Mais ainda, é garantido o isolamento térmico através de placas em XPS de aplicação muito simples.

A utilização de vários componentes pré-montados em fábrica, permite ao cliente uma montagem no local descomplicada, e com poucos elementos de fixação diferentes entre si, o que torna esse processo mais expedito reduzindo imenso o tempo de montagem. Além disso, como se pode comprovar pelos desenhos técnicos apresentados no Apêndice C, esses elementos pré-montados são relativamente leves, cumprindo o objetivo da montagem sem necessidade de guias, ou de mais do que duas pessoas para o manuseamento dos componentes.

Apesar disto, os requisitos da percentagem de envidraçados (dada pela montagem de janelas) e do número de acessos (portas), não foram explorados. Foram então criadas, de uma forma simples e acima de tudo representativa, visto que os sistemas de fixação ou reforço de vão não foram considerados, duas janelas e uma porta. Na Figura 5.1, apresenta-se uma proposta concetual do aspeto final do módulo que inclui estes três elementos de acabamentos finais.



Figura 5.1 - Proposta de produto final

6 Conclusões

6.1 Conclusões

O tema da economia circular e a sua relação e implementação no seio da construção modular, tem ainda um longo caminho a percorrer no que diz respeito à adoção de práticas mais concretas e medidas efetivas para aplicação dos fundamentos que, de maneira geral, ditam aquilo que se entende por economia circular. Mais marcadamente, reconhece-se a necessidade de mudar o paradigma atual através da alteração do sistema das cadeias de abastecimento para a produção de componentes, de um sistema no qual os recursos extraídos e utilizados na fase de produção, acabam, no fim de vida do produto, em aterros ou lixeiras.

Esta dissertação, desenvolvida no âmbito desse tema com o objetivo de conceber um pequeno edifício de construção modular, cumpre, de modo geral, com os objetivos e medidas propostas para a modelação de um conceito que contribui para a diminuição da pegada ecológica, através da escolha ponderada e justificada do material que compõe a estrutura do módulo, a madeira colada laminada. A análise de estudos que comparam a influência dos materiais mais utilizados na indústria da construção de edifícios (aço, madeira e betão), permitiu concluir que a madeira tem uma elevada taxa de recuperação para fins de reutilização e reciclagem, principais medidas da economia circular. Mais ainda, a madeira, material orgânico considerado por muito autores como carbonicamente neutro, revela ter um impacto inferior no que diz respeito ao potencial para o aquecimento global. Por ser um recurso natural, de crescimento relativamente rápida, podendo e devendo, na fase de desbaste ser substituído por novas plantações, a madeira torna-se também um produto bastante sustentável.

No que diz respeito aos objetivos específicos do trabalho, e os requisitos que o cliente final espera encontrar num produto como este, foram igualmente, de maneira global, cumpridos.

O conceito criado, cumpre com os requisitos da montagem autónoma e padronizada, visto que os componentes principais, são pré-montados em fábrica com acessórios de ligação que permitem ao cliente a rápida identificação da localização e sistema de ligação entre os componentes que a estes vão ser conectados. Isto faz como que toda a montagem seja corretamente efetuada, dispensando a necessidade de medições, ou cálculos de distanciamento entre componentes.

Além disto, componentes como as travessas ou placas de isolamento, têm uma ligação que não necessita de parafusos ou qualquer outro meio de fixação mecânica, sendo somente necessário o seu encaixe, o que torna o processo de montagem bastante mais eficiente. As placas de revestimento interior, que contêm os mancais com pino, permitem, de forma semelhante, uma montagem muito rápida e simples, para além de possibilitar uma forma interessante de acessibilidade aos componentes e adaptabilidade do interior, outros requisitos dos clientes.

Também as vigas e montantes, são fixos apenas com a colocação de pinos cilíndricos. Teve-se igualmente em consideração a diminuição do número de tipos de conexões e

elementos diferentes, pelo que, são utilizadas muito poucas variantes diferentes de parafusos de fixação.

O módulo comporta também, além do isolamento térmico dado pelas placas de XPS, espaços de passagem aos sistemas técnicos de eletricidade, canalização e AVAC, que era um dos requisitos a cumprir. Embora a flexibilidade do edifício esteja limitada à possibilidade de aumentar ou diminuir o comprimento total das paredes longitudinais, existe sempre a possibilidade de colocar outro módulo no posicionamento que melhor satisfizer as necessidades do cliente.

Tendo em conta que não são utilizadas quaisquer ligações químicas, como colagem ou soldadura, todos os elementos que constituem o edifício modular são desmontáveis, o que faz com que possam ser devidamente recuperados para efeitos de reutilização, ou reciclagem. Assim, é dado o devido destino a cada componente consoante o seu estado de conservação, possibilitando a reintrodução daqueles que se encontram em condições de integrar a cadeia de abastecimento da produção dos elementos do módulo, garantindo assim a circularidade do conceito.

Finalmente, em relação ao desempenho em termos mecânicos do módulo, as simulações, embora básicas e em reduzido número, permitiram concluir que, num aspeto geral, os componentes cumprem o requisito da resistência estrutural.

6.2 Trabalhos futuros

A partir das conclusões retiradas, pode definir-se uma linha orientadora com vista a melhorar o conceito final do produto concebido.

Primeiramente, seria importante a utilização de dimensões standardizadas facilmente encontradas no mercado de vendas de produtos de construção, quer para as tábuas das quais se produzem as vigas e montantes, quer para outros produtos, como as placas de OSB. As placas / painéis de OSB 3, são um produto com dimensões standardizadas que, devido à sua comum utilização no revestimento de pisos e coberturas, ditam igualmente o distanciamento entre os montantes / vigas.

Em seguida, um dos pontos que não foi desenvolvido, foi a criação de meios de compartimentação do interior do módulo, através de paredes revestidas, por exemplo, pelas placas de revestimento interior que contêm os mancais com pino.

Por analisar, ficou o requisito de isolamento aos fenómenos meteorológicos. Embora as placas de revestimento exterior se sobreponham através dos entalhes em faces opostas, criando de certa forma alguma impermeabilidade, esta não é garantida, sobretudo na zona do telhado / cobertura.

É ainda essencial a conceção dos elementos de acabamentos e funcionalidade que conferem total habitabilidade no módulo, como é o caso das janelas, e portas. Pode ser também interessante, explorar a projeção de um telhado de uma ou duas águas, melhorando o apelo estético exterior do edifício, bem como de placas de revestimento exterior (das paredes e cobertura) com utilizem, nas faces voltadas para o exterior, materiais também estes mais apelativos.

Por último, devem ser justificadas através das normas europeias (Eurocódigos), as análises estruturais e escolhas de dimensionamentos para os componentes. As simulações estruturais, necessitam também de ser aprofundadas e detalhadas, para garantir a utilidade plena do módulo.

Bibliografia

Adams, Katherine Tebbatt *et al.* - Circular economy in construction: Current awareness, challenges and enablers. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*. ISSN 17476534. 170:1 (2017) 15–24. doi: 10.1680/jwarm.16.00011.

Ahmed, Farhan *et al.* - The environmental impact of industrialization and foreign direct investment: empirical evidence from Asia-Pacific region. *Environmental Science and Pollution Research*. ISSN 16147499. 29:20 (2022). doi: 10.1007/s11356-021-17560-w.

Akanbi, Lukman A. *et al.* - Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. *Resources, Conservation and Recycling*. ISSN 18790658. 129:November 2017 (2018) 175–186. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.026.

Allan, Kevin; Phillips, Adam R. - Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of low and mid-rise mass timber buildings with equivalent structural steel alternatives. *Sustainability (Switzerland)*. ISSN 20711050. 13:6 (2021). doi: 10.3390/su13063401.

Allwood, Julian M. - Squaring the Circular Economy: The Role of Recycling within a Hierarchy of Material Management Strategies. *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. 2014) 445–477. doi: 10.1016/B978-0-12-396459-5.00030-1.

Bastos, Pedro - Desenvolvimento de uma solução de construção modular para um módulo habitacional. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Aveiro, 2019. Disponível em WWW:<URL:<http://hdl.handle.net/10773/16421>>.

Blink.house - Casas modulares LSF e Construção Casas Modulares. [Consult. 3 mar. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://blink.house/>>.

Brikawood - Brikawood | Kits maisons bois passives écologiques, brique en bois écologique, maison BBC. [Consult. 3 mar. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.brikawood-ecologie.fr/>>.

Brikawood TV - Montage petite maison (HD 1080p) - Brikawood International - YouTube. [Consult. 3 mar. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.youtube.com/watch?v=gHXtVogFLg0>>.

Castelo, João - Desenvolvimento de modelo conceptual de sistema construtivo industrializado leve destinado à realização de edifícios metálicos. (Dissertação de Mestrado em Construção de Edifícios), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. Disponível em WWW:<URL:<http://hdl.handle.net/10216/60243>>.

Circle Economy - The Circularity Gap Report, atual. 2021. Disponível em WWW:<URL:<https://www.circularity-gap.world/2021>>.

Constitucional, XVII Governo - Regime da gestão de resíduos de construção e demolição Decreto-Lei n.º 46 / 2008 - Diário da República n.º 51 / 2008 , Série I de 2008-03-12 Disposições gerais. 2011) 1–9.

Costa, Joana - Construção prefabricada - Análise da utilização da prefabricação nas várias etapas do processo construtivo. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013. Disponível em WWW:<URL:https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/cdn/especializacoes/39_000159636.pdf>.

Crowther, Philip - Developing Guidelines for Designing for Deconstruction. Em Deconstruction - Closing the Loop. Watford, United Kingdom : Building Research Council, 2000.

Decreto-Lei n.º 38 382 de 7 de Agosto de 1951. [Consult. 9 mar. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.oasrn.org/upload/apoio/legislacao/pdf/rgeu2.pdf>>.

Diário da República - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado - REBAP. Diário da República. 1983) 100–166.

Dodge Data & Analytics - Prefabrication and Modular Construction 2020. Hamilton: Dodge Data & Analytics, 2020. (Relatório). Disponível em WWW:<URL:https://proddrupalcontent.construction.com/s3fs-public/SMR1219_Prefab_2020_small-compressed.pdf>.

Eadie, Robert *et al.* - BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. Automation in Construction. ISSN 0926-5805. 36:2013) 145–151. doi: 10.1016/J.AUTCON.2013.09.001.

Ellen Macarthur Foundation - Ellen Macarthur Foundation Towards a Circular Economy Vol 1: an economic and business rationale for an accelerated transition. Reino Unido: Ellen Macarthur Foundation, 2013. (Relatório). Disponível em WWW:<URL:<https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>>.

European Standard EN 13501-1 - Additional classifications All the materials classified A2, B, C, D obtain an additional classification regarding the emission of smoke and the production of flaming droplets and/or particles. European Standard EN 13501-1. 2013) 13501.

Fercoq, Alain; Lamouri, Samir; Carbone, Valentina - Lean/Green integration focused on waste reduction techniques. Journal of Cleaner Production. ISSN 09596526. 137:2016) 567–578. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.107.

Foundation Types for Modular Construction - A Primer | Built Prefab. [Consult. 16 out. 2021]. Disponível em WWW:<URL:<https://builtprefab.com/foundation-types-for-modular-construction-a-primer/>>.

Gablok - Insulating formwork block for self-building - Belgian self-building. [Consult. 6 mar. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://gablok.be/en/>>.

GEN-IV International Forum - Cost Estimating Guidelines for Generation IV Nuclear Energy Systems. 2007) 1–181.

Gencel, Osman *et al.* - Properties of concrete paving blocks made with waste marble. Journal of Cleaner Production. ISSN 09596526. 21:1 (2012) 62–70. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.08.023.

Gibb, Alistair G. F. - Off-site fabrication: prefabrication, pre-assembly and modularisation. [S.l.] : Whittles Publishing, 1999. ISBN 978-1870325-77-6.

Gibb, Alistair G. F.; Isack, Frank - Re-engineering through pre-assembly: Client expectations and drivers. *Building Research and Information*. ISSN 09613218. 31:2 (2003) 146–160. doi: 10.1080/09613210302000.

Gonçalves, Luís - Desenvolvimento estrutural de um componente habitável de construção modular. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Aveiro, 2020. Disponível em WWW:<URL:<http://hdl.handle.net/10773/31306>>.

Gosling, Jonathan *et al.* - Defining and Categorizing Modules in Building Projects: An International Perspective. *Journal of Construction Engineering and Management*. ISSN 0733-9364. 142:11 (2016). doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001181.

Haas, Willi *et al.* - How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European union and the world in 2005. *Journal of Industrial Ecology*. ISSN 15309290. 19:5 (2015). doi: 10.1111/jiec.12244.

Hasslacher Norica Timber - From wood to wonders. [Consult. 11 jun. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.hasslacher.com/>>.

Insertsdirect.com ltd - Fitsco «Woodfit Range» - Threaded Insert for Wood | 3D CAD Model Library | GrabCAD, atual. 22 out. 2015. [Consult. 24 jun. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://grabcad.com/library/fitsco-woodfit-range-threaded-insert-for-wood-1>>.

Islam, Rashidul *et al.* - An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. *Waste Management*. ISSN 18792456. 95:November (2019) 10–21. doi: 10.1016/j.wasman.2019.05.049.

Isolamentos | XPS – Placogesso. [Consult. 13 mai. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://placogesso.pt/isolamentos-xps/>>.

Jackson, Marie; Marra, Fabrizio - Roman stone masonry: Volcanic foundations of the ancient city. *American Journal of Archaeology*. ISSN 00029114. 110:3 (2006). doi: 10.3764/aja.110.3.403.

Jalaei, Farzad; Jrade, Ahmad - Integrating building information modeling (BIM) and LEED system at the conceptual design stage of sustainable buildings. *Sustainable Cities and Society*. ISSN 2210-6707. 18:2015) 95–107. doi: 10.1016/J.SCS.2015.06.007.

Jonsson, Henric; Rudberg, Martin - Classification of production systems for industrialized building: A production strategy perspective. *Construction Management and Economics*. ISSN 1466433X. 32:1–2 (2014). doi: 10.1080/01446193.2013.812226.

Kalmykova, Yuliya; Sadagopan, Madumita; Rosado, Leonardo - Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*. ISSN 0921-3449. 135:2018) 190–201. doi: 10.1016/J.RESCONREC.2017.10.034.

Martins, João - Introdução ao design do produto modular : Considerações funcionais, estéticas e de produção. (Dissertação de Mestrado em Design Industrial), Faculdade de Engenharia Da Universidade do Porto, 2002. Disponível em WWW:<URL:<http://repositorio->

aberto.up.pt/bitstream/10216/12110/2/Texto integral.pdf>.

Mignacca, Benito; Locatelli, Giorgio; Velenturf, Anne - Modularisation as enabler of circular economy in energy infrastructure. *Energy Policy*. ISSN 03014215. 139:February (2020) 111371. doi: 10.1016/j.enpol.2020.111371.

Minunno, Roberto *et al.* - Strategies for applying the circular economy to prefabricated buildings. *Buildings*. ISSN 20755309. 8:9 (2018). doi: 10.3390/buildings8090125.

Morris, Freya; Allen, Stephen; Hawkins, Will - On the embodied carbon of structural timber versus steel, and the influence of LCA methodology. *Building and Environment*. ISSN 03601323. 206:May (2021) 108285. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108285.

Oguchi, Masahiro; Tasaki, Tomohiro; Moriguchi, Yuichi - Decomposition analysis of waste generation from stocks in a dynamic system: Factors in the generation of waste consumer durables. *Journal of Industrial Ecology*. ISSN 10881980. 14:4 (2010) 627–640. doi: 10.1111/j.1530-9290.2010.00248.x.

Pan, Shu Yuan *et al.* - Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: a review. *Journal of Cleaner Production*. ISSN 0959-6526. 108:2015) 409–421. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.06.124.

Park, Joo Young; Chertow, Marian R. - Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. *Journal of Environmental Management*. . ISSN 0301-4797. 137:2014) 45–53. doi: 10.1016/J.JENVMAN.2013.11.053.

PAinha, Sérgio - Construção Modular – Desenvolvimento Da Ideia: Casa Numa Caixa. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Aveiro, 2011. Disponível em WWW:<URL:http://hdl.handle.net/10773/6096>.

Peltokorpi, Antti *et al.* - Categorizing modularization strategies to achieve various objectives of building investments. *Construction Management and Economics*. ISSN 0144-6193. 6193:2018) 1–17. doi: 10.1080/01446193.2017.1353119.

Relocatable Buildings v.s. Permanent Modular Construction | Modular Building Institute. [Consult. 14 out. 2021]. Disponível em WWW:<URL:https://www.modular.org/HtmlPage.aspx?name=MA-f-rb-v-pmc>.

Relvas, Carlos - Design & Engenharia: da ideia ao produto. 1. ed. ISBN E-book: 978-989-723-240-4.

Sanchez, Benjamin; Haas, Carl - A novel selective disassembly sequence planning method for adaptive reuse of buildings. *Journal of Cleaner Production*. ISSN 09596526. 183:2018) 998–1010. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.201.

Scarus - Twin Wall Socket Schuko | 3D CAD Model Library | GrabCAD, atual. 20 set. 2020. a. [Consult. 24 jun. 2022]. Disponível em WWW:<URL:https://grabcad.com/library/twin-wall-socket-schuko-1>.

Scarus - Single Wall Socket Schuko | 3D CAD Model Library | GrabCAD, atual. 21 set. 2020. b. [Consult. 24 jun. 2022]. Disponível em WWW:<URL:https://grabcad.com/library/single-wall-socket-schuko-1>.

Scherrer-Rathje, Maïke; Boyle, Todd A.; Deflorin, Patricia - Lean, take two! Reflections from the second attempt at lean implementation. *Business Horizons*. ISSN 0007-6813. 52:1 (2009) 79–88. doi: 10.1016/J.BUSHOR.2008.08.004.

Schilliger CH - [Consult. 11 jun. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.schilliger.ch/>>.

Schoenborn, Joseph M. *et al.* - A Case Study Approach to Identifying the Constraints and Barriers to Design Innovation for Modular Construction. 2012).

Scuderi, Giuliana - Designing flexibility and adaptability: The answer to integrated residential building retrofit. *Designs*. ISSN 24119660. 3:1 (2019) 1–11. doi: 10.3390/designs3010003.

Smartply OSB | Medite Smartply - [Consult. 12 jun. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://mdfosb.com/en/products/smartply-osb>>.

Smith, Ryan E. - Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. John Wiley & Sons, Inc., 2010. ISBN 978-0-470-27561-0.

Stahel, Walter R. - Policy for material efficiency - Sustainable taxation as a departure from the throwaway society. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. ISSN 1364503X. 371:1986 (2013). doi: 10.1098/rsta.2011.0567.

Stephenson, Judith *et al.* - Population, development, and climate change: links and effects on human health. *The Lancet*. ISSN 0140-6736. 382:9905 (2013) 1665–1673. doi: 10.1016/S0140-6736(13)61460-9.

Strong-Tie - Simpson Strong-Tie. [Consult. 24 jun. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.strongtie.pt/pt-PT>>.

Structall - Snap-N-Lock™ – Structall Building Systems. [Consult. 6 mar. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://structall.com/pages/snap-n-lock>>.

Tam, Vivian W. Y. - Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*. ISSN 0921-3449. 52:5 (2008) 821–828. doi: 10.1016/J.RESCONREC.2007.12.001.

Timing of greenhouse gas emissions | Bioenergy - [Consult. 6 jun. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.ieabioenergy.com/iea-publications/faq/woodybiomass/timing/>>.

Tukker, Arnold - Product services for a resource-efficient and circular economy - A review. *Journal of Cleaner Production*. ISSN 09596526. 97:2015) 76–91. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.11.049.

Varela, Mafalda - A casa modular vista na perspectiva do engenheiro mecânico. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Aveiro, 2015 Disponível em WWW:<URL:<http://ria.ua.pt/handle/10773/16421>>.

Velenturf, Anne P. M.; PURNELL, Phil - Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*. ISSN 23525509. 27:2021) 1437–1457. doi: 10.1016/j.spc.2021.02.018.

Ventilated foundations for prefabricated buildings - Geoplast. [Consult. 16 out. 2021]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.geoplastglobal.com/en/solutions/foundations/ventilated-foundations-prefabricated-buildings/>>.

Waste and Resources Action Programme (WRAP) - WRAP and the circular economy: What is a circular economy?. atual. 2019. [Consult. 22 jul. 2021]. Disponível em WWW:<URL:<https://wrap.org.uk/about-us/our-vision/wrap-and-circular-economy#>>.

What Is Modular Construction? | Modular Building Institute. [Consult. 12 out. 2021]. Disponível em WWW:<URL:https://www.modular.org/HtmlPage.aspx?name=why_modular>.

Wolfgang Fischer - Ground screw KRINNER - KSF M 76x1600-M16 | 3D CAD Model Library | GrabCAD, atual. 21 set. 2021. [Consult. 21 jun. 2022]. Disponível em WWW:<URL:<https://grabcad.com/library/ground-screw-krinner-ksf-m-76x1600-m16-1>>.

World Commission on Environment and Development - Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future (The Brundtland Report). Medicine, Conflict and Survival. ISSN 0748-8009. 4:1987). doi: 10.1080/07488008808408783.

Yellishetty, Mohan *et al.* - Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects. Environmental Science & Policy. ISSN 1462-9011. 14:6 (2011) 650–663. doi: 10.1016/J.ENVSCI.2011.04.008.

Zoloedova, Victoria; Fenner, Andriel E.; Kibert, Charles J. - Conference Report 2017: State-of-the-art of Modular Construction. October (2017). doi: 10.13140/RG.2.2.18051.60960.

Apêndice A

Lista de Componentes

	Designação	Qnt. total
	Parafusos helicoidais (KRINNER - KSF M 76x1600-M16)	14
Tábua de cintamento da fundação (paredes laterais) pré-montada	Ligações viga da fundação – tábuas de cintamento das paredes laterais da fundação	12
	Tábua de cintamento da fundação (paredes laterais)	2
	Parafusos ttsfs6-0x120	36
Tábua de cintamento da fundação (paredes longitudinais) pré-montada	Tábua de cintamento da fundação (paredes longitudinais)	2
	Suporte de vigas SBE40-140 (Strong-Tie)	16
	Parafusos csa5-0x35	224
	Travessa - Bloqueador	84
	Esquadro reforçado abr105s (Strong-Tie)	4
	Isolamento XPS cobertura e fundação	70
	Isolamento XPS arestas horizontais (paredes laterais)	10
	Isolamento XPS arestas horizontais	14
	Isolamento XPS arestas verticais	4
	Isolamento XPS paredes	19
	Isolamento XPS vértices	4
Placa inferior paredes laterais pré-montada	Placa inferior paredes laterais	2
	Apoio para encaixes dos montantes e vigas	24
	Parafusos ttsfs6-0x120	144
Placa inferior paredes longitudinais pré-montada	Placa inferior paredes longitudinais	2
	Apoio para encaixes dos montantes e vigas	32
	Parafusos ttsfs6-0x120	192
Montante com 2 régua	Apoio de placas XPS	200
	Montante	20
	Parafusos csa5-0x35	560
	Régua direita	20
	Régua esquerda	20
Montante com régua direita (pré-montado)	Apoio de placas XPS	40
	Montante	4
	Parafusos csa5-0x35	76
	Régua direita	4

Montante com régua esquerda (pré-montado)	Apoio de placas XPS	40
	Montante	4
	Parafusos csa5-0x35	76
	Régua esquerda	4
Ligações viga da cobertura – placa superior das paredes laterais pré-montada	Ligações viga da cobertura – placa superior das paredes laterais	14
	Apoio de placas XPS	28
	Parafusos csa5-0x35	28
Placa superior paredes laterais pré-montada	Placa superior paredes laterais	2
	Apoio para encaixes dos montantes e vigas	48
	Parafusos ttufs6-0x180	144
Placa superior paredes longitudinais pré-montada	Placa superior paredes longitudinais	2
	Apoio para encaixes dos montantes e vigas	64
	Parafusos ttufs6-0x180	96
Viga da fundação pré-montada	Viga fundação	8
	Apoio inferior dos encaixes das travessas	96
	Apoio lateral dos encaixes das travessas	192
	Parafusos ttsfs6-0x120	336
	Apoio de placas XPS	80
	Parafusos csa5-0x35	80
Viga cobertura pré-montada	Viga cobertura	8
	Apoio inferior dos encaixes das travessas	96
	Apoio lateral dos encaixes das travessas	192
	Parafusos ttsfs6-0x120	336
	Apoio de placas XPS	112
	Parafusos csa5-0x35	288
	Perfil teto falso vigas	8
	Perfil teto falso encaixe	42
	Placas de revestimento teto falso	30
	Placa de luzes led	5
Placa revestimento paredes interiores pré-montada	Mancal com pino	168
	Placa revestimento paredes interiores	84
	Porca de garra M4 (T-Nut Fitsco)	168
	Rebite cabeça redonda larga G 12mm	336
	Sanca	21
Rodapé pré-montado	Rodapé	21
	Porca de garra M4 (T-Nut Fitsco)	42
	Parafusos recartilhados DIN 653 -A M4 x 12 - 9.9ND	105
Revestimento piso - meio	Revestimento HPL piso meio	5
	Placa OSB piso meio	5
Revestimento piso – extremos (entalhe inferior)	Revestimento HPL piso extremos (entalhe inferior)	1
	Placa OSB piso extremos (entalhe inferior)	1

Revestimento piso – extremos (entalhe superior)	Revestimento HPL piso extremos (entalhe superior)	1
	Placa OSB piso extremos (entalhe superior)	1
Revestimento paredes exteriores - meio	Revestimento HPL paredes exteriores meio	15
	Placa OSB paredes exteriores meio	15
Revestimento paredes exteriores – extremos (entalhe inferior)	Revestimento HPL paredes extremos (entalhe inferior)	4
	Placa OSB paredes extremos (entalhe inferior)	4
Revestimento paredes exteriores - extremos (entalhe superior)	Revestimento HPL paredes (extremos entalhe superior)	4
	Placa OSB paredes extremos (entalhe superior)	4
Revestimento cobertura - meio	Revestimento HPL cobertura meio	5
	Placa OSB cobertura meio	5
Revestimento cobertura – extremos (entalhe inferior)	Revestimento HPL cobertura extremos (entalhe inferior)	1
	Placa OSB cobertura extremos (entalhe inferior)	1
Revestimento cobertura – extremos (entalhe superior)	Revestimento HPL cobertura extremos (entalhe superior)	1
	Placa OSB cobertura extremos (entalhe superior)	1
	Aro do módulo	1
	Base para estacas	14
	Parafusos ttufs6-0x70	140
	Parafusos csa5-0x35	717
	Parafusos ttufs6-0x180	284
	Pino cilíndrico ISO 2338 - 12 m6 x 120 - St	86

Apêndice B

Análise do QFD

O anexo que se segue, inclui as tabelas referentes ao QFD, sendo que a primeira tabela analisa a Matriz da Qualidade, utilizada para obter os gráficos das Figura 3.1 e Figura 3.2, e a seguinte, a Matriz do Produto, utilizada para a obtenção do gráfico da Figura 3.3.

B.1 - Matriz da Qualidade

Requisitos de cliente		DESEMPENHO											DIMENSÕES											Avaliação dos requisitos de qualidade																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS											DIRECÇÃO DE MELHORIA											DIRECÇÃO DE MELHORIA					DIRECÇÃO DE MELHORIA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		DIRECÇÃO DE MELHORIA											DIRECÇÃO DE MELHORIA											DIRECÇÃO DE MELHORIA					DIRECÇÃO DE MELHORIA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
nível primário	nível secundário	DIRECÇÃO DE MELHORIA											DIRECÇÃO DE MELHORIA											DIRECÇÃO DE MELHORIA					DIRECÇÃO DE MELHORIA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		DIRECÇÃO DE MELHORIA											DIRECÇÃO DE MELHORIA											DIRECÇÃO DE MELHORIA					DIRECÇÃO DE MELHORIA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
1	Segurança	Resistência estrutural	U 10	9	9	3	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

B.2 - Matriz do Produto

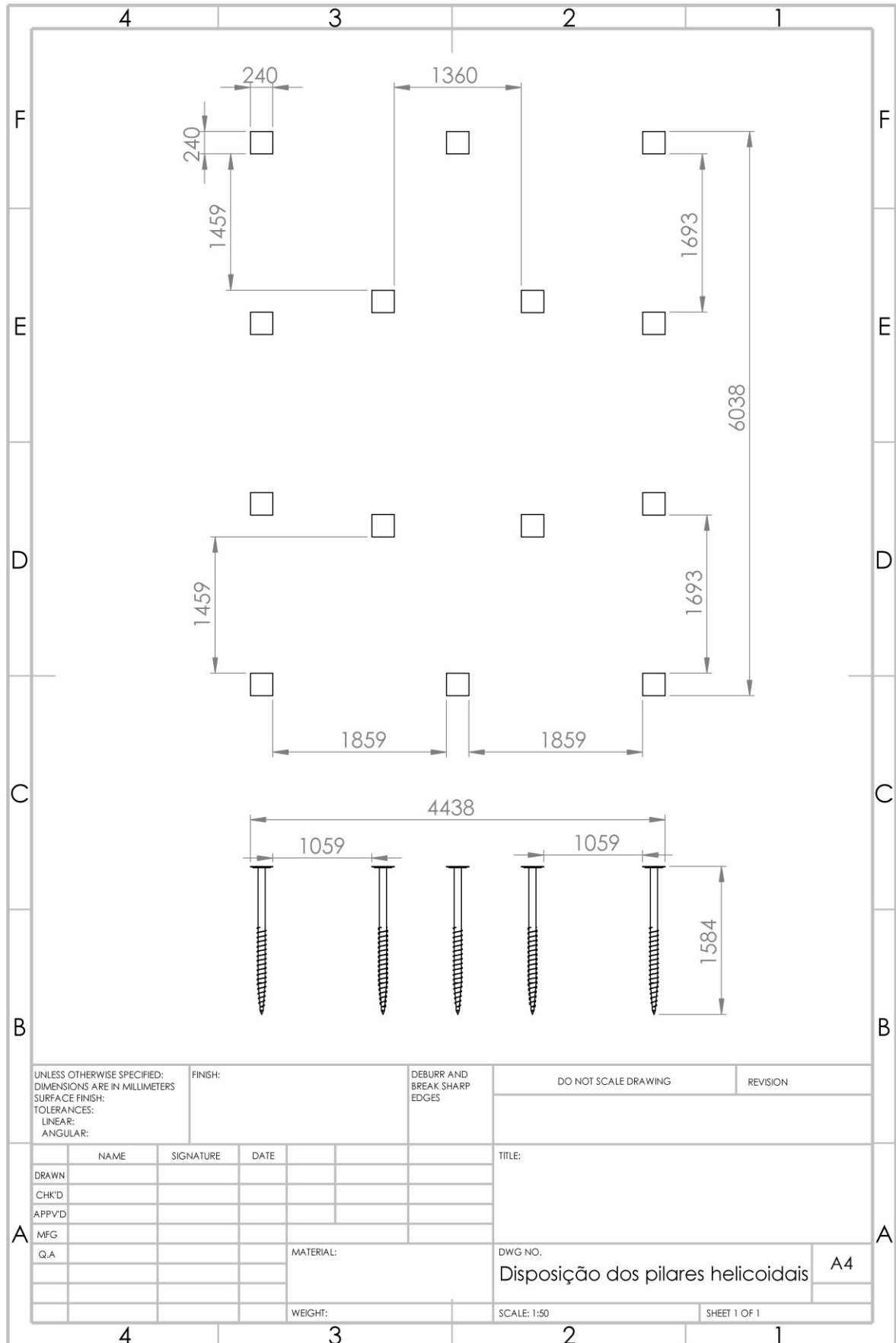
	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	DESEMPENHO						DIMENSÕES						Avaliação dos requisitos de qualidade						ATRIBUTOS DE QUALIDADE corrigidos (ID!*)											
		Porcentagem de envidraçados	Deformação máxima (mm)	Nº de acessórios	Material da estrutura	Material de revestimento interior/exterior	Isolamento aos fenômenos meteorológicos	Isolamento térmico	Volume componentes (m³)	Massa componentes (kg)	Comprimento componentes (mm)	Area útil (m²)	Pé direito (m)	Nº de divisões	Equipamento especializado	Ligações bidirecionais	Tipo de conexões entre elementos	Nº de tipos de conexões diferentes	Nº de elementos		Nº de elementos diferentes	Tempo de montagem	Espaços de passagem a sistemas MEP	Blink House	Brkwood	Gablok	Snap-N-Lock	avaliação da concorrência (Mi)	Avaliação estratégica de mercado (Ei)	peso relativo	
1	COMPONENTE S DO PRODUTO	iqj*	396	646	204	1204	1518	705	130	345	797	508	466	226	387	847	816	1882	619	671	500	644	375	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	8%	52509,77
2	Fundação	Estrutura (Vigas/Colunas)	3	9	3	9	3	3	9	3	3	9	3	9	3		9	9	9	9	9	9	9	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	18%	125764,23
3	Painéis pavimento	Painéis pavimento	9		3	9				3	3	3	3		3		9	9	3	3	3	3		0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	12%	85814,62	
4	Painéis parede exterior	Painéis parede exterior	1	1	1	3	9	3		3	3	3	3	3	3		9	9	3	3	3	3	9	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	15%	102436,46	
5	Painéis parede interiores	Painéis parede interiores	1	1	3	9	9			3	3	3	3	3	9		9	9	3	3	3	3	3	1,0	1,5	0,5	0,5	1,0	1,5	12%	84480,84
6	Cobertura	Cobertura	9	9	3	3	9	9		3	3	3	3	3	3		9	9	9	3	3	3		1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	13%	86982,15
7	Janelas	Janelas	9	9	1	9		3	3	9	9	3	1	9	9		3	9	9	9	9	9	9	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	12%	79968,59
8	Portas	Portas	1	9	9	9	9	3	3	3	9	3	1	1	9		3	9	9	3	3	3	3	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	11%	73197,60

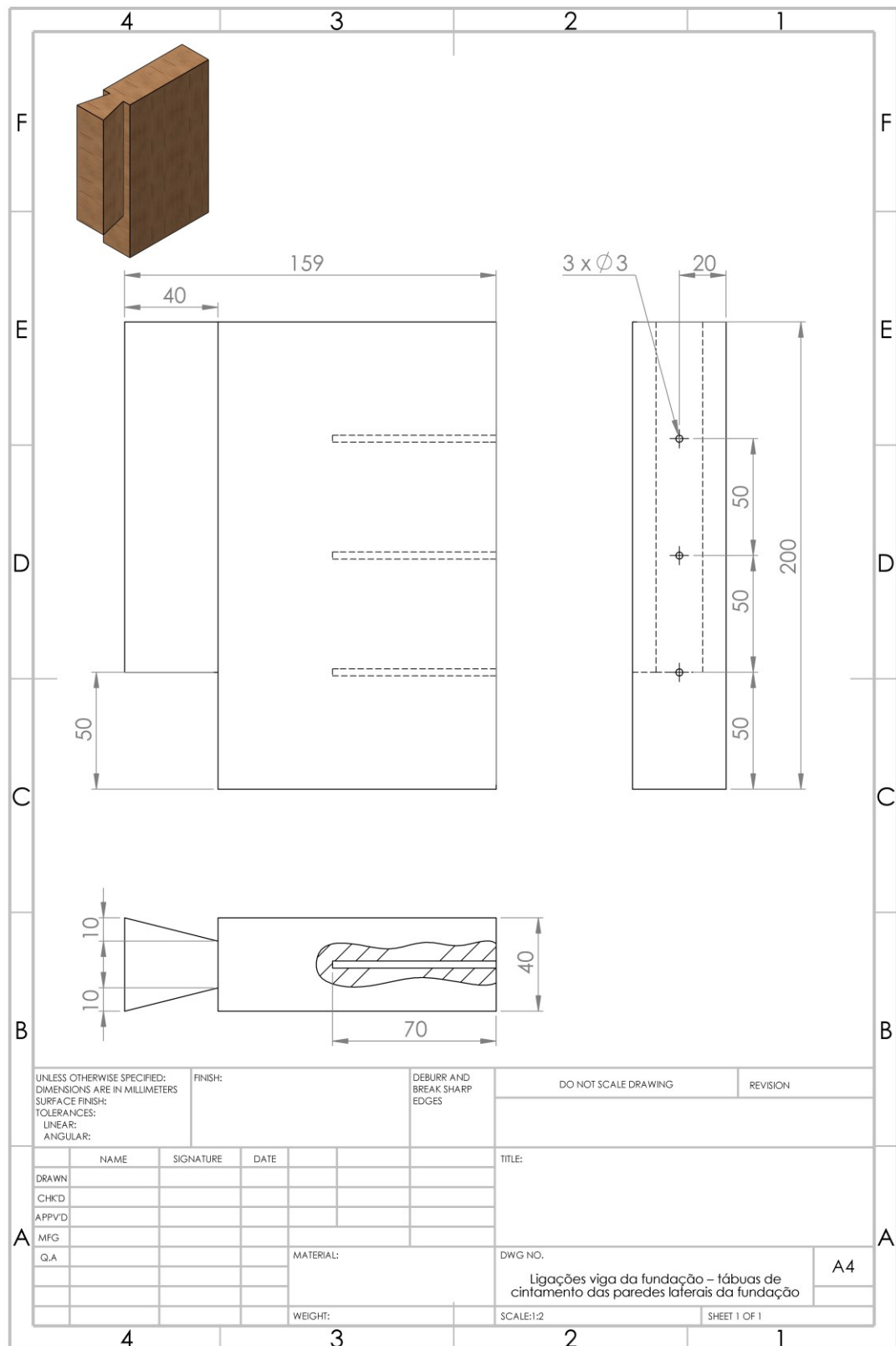
Apêndice C

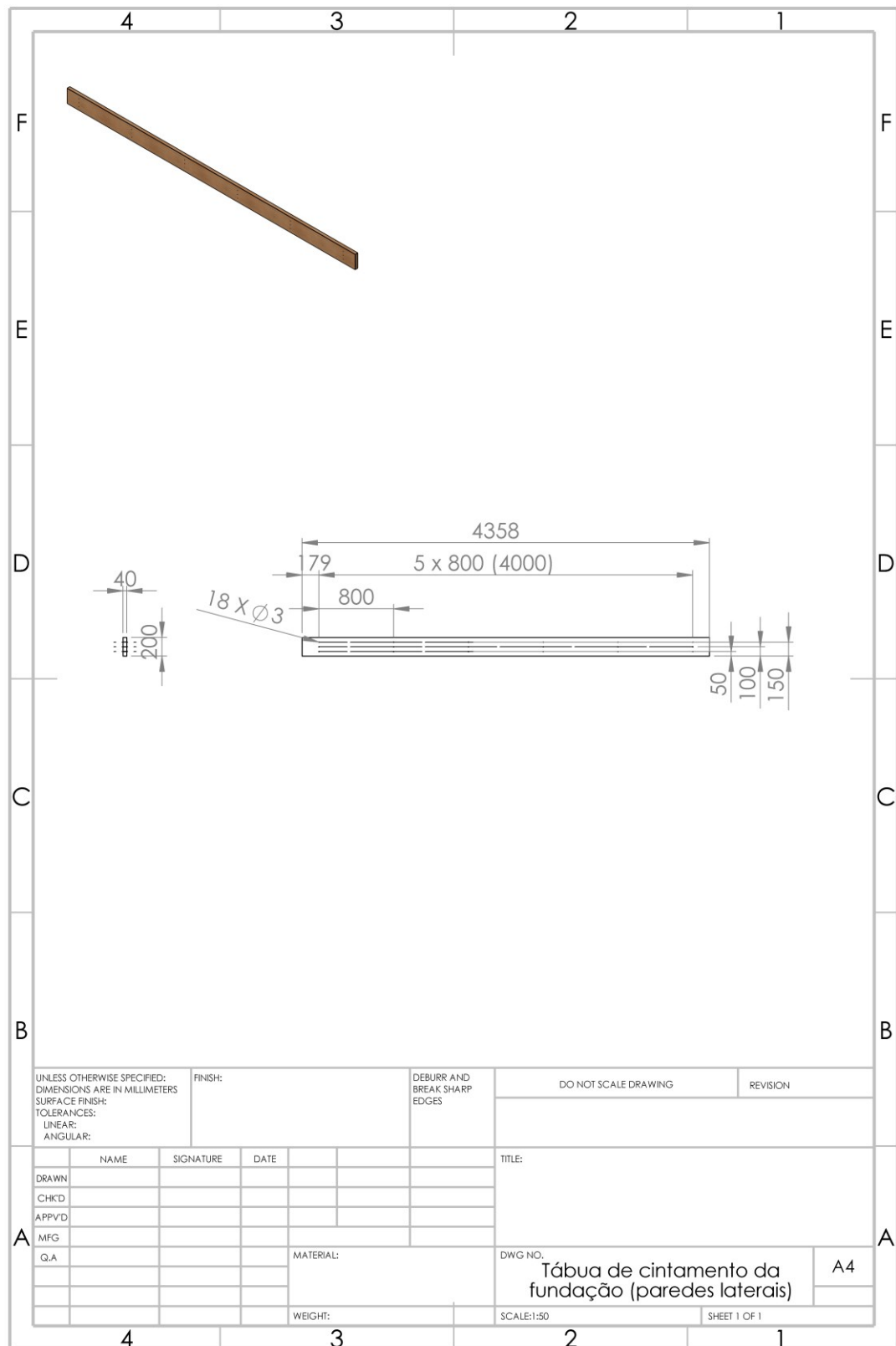
Desenhos Técnicos

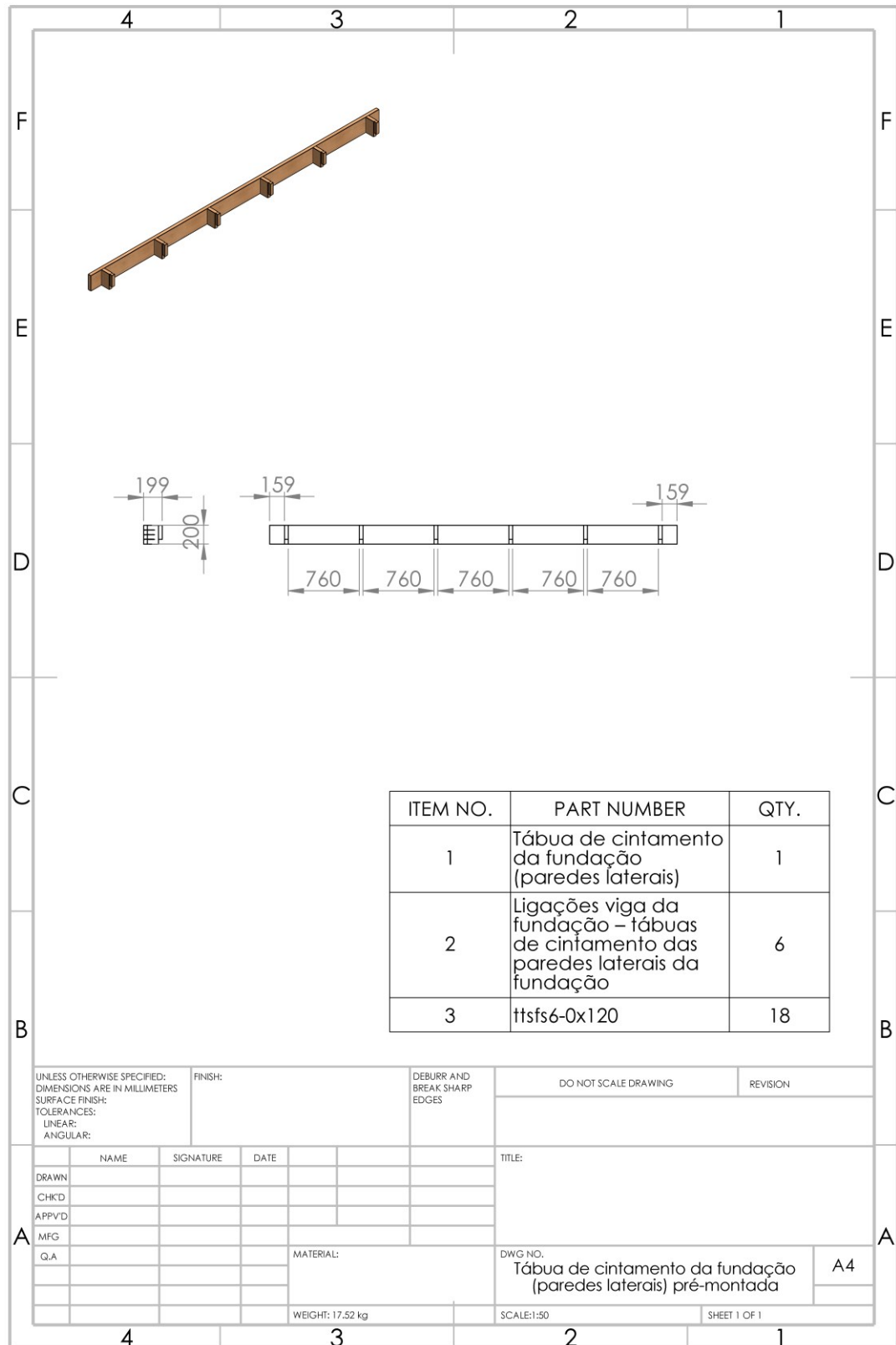
Nas páginas que se seguem, são apresentados os desenhos técnicos dos elementos constituintes do módulo.

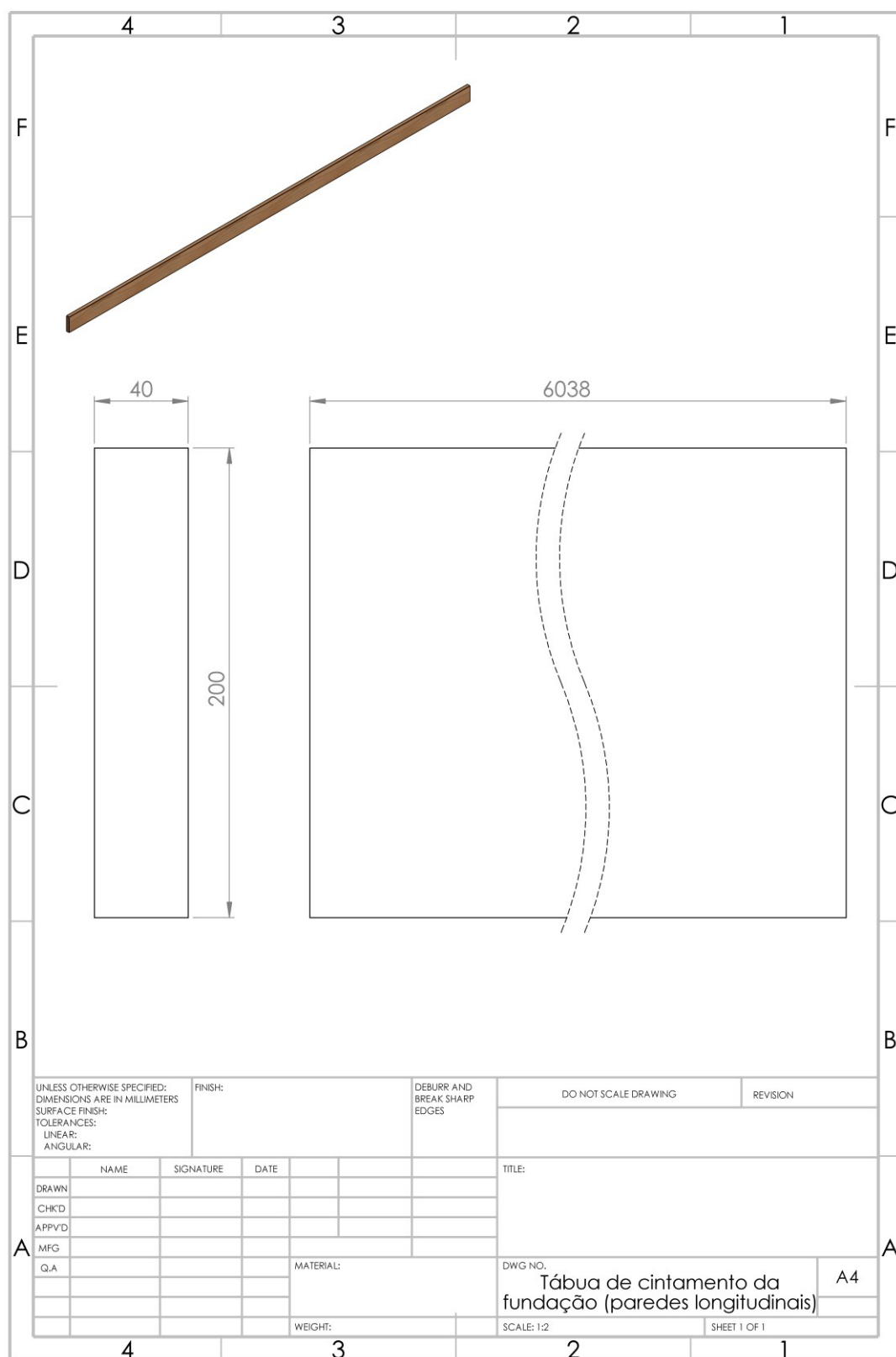
Em nota breve, é importante referir que, no caso dos desenhos que contêm vistas isométricas, estas, na maioria dos casos não se encontram na mesma escala referida na folha. Para que fosse possível visualizar o quanto melhor as vistas dos planos, as isométricas foram reduzidas, servindo meramente como auxiliar de identificação rápida do componente e da sua geometria.

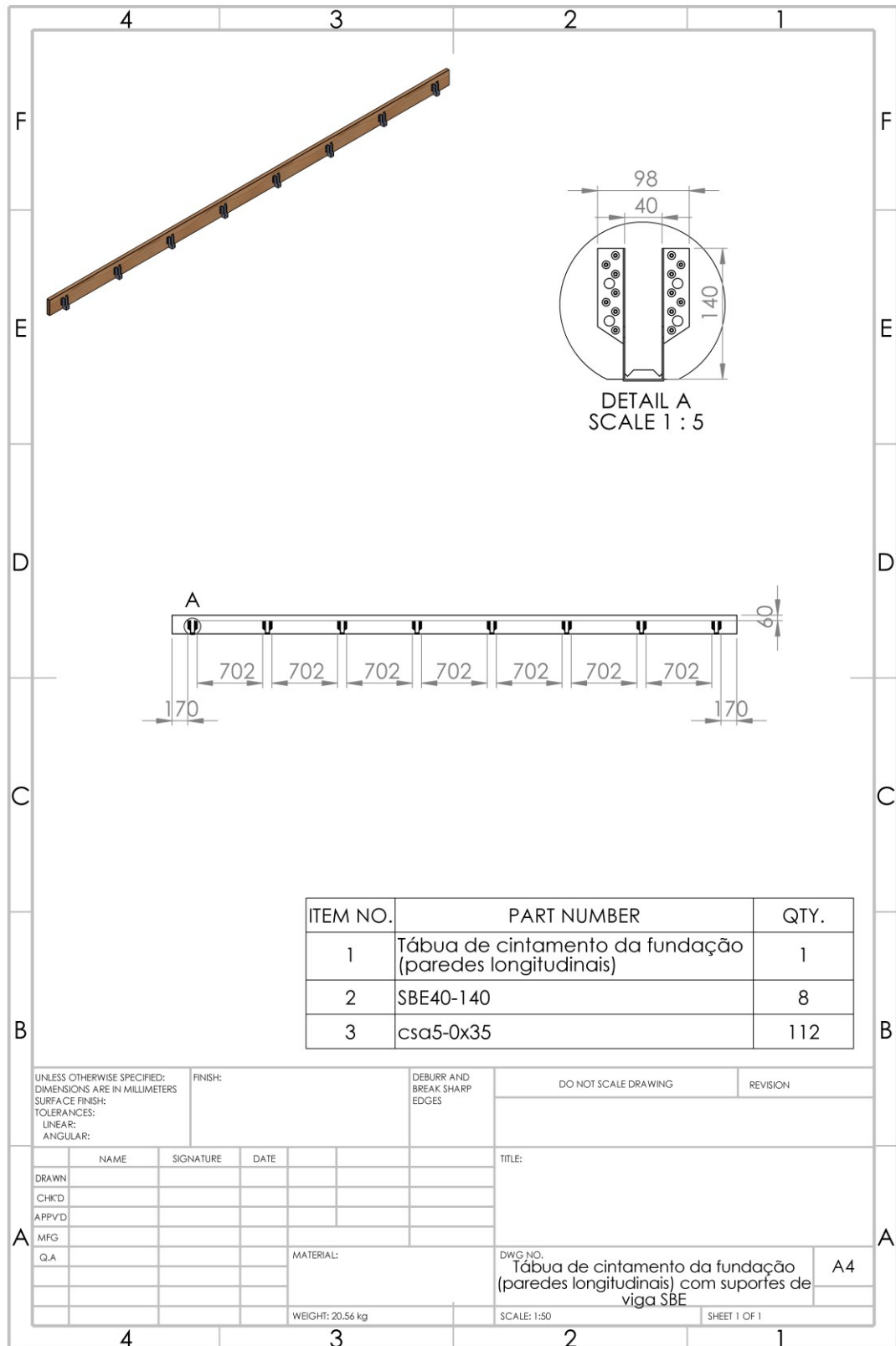


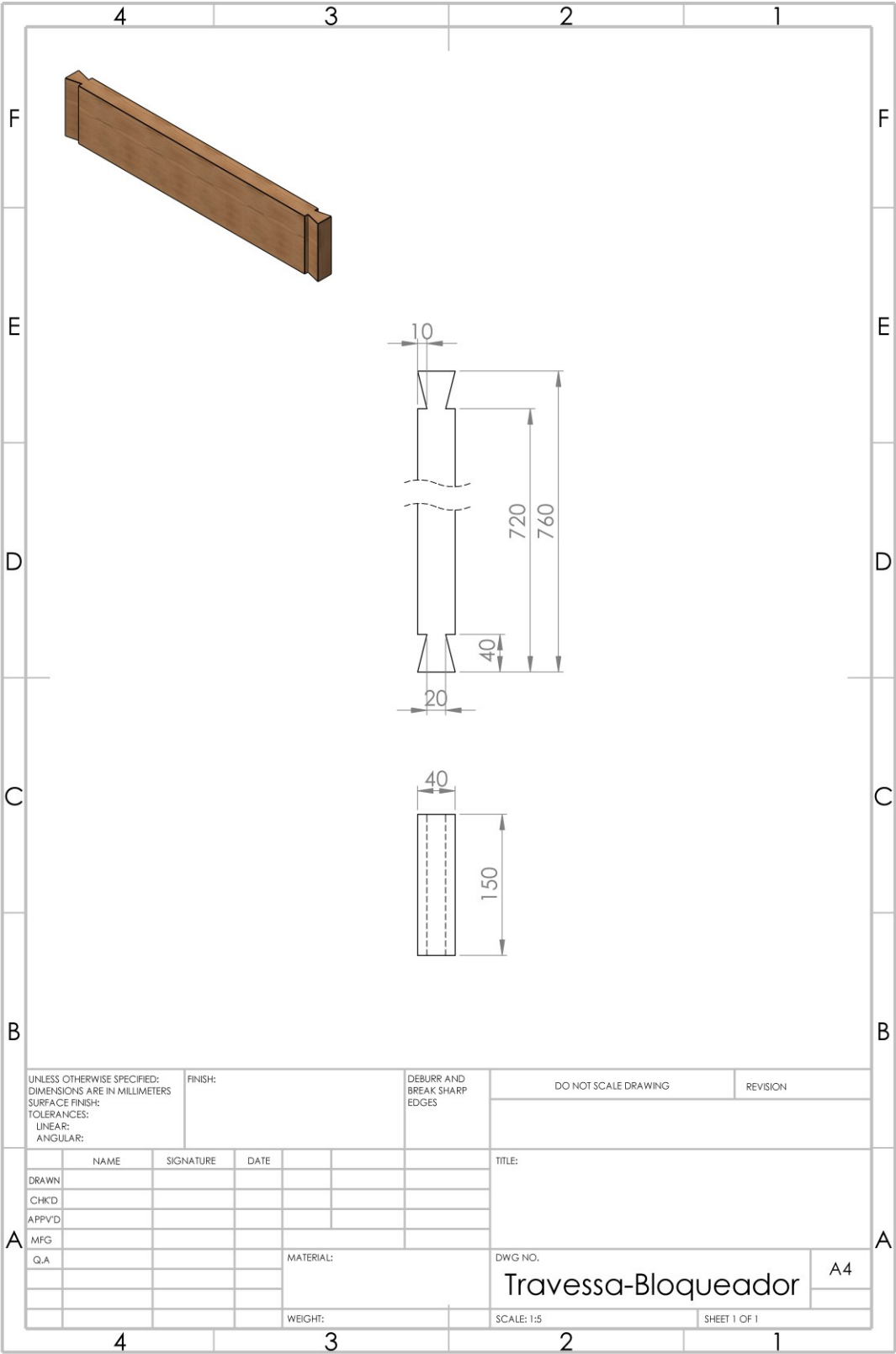


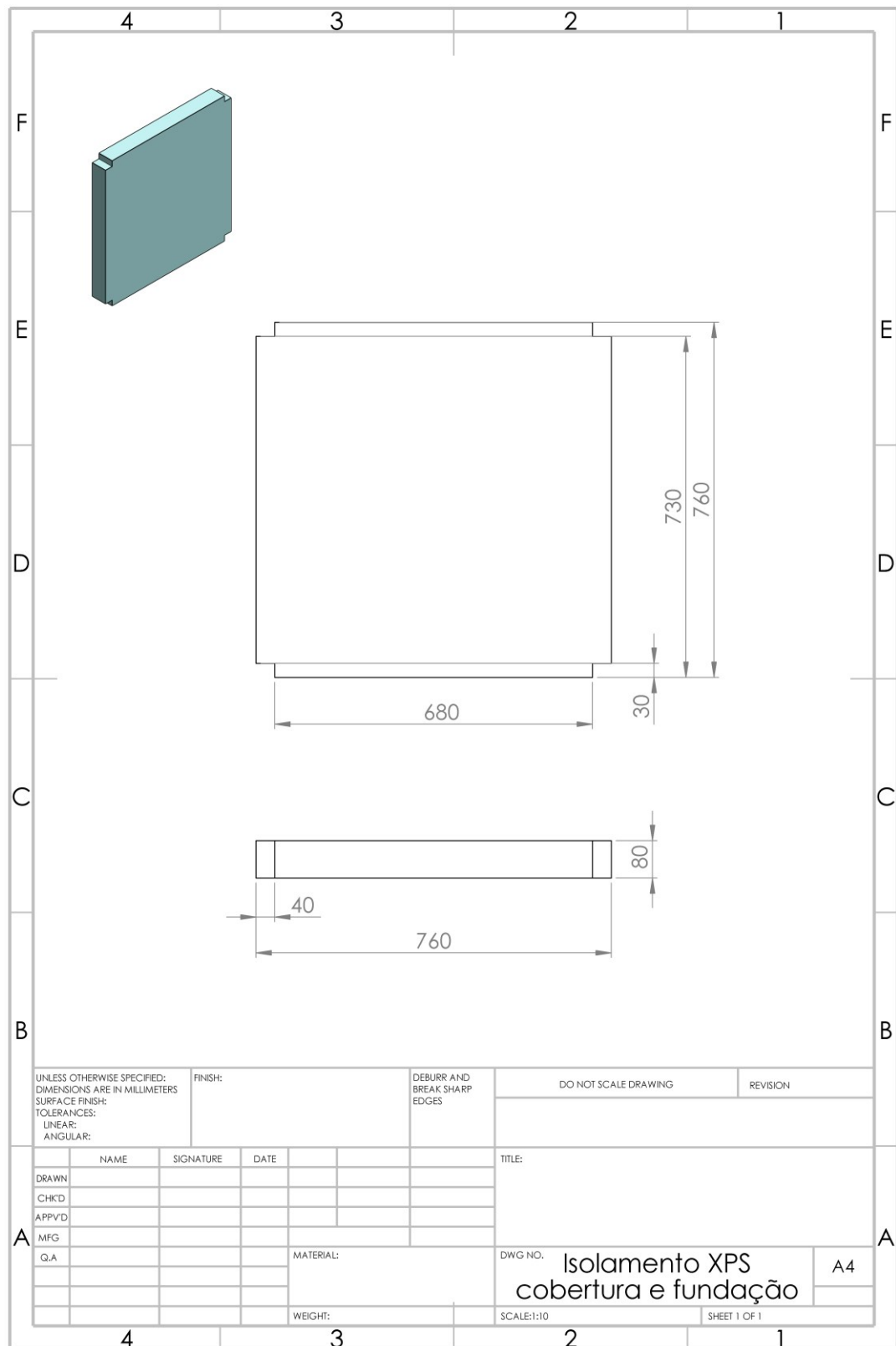


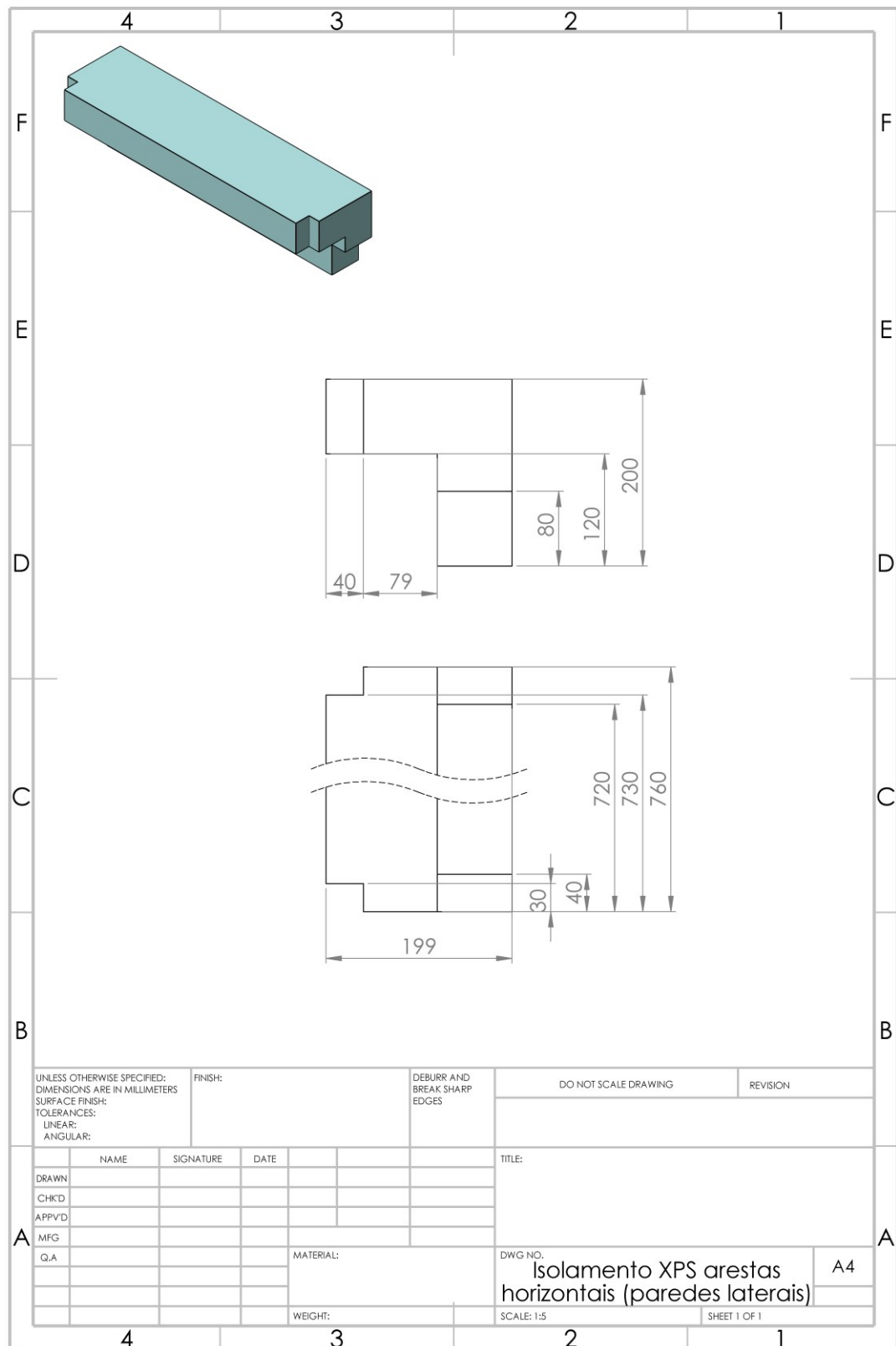


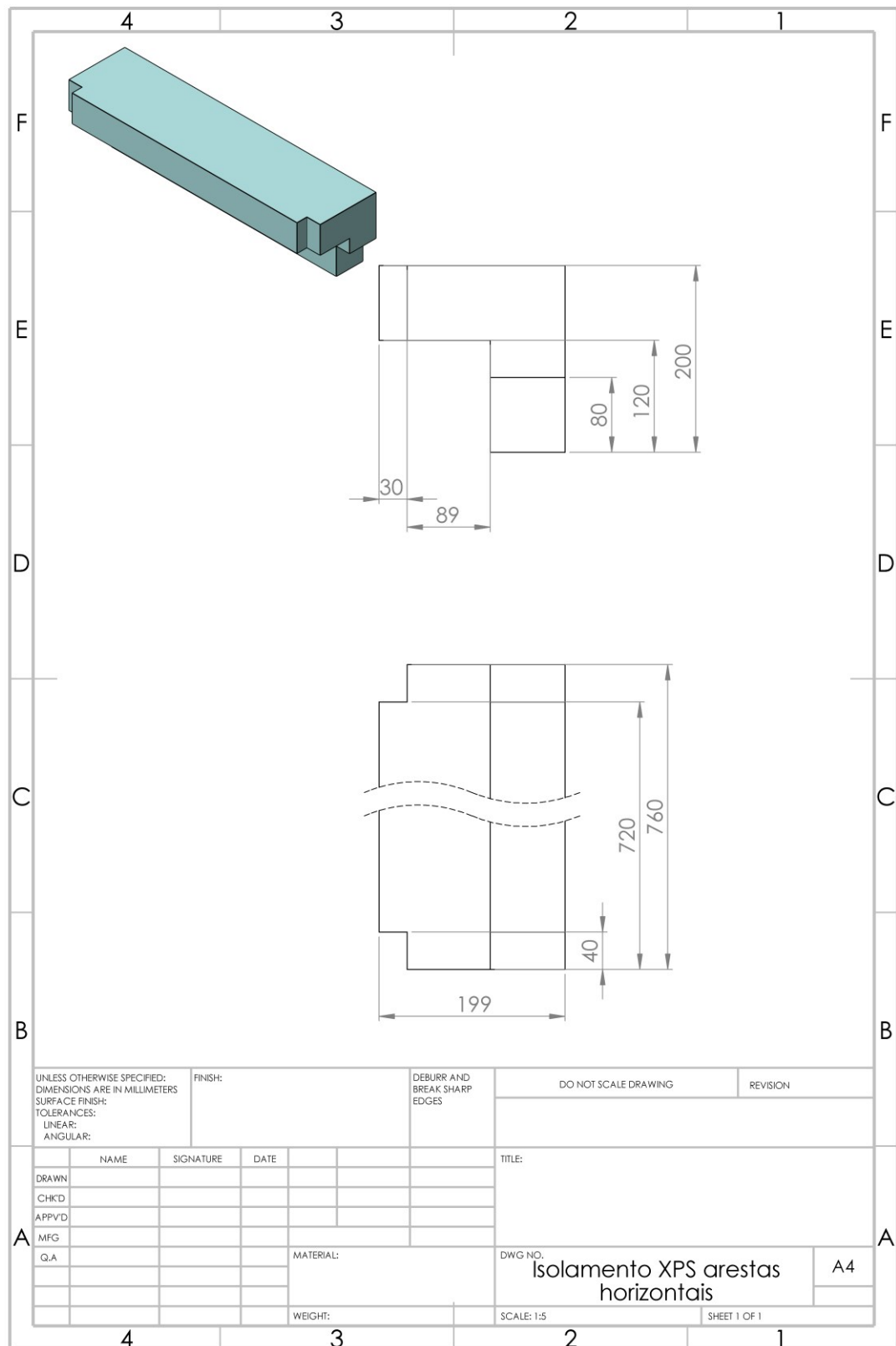


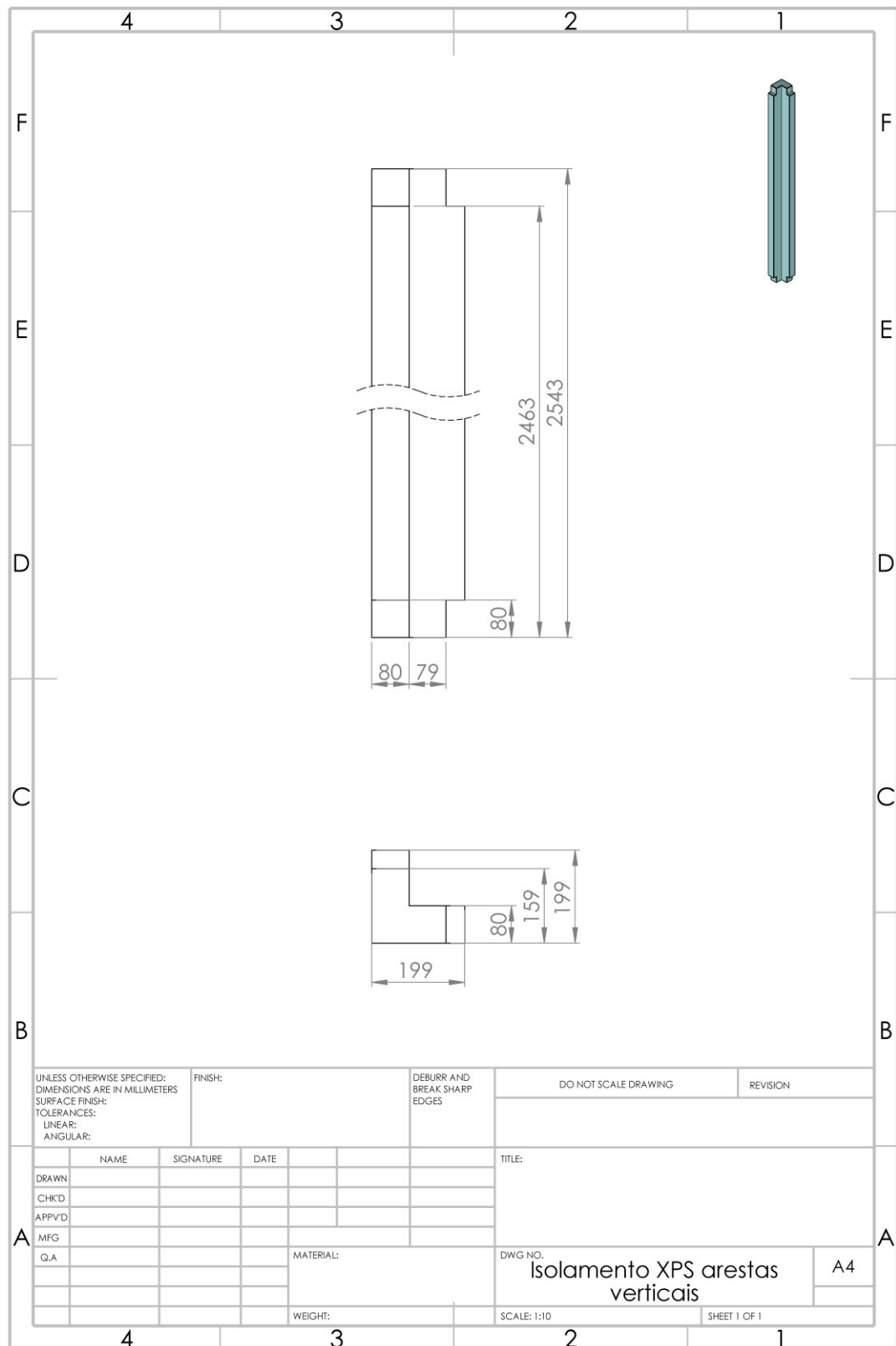


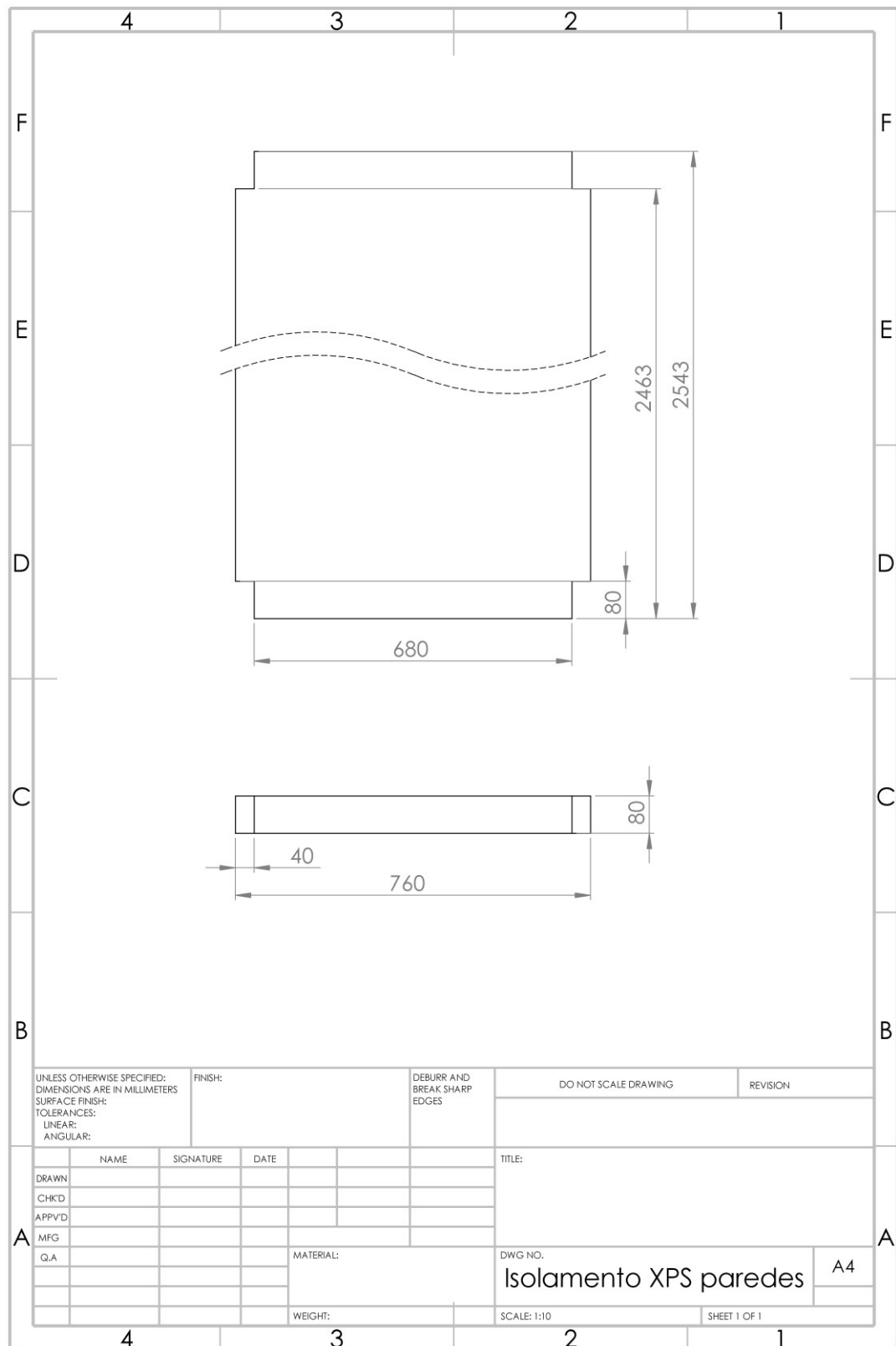


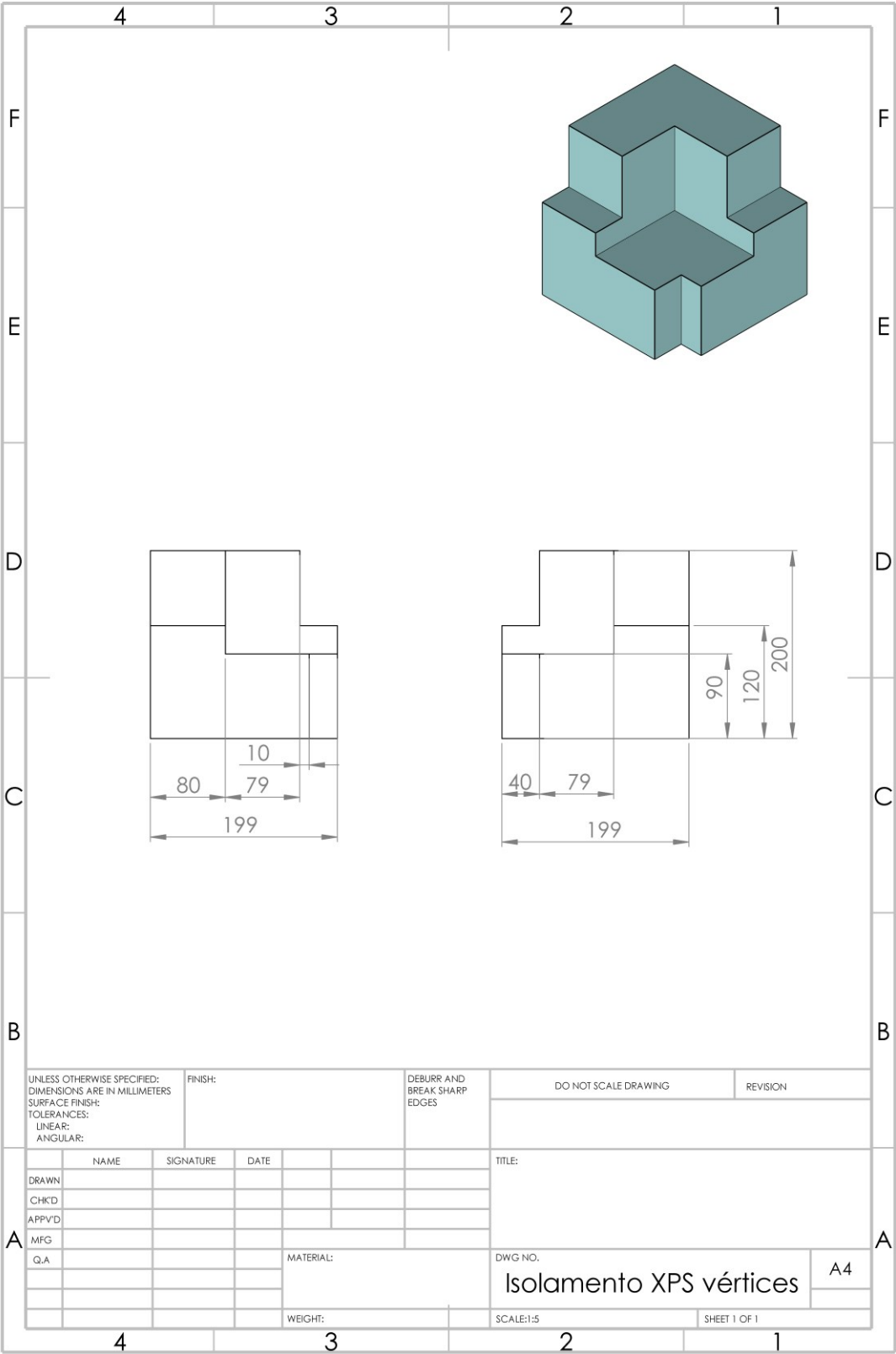


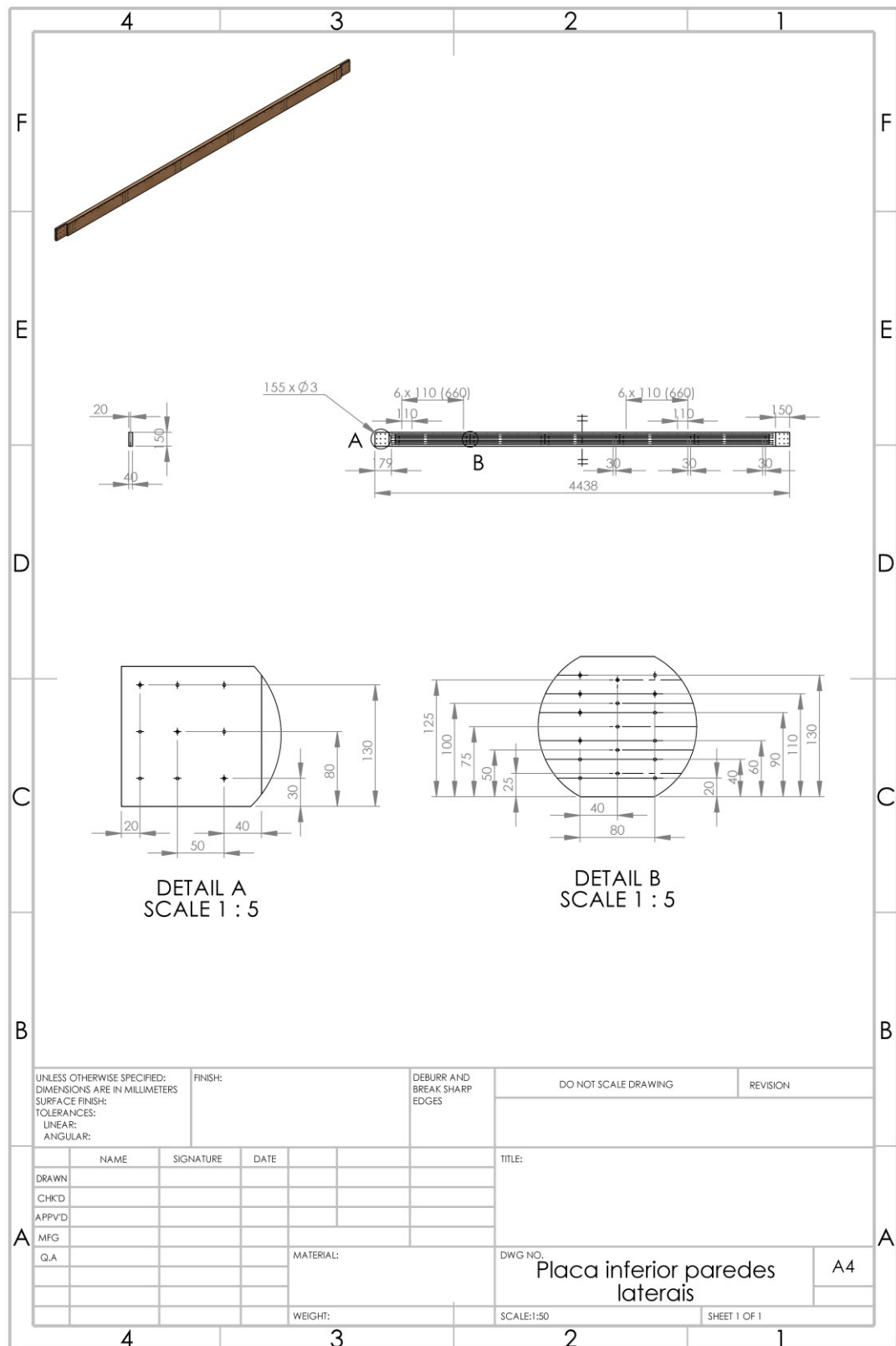


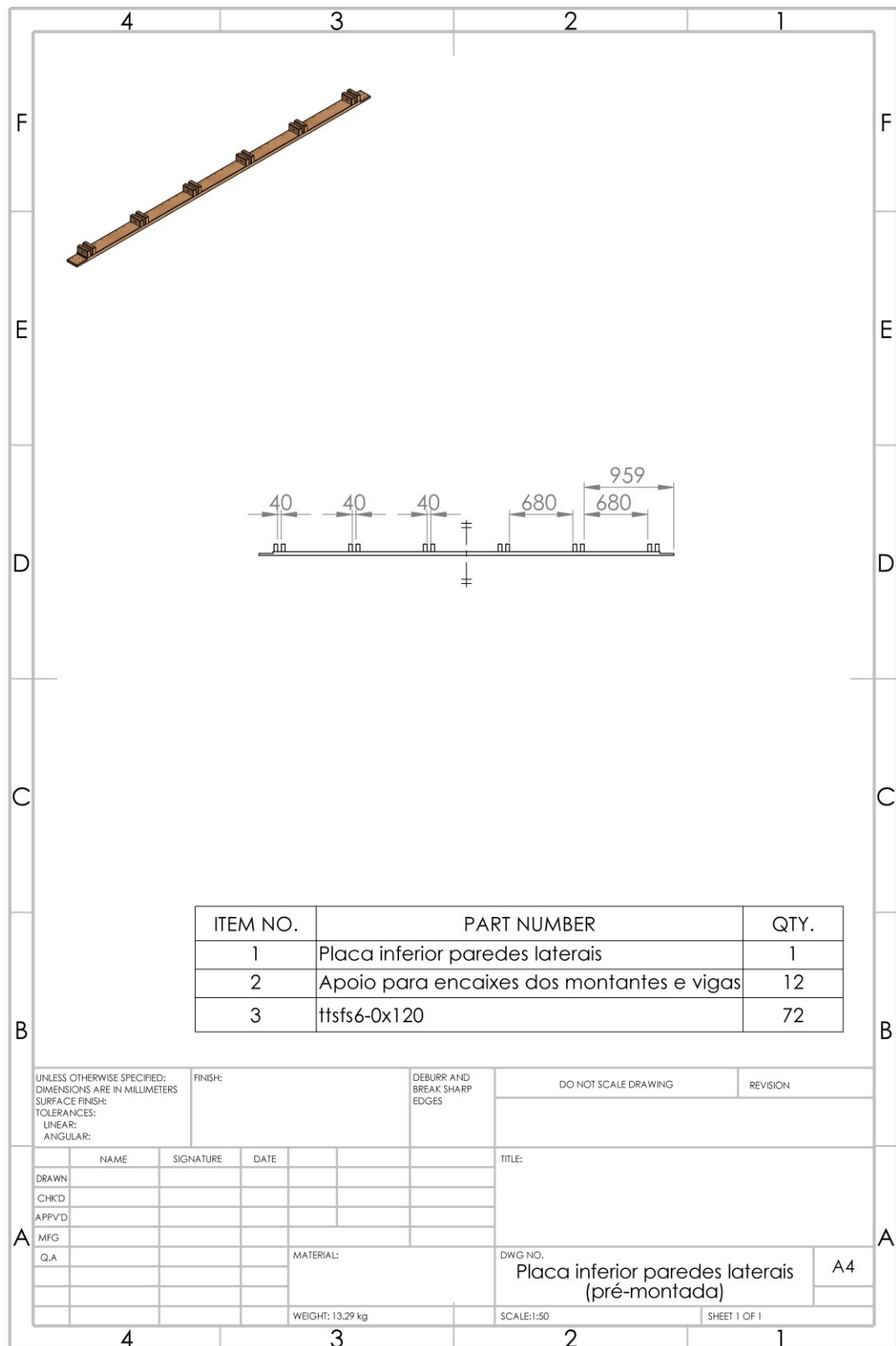


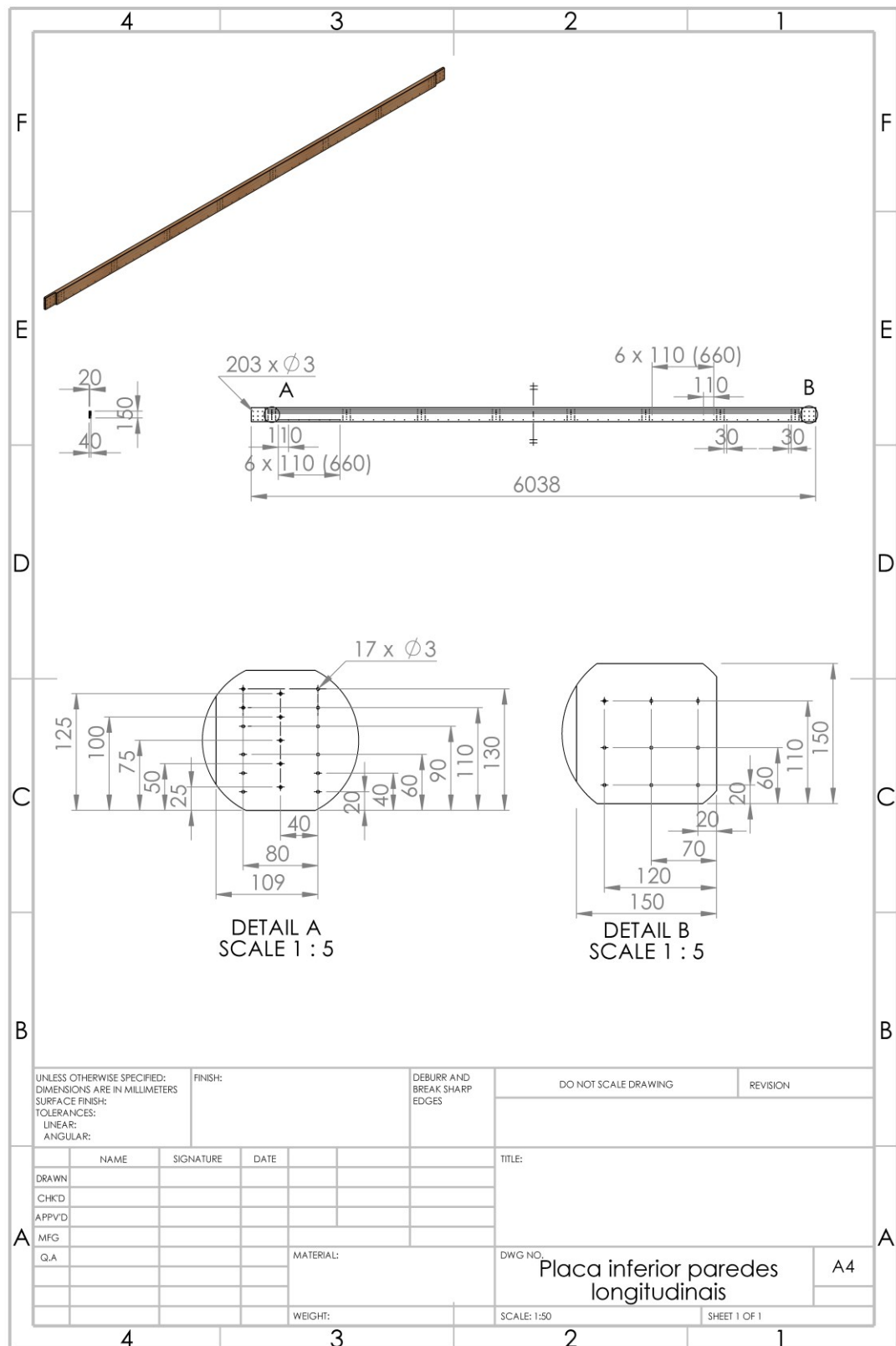


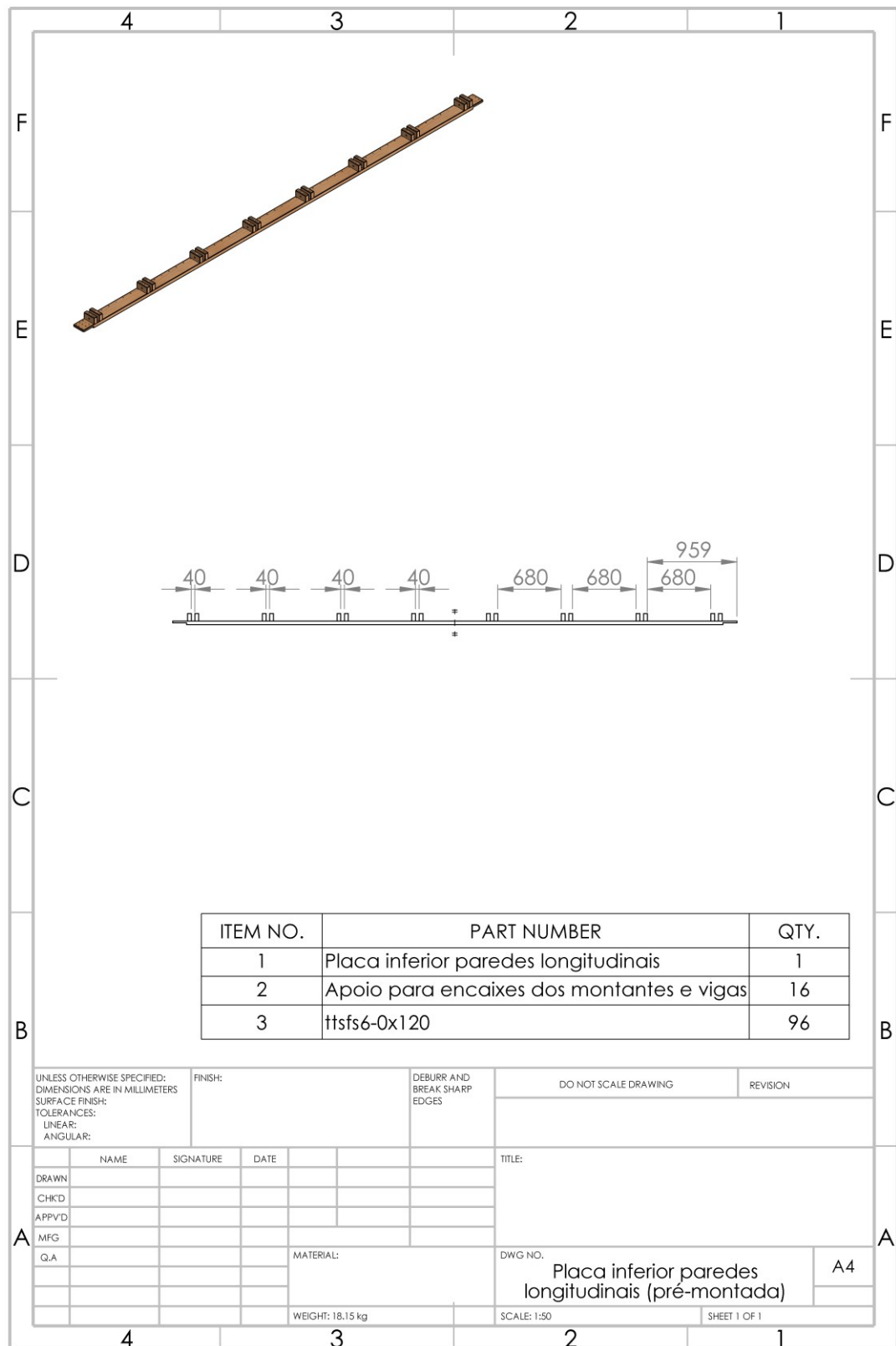


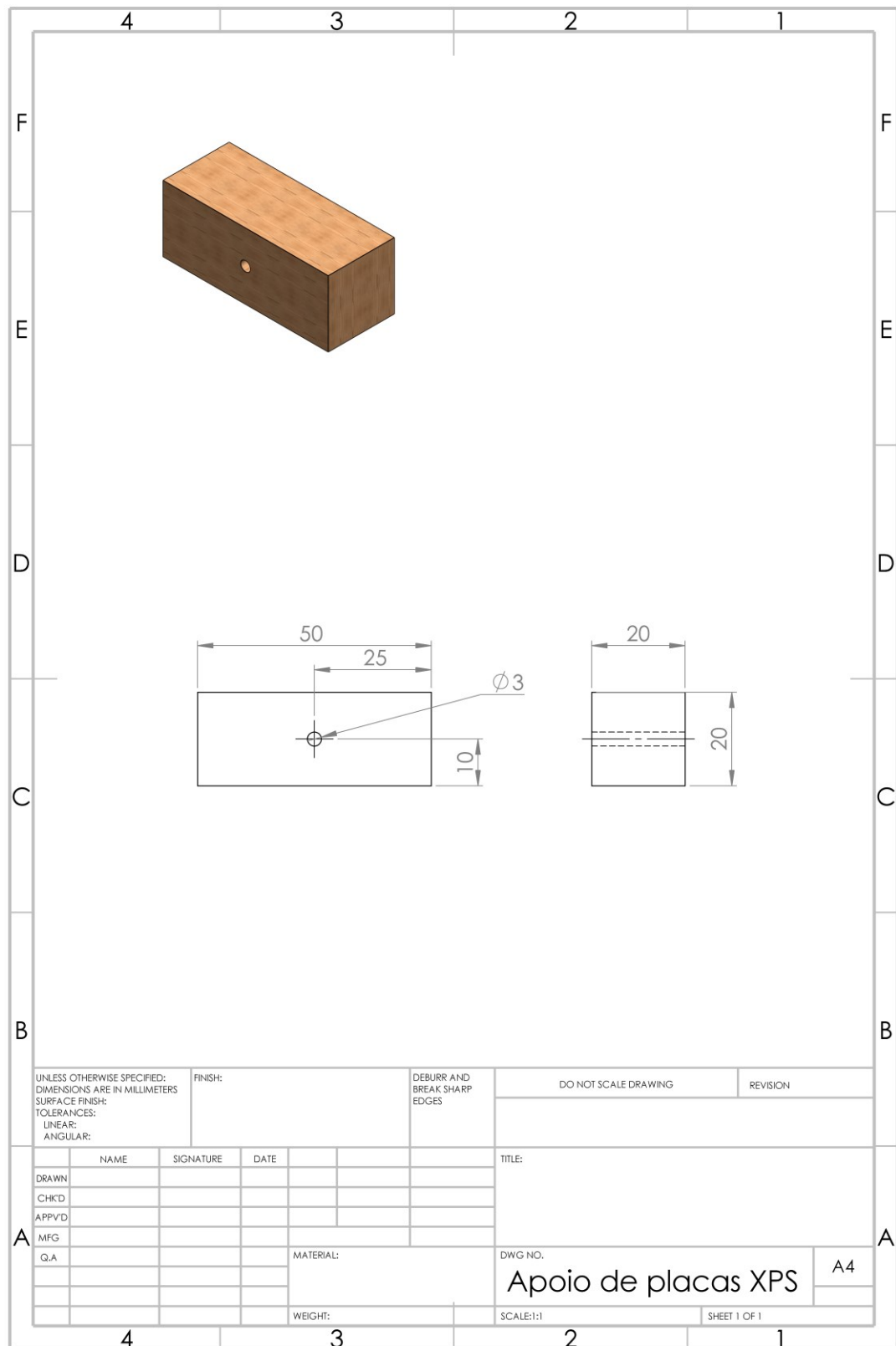


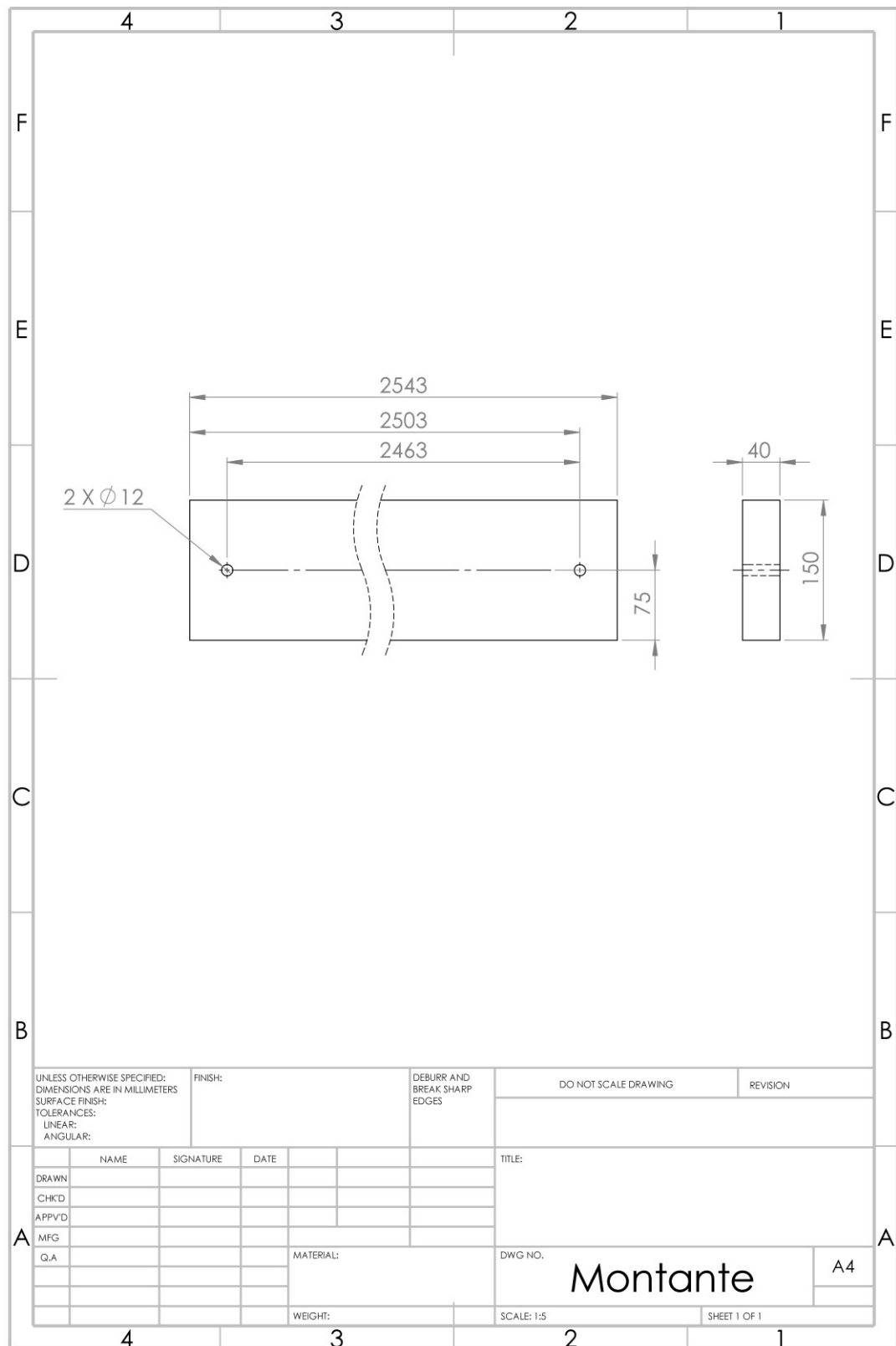


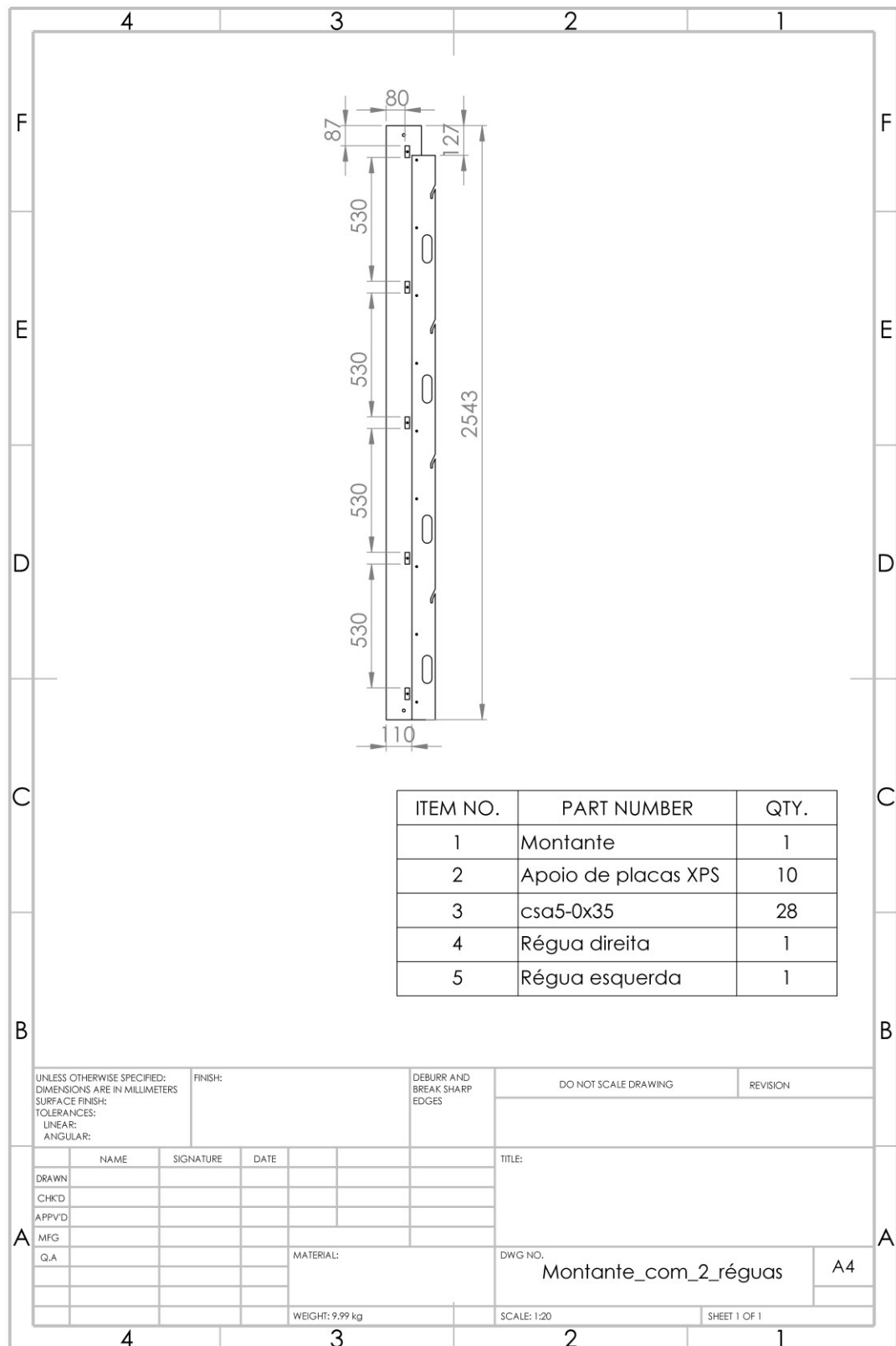




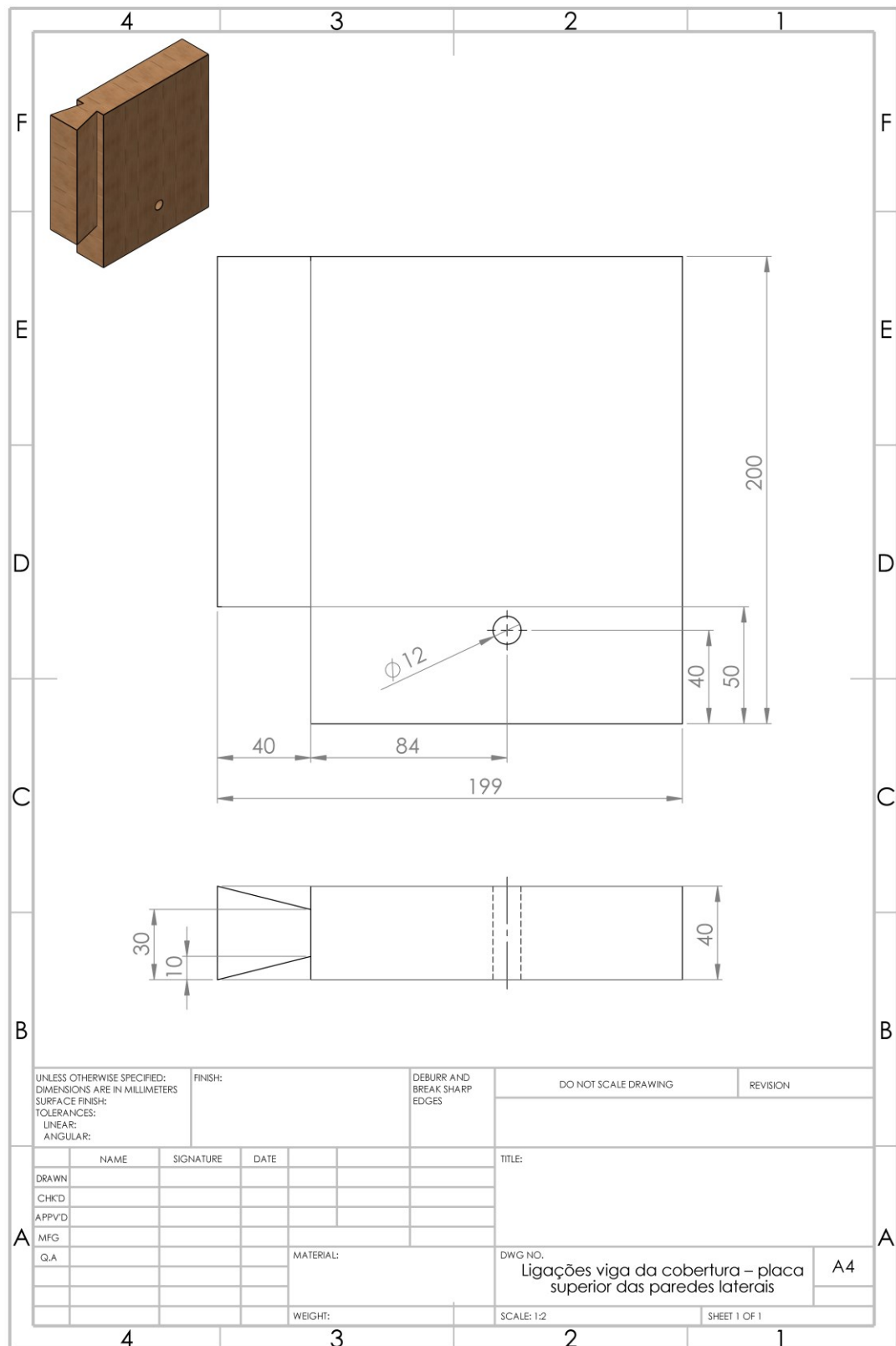


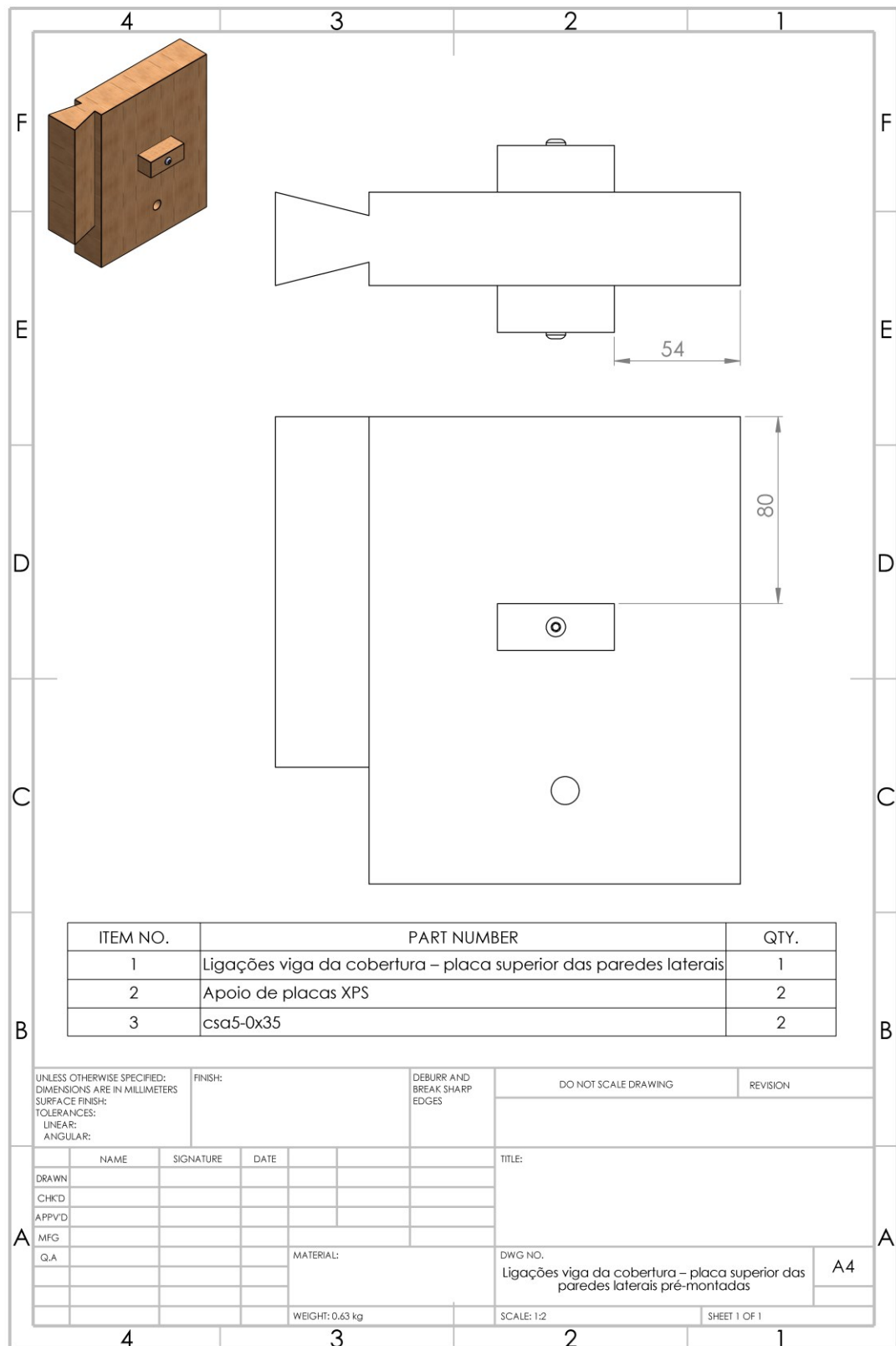


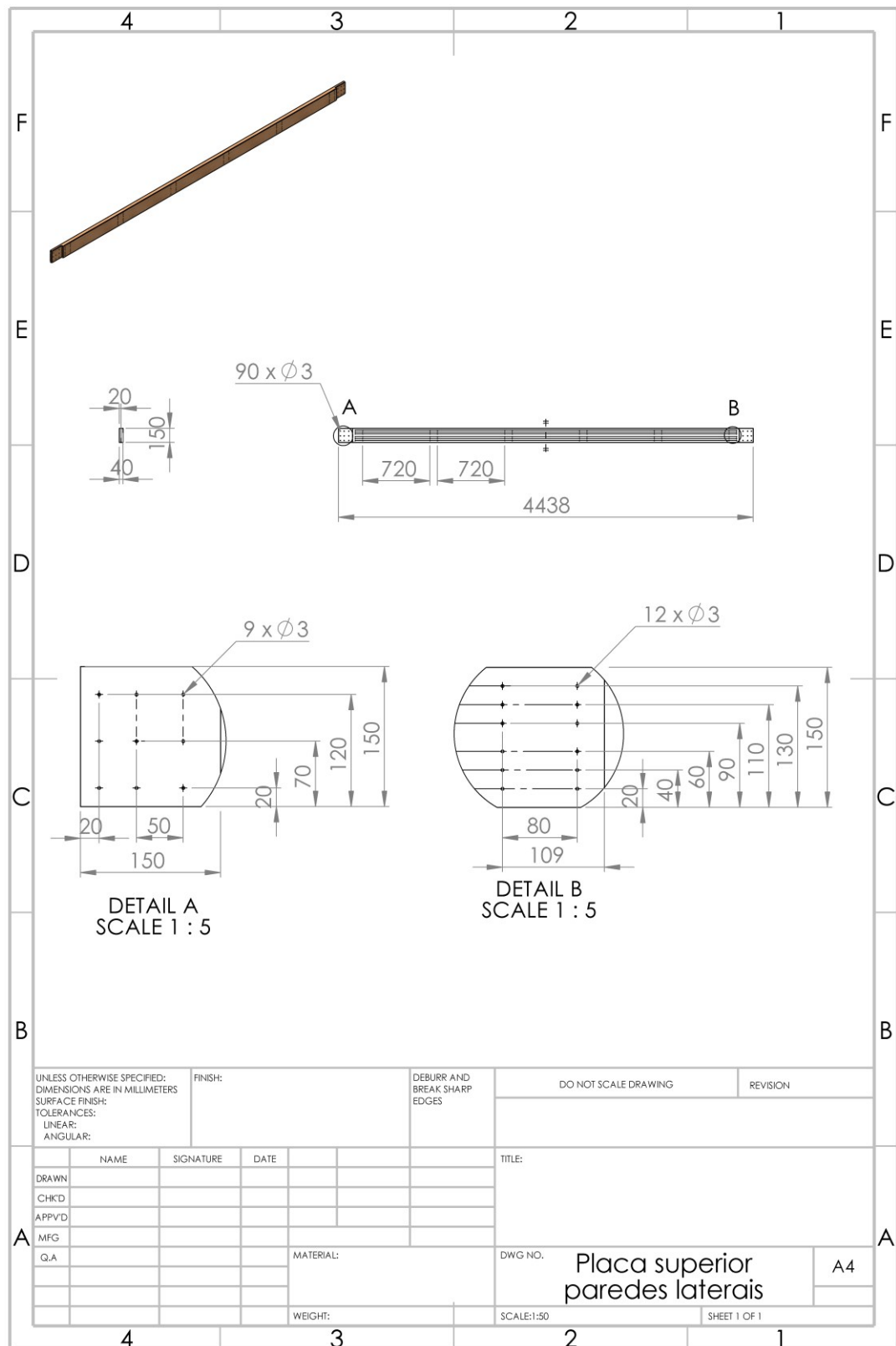


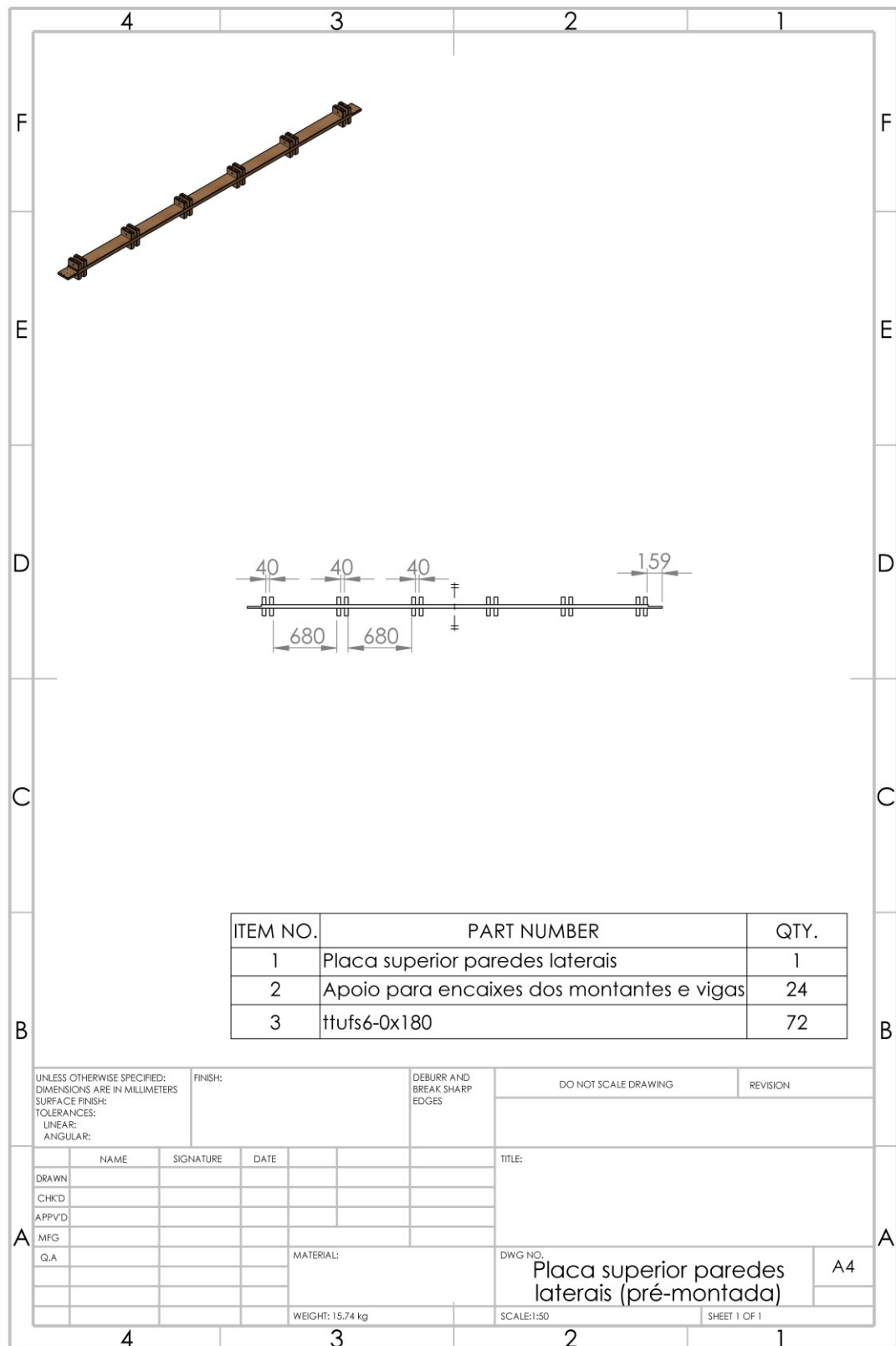


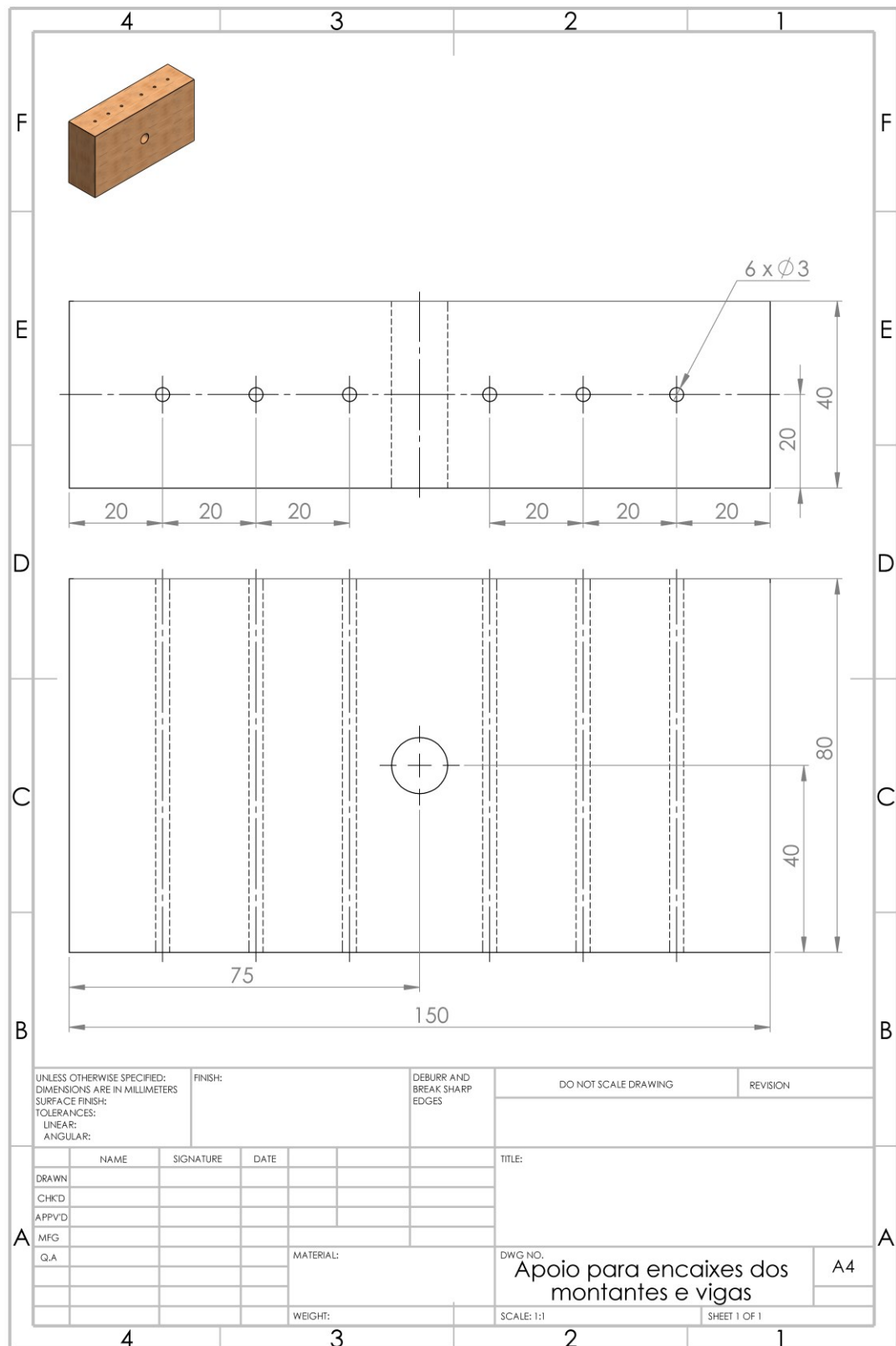
4	3	2	1																																																				
F			F																																																				
E			E																																																				
D			D																																																				
C			C																																																				
B			B																																																				
<small>UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:</small>		<small>FINISH:</small>	<small>DEBURR AND BREAK SHARP EDGES</small>																																																				
		<small>DO NOT SCALE DRAWING</small>																																																					
		<small>REVISION</small>																																																					
		<p>Nota: Todas as restantes cotas são iguais às da régua direita</p>																																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 20%;">NAME</th> <th style="width: 20%;">SIGNATURE</th> <th style="width: 10%;">DATE</th> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 10%;"></th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">DRAWN</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">CHK'D</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">APPV'D</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">MFG</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Q.A</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>			NAME	SIGNATURE	DATE				DRAWN							CHK'D							APPV'D							MFG							Q.A							<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">TITLE:</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="height: 40px;"></td> </tr> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <small>DWG NO.</small> <h2 style="margin: 0;">Régua esquerda</h2> </td> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: middle;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">A4</div> </td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <small>WEIGHT:</small> </td> <td style="vertical-align: top;"> <small>SCALE: 1:20</small> </td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: right;"> <small>SHEET 1 OF 1</small> </td> </tr> </table>		TITLE:				<small>DWG NO.</small> <h2 style="margin: 0;">Régua esquerda</h2>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">A4</div>	<small>WEIGHT:</small>	<small>SCALE: 1:20</small>	<small>SHEET 1 OF 1</small>	
	NAME	SIGNATURE	DATE																																																				
DRAWN																																																							
CHK'D																																																							
APPV'D																																																							
MFG																																																							
Q.A																																																							
TITLE:																																																							
<small>DWG NO.</small> <h2 style="margin: 0;">Régua esquerda</h2>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">A4</div>																																																						
<small>WEIGHT:</small>	<small>SCALE: 1:20</small>																																																						
<small>SHEET 1 OF 1</small>																																																							
4	3	2	1																																																				

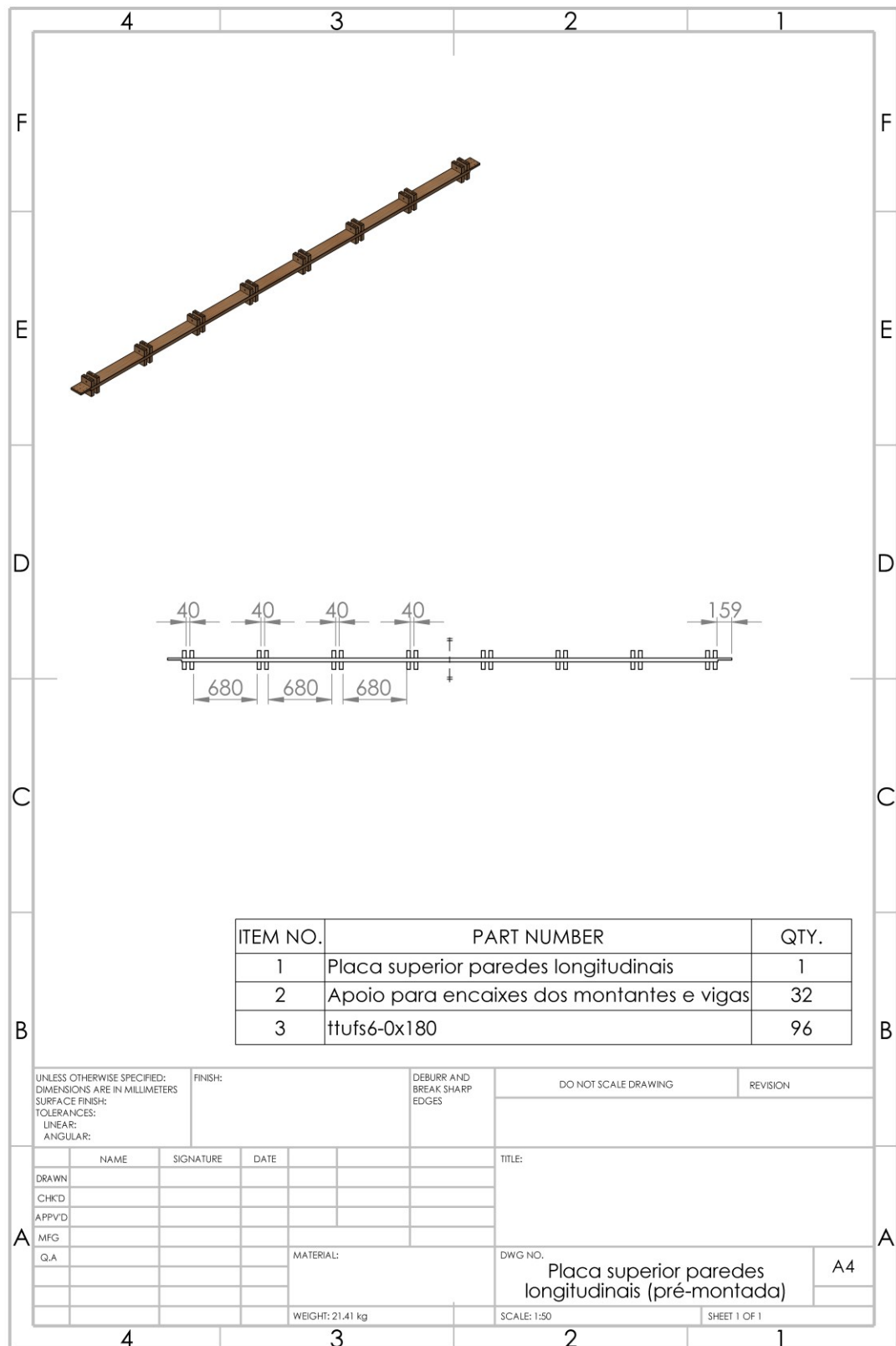


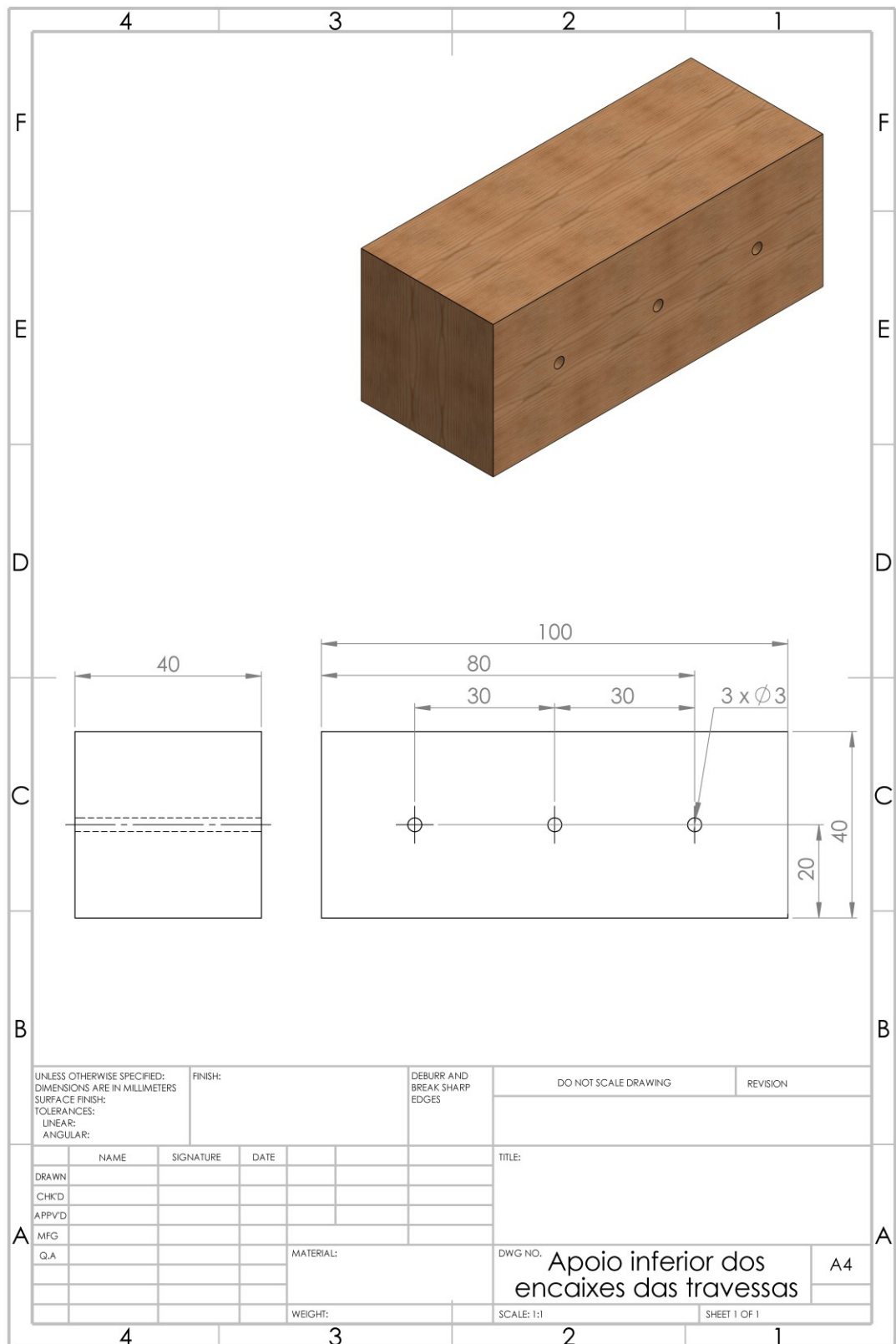


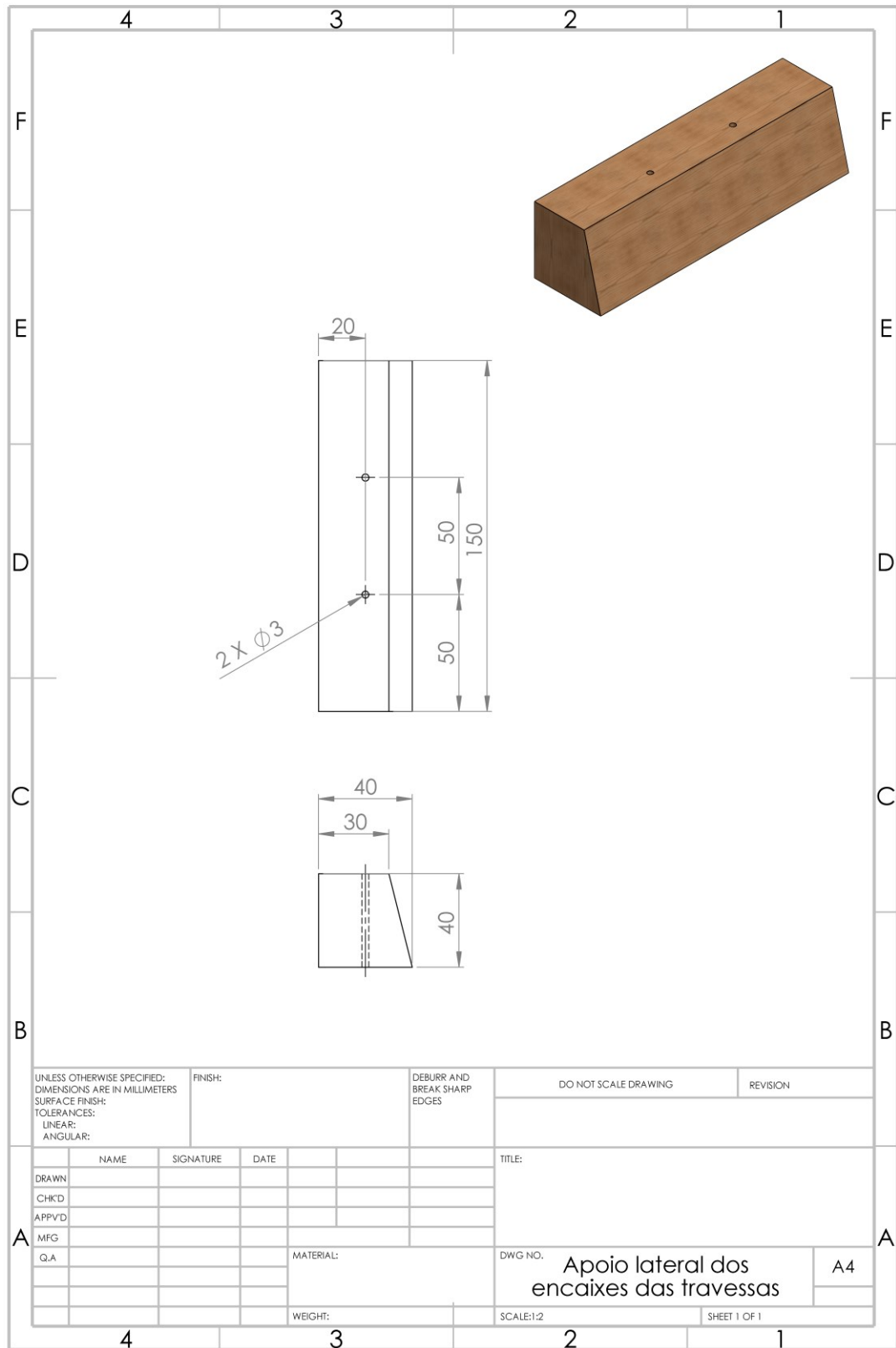












Technical drawing of a beam (Viga fundação) showing a perspective view and a cross-section.

The perspective view shows a beam with a length of 4358 mm and a height of 200 mm. The cross-section shows a width of 40 mm.

The drawing includes a title block with the following fields:

- NAME
- SIGNATURE
- DATE
- MATERIAL
- WEIGHT
- DWG NO.
- TITLE: Viga fundação
- DO NOT SCALE DRAWING
- REVISION
- A4
- SHEET 1 OF 1

