



**Nuno Alexandre  
Novo Medeiros da  
Silva**

**Conceção e desenvolvimento de um edifício  
modular**





**Nuno Alexandre  
Novo Medeiros da  
Silva**

## **Conceção e desenvolvimento de um edifício modular**

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



## **O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor João Alexandre Dias de Oliveira**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor António José Barbosa Samagaio**

Professor Associado com agregação da Universidade do Aveiro

**Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos / Acknowledgements**

Aos meus pais, que me deram todas as condições para terminar o curso e a quem tudo devo. Aos meus novos velhos amigos, que fizeram parte do meu percurso nestes cinco anos e que o fizeram passar tão rápido. Aos professores que me transmitiram o conhecimento necessário para poder ser melhor profissional e que criam um excelente ambiente de aprendizagem no Departamento. Ao Professor Carlos Relvas, por toda a compreensão e ajuda nesta fase, que foi determinante para conseguir acabar a dissertação e iniciar o meu percurso profissional. Ao Eng. Carlos Bicho, que me deu flexibilidade no horário suficiente para conseguir concluir o documento. À Daniela, que teve de aturar tantas casas quanto eu ossos e que me ajudou muito neste período e não só.

A todos muito obrigado!





## Palavras-chave

Modularidade; Habitação; Flexibilidade ; Painéis

## Resumo

Neste documento é abordado o desenvolvimento do produto de uma casa modular, com vista à introdução de elementos diferenciadores no produto que o distinga do resto do mercado, dominado sobretudo pela construção tradicional. O desenvolvimento aqui presente tem como base outra tese de dissertação, denominada "A casa modular vista pela perspectiva de um engenheiro mecânico", que foi essencial para o desenvolvimento do primeiro componente do produto, o painel básico. Após uma revisão da história das casas modulares e da definição dos requisitos do cliente, é iniciado o desenvolvimento do produto utilizando ferramentas - QFD, Modelo de Kano - que permitiram guiar todo o desenvolvimento da melhor maneira. Foram destacados requisitos como a flexibilidade do projeto, a segurança e a transportabilidade do produto, sendo estes os principais pontos tidos em conta. Em seguida, com base no painel referido, é gerado um primeiro conceito que é modelado, utilizando o *software* CAD *Solidworks*. Características como o tamanho dos painéis, posicionamento da estrutura e a morfologia das interfaces foram abordadas, e iteradas num segundo conceito, onde, para além das já referidas, foram tidas em conta outras, como montagem, produção e modularidade. Ao longo deste processo foi utilizada a ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) que não só permitiu prevenir eventuais falhas, como também impulsionou muitas das soluções presentes no conceito final. Com um conceito sólido definido, procede-se à validação da ergonomia, da resistência estrutural e do transporte, de modo a perceber se os requisitos, propostos inicialmente, foram cumpridos. Para tal, foi usado, mais uma vez, o *Solidworks*. A componente de simulação do *software* foi também utilizada para realizar análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos, aplicando-o a elementos estruturais. Esta análise foi feita tendo em conta situações de carga vertical acima do esperado ao longo do tempo de vida do produto, permitindo inferir quais as zonas estruturais críticas a necessitarem de alterações geométricas ou de material. Em conclusão, os objetivos definidos à partida foram atingidos e foi dada resposta aos requisitos estabelecidos. Este conceito, que deu um passo à frente em relação ao projeto iniciado na tese anterior, consiste no início de algo novo no campo das casas modulares, um produto inovador e cheio de potencial para ser explorado e melhorado nas próximas versões.



**Keywords**

Modularity; Habitation; Flexibility; Panels

**Abstract**

In this document, a product development of a modular house is done, with the purpose of introducing differentiative elements on the product, that distinguishes it from the rest of the market, dominated by the traditional construction. This development has as its basis on another dissertation titled "The modular house as seen by a mechanical engineer", which was essential for the development of the first component, the basic panel. After a brief historical review about modular houses and the definition of the customer requirements, the product development is started, using tools - QFD (Quality Function Deployment), Kano's Model - which allowed to guide the project in the best way possible. Requirements like project flexibility, safety or transportability were highlighted in this stage. Next, based on the previously referred panel, the first concept was modeled, using CAD software Solidworks. Characteristics like panel size, structure positioning and interface morphology were worked on and iterated on a second concept on which, in addition to those mentioned, were also taken into account assembly, production and modularity. Along with this process, FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) tool was used to, not only prevent flaws before they happened, but also start many of the solutions that are present in the final concept. With the definition of a solid concept, ergonomic, structural resistance and transportability validations were made, to understand if the requirements initially proposed had been accomplished. To do that, Solidworks was used again to make a dimension study in relation to user and transport container sizes. The simulation tool of this software was also used to make numerical simulations, using FEA (Finite Element Analysis), applied to structural elements. This analysis was done taking into account vertical load situations beyond those expected during the product life cycle, allowing to discover the critical elements in need of geometrical or material alterations. In conclusion, the goals defined in the beginning were accomplished and the requirements were answered. This concept, which has given a step ahead in comparison with the previous thesis, is the beginning of something new in modular house markets, an innovative idea with potential to be explored and improved in the next versions.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	O Produto Modular . . . . .	1
1.2	Objetivos do Trabalho . . . . .	2
1.3	Estrutura . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Revisão do estado de arte</b>	<b>5</b>
2.1	Revisão Bibliográfica . . . . .	5
2.1.1	Casas Pré-fabricadas . . . . .	6
2.1.2	Casas modulares - atualidade . . . . .	7
2.1.3	Fundações . . . . .	9
2.2	Exemplos atuais . . . . .	12
2.2.1	FlatPak . . . . .	12
2.2.2	KITUR . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento do projeto</b>	<b>15</b>
3.1	Normas e limitações ao projeto . . . . .	15
3.1.1	Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU) - Dimensio- namento geral de edificios . . . . .	15
3.1.2	Transportes . . . . .	16
3.1.3	Limitações de peso máximo por estrutura . . . . .	19
3.2	Especificações do projeto . . . . .	19
3.2.1	QFD - <i>Quality Function Deployment</i> . . . . .	19
3.2.2	Modelo de Kano . . . . .	21
3.2.3	Aplicação prática do QFD . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Desenvolvimento do conceito</b>	<b>27</b>
4.1	Proposta 1 . . . . .	27
4.1.1	Desenvolvimento da parede básica . . . . .	30
4.1.2	Ligação a 90 <sup>o</sup> parede - parede . . . . .	33
4.1.3	Desenvolvimento do teto . . . . .	34
4.2	FMEA . . . . .	36
4.3	Proposta 2 . . . . .	37
4.3.1	Parede básica . . . . .	38
4.3.2	Ligação a 90 <sup>o</sup> parede-parede . . . . .	41
4.3.3	Ligação parede-teto . . . . .	42
4.3.4	Desenvolvimento do chão e apoios . . . . .	49
4.3.5	Extremidades dos módulos . . . . .	52

4.3.6	Revisão do conceito . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Validação do conceito final</b>	<b>65</b>
5.1	Simulações . . . . .	65
5.1.1	Vão transversal . . . . .	65
5.1.2	Vão longitudinal . . . . .	74
5.1.3	Viga do chão . . . . .	77
5.2	Componentes . . . . .	79
5.2.1	Transporte contentorizado . . . . .	79
5.3	Apresentação do conceito validado . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos futuros</b>	<b>85</b>
6.1	Conclusões . . . . .	85
6.2	Trabalhos futuros . . . . .	87
<b>A</b>	<b>Lista de componentes</b>	<b>i</b>
<b>B</b>	<b>Lista de componentes no contentor</b>	<b>iii</b>
<b>C</b>	<b>Desenhos técnicos</b>	<b>v</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Níveis de Modularidade na Construção. . . . .	5
2.2	Tabela de preços da KITUR. [1] . . . . .	14
3.1	Dimensões das divisões em $m^2$ Artigo 66. <sup>o</sup> (Redacção do Decreto-Lei n.º650/75, de 18 de Novembro). [2] . . . . .	16
3.2	Dimensões totais mínimas em $m^2$ - Artigo 77. <sup>o</sup> - (Redacção do Decreto-Lei n.º650/75, de 18 de Novembro). [2] . . . . .	16
3.3	Dimensões Normalizadas de Contentores. [3] . . . . .	17
4.1	Comparação dos painéis . . . . .	29
4.2	FMEA aplicado ao painel básico. . . . .	37
4.3	Exemplos da relação das medidas para painéis básicos 500×500 mm. . . . .	45
4.4	FMEA aplicado ao encaixe pilar-viga do teto. . . . .	46
5.1	Valores definidos para o aço S185 no <i>Solidworks</i> . . . . .	66
5.2	Características do Aço AISI 4340 normalizado no <i>Solidworks</i> . . . . .	73
A.1	Lista de componentes . . . . .	ii
B.1	Lista de componentes no contentor . . . . .	iii





# Lista de Figuras

1.1	Nomenclatura adotada ao longo do documento. . . . .	3
2.1	<i>Manning's Cottage House</i> - 1833.[4] . . . . .	6
2.2	<i>Nissen Hut</i> em construção - 1945. . . . .	7
2.3	<i>Ferembal Demountable House</i> - 1948. . . . .	7
2.4	<i>Dymaxion House</i> - 1952. . . . .	7
2.5	Esquema que mostra o processo associado à construção de casas modulares. . . . .	9
2.6	Construção de cave: as paredes servirão de suporte à estrutura da casa modular. . . . .	10
2.7	Construção de cave: moldes de madeira para vazamento do betão. . . . .	10
2.8	Posicionamento de módulo sobre fundação de betão. . . . .	11
2.9	Apoios, “âncoras” e chassis - construção e vista em corte. . . . .	12
2.10	Exemplos de construção da FlatPak e adaptabilidade ao terreno. [5] . . . . .	13
2.11	Parte do catálogo da KITUR. [6] . . . . .	13
2.12	Transporte e montagem de uma casa KITUR. [6] . . . . .	14
3.1	Contentores normalizados e meios de transporte de cargas. . . . .	17
3.2	Comparação entre contentores - 2x20', 40', 45', 48' e 53'. . . . .	18
3.3	Número de alterações ao produto [7] . . . . .	20
3.4	Esquema da Casa da Qualidade. . . . .	20
3.5	Modelo de Kano. . . . .	22
3.6	Modelo de Kano para este conceito. . . . .	23
3.7	QFD elaborado para este projeto. . . . .	24
3.8	Gráficos com priorização de requisitos - QFD. . . . .	25
3.9	Gráficos com priorização de métricas - QFD. . . . .	25
4.1	Exemplos formatos possíveis com elementos quadrangulares e retangulares. . . . .	28
4.2	Painel que serve de base a este projeto. [8] . . . . .	28
4.3	Análise morfológica dos formatos possíveis para a formação das paredes. . . . .	29
4.4	Aberturas na parede necessárias para encaixe de elementos básicos da casa. . . . .	30
4.5	Desenho da primeira versão de um painel básico. . . . .	31
4.6	Painéis concebidos para o primeiro conceito. . . . .	32
4.7	Aberturas para encaixe de elementos no primeiro conceito - portas e janelas. . . . .	32
4.8	Número de blocos modelados para versão CAD da primeira proposta - as linhas a vermelho representam o topo de cada bloco. . . . .	33
4.9	Primeiro conceito para a ligação do canto. . . . .	33
4.10	Secção transversal de um módulo. . . . .	34
4.11	Primeiro conceito para a ligação parede-teto. . . . .	35

4.12	Primeiro conceito, revisto, para a ligação parede-teto. Secção transversal e respetivo esboço - cores iguais representam os mesmos elementos. . . . .	36
4.13	Reorientação do encaixe topo-base dos painéis. . . . .	38
4.14	Conceito do bloco básico final - elemento e conjunto. . . . .	39
4.15	Aberturas para encaixe de elementos no segundo conceito - portas e janelas. . . . .	40
4.16	Esboço da estrutura para uma abertura genérica. . . . .	40
4.17	Estrutura para aberturas genéricas - porta à esquerda e janela à direita . . . . .	41
4.18	Segundo conceito para a ligação do canto - esboço e desenho CAD. . . . .	42
4.19	Primeira ideia para um sistema de dobradiça no encaixe. . . . .	43
4.20	Segunda iteração com um sistema de dobradiça no encaixe pilar-viga: mudança de posição da viga longitudinal. . . . .	43
4.21	Terceira e final iteração com um sistema de dobradiça no encaixe pilar-viga: troca de posição das vigas longitudinal e transversais. . . . .	44
4.22	Tampas com geometria variável - face vermelha é coincidente com a face exterior da parede longitudinal da casa. . . . .	44
4.23	Medidas da tabela 4.3 evidenciadas a cores diferentes. . . . .	45
4.24	Quarta iteração do elemento de ligação do pilar da parede e viga do teto. . . . .	47
4.25	Tampas descritas nesta secção. . . . .	49
4.26	Primeiro conceito para o encaixe da viga do chão com o pilar da parede. . . . .	50
4.27	CAD final do encaixe da viga do chão com o pilar da parede. . . . .	51
4.28	Zona encastrada com betão do encaixe. . . . .	51
4.29	Morfologias adotadas na parede transversal. . . . .	52
4.30	Deslize da viga para encaixe dos painéis do teto - hipótese de montagem. . . . .	54
4.31	Painel básico dividido. . . . .	55
4.32	Base de betão com reêntrancias para acomodação dos encaixes. . . . .	56
4.33	Encaixe dos pilares, vigas e respetivos encaixes. . . . .	56
4.34	Base de betão com vigas do chão e pilares encastrados. . . . .	57
4.35	Montagem das paredes, aberturas e encaixes. . . . .	58
4.36	Montagem dos encaixes parede-teto e das vigas longitudinais. . . . .	59
4.37	Montagem dos encaixes parede-teto e respetivas vigas. . . . .	59
4.38	Montagem dos painéis com o auxílio de grampos. . . . .	60
4.39	Montagem dos painéis do teto - necessidade de uma face livre para aperto do painel. . . . .	60
4.40	Montagem dos painéis do chão . . . . .	61
4.41	Montagem das tampas das paredes transversais . . . . .	61
4.42	Montagem das tampas da ligação parede-teto da paredes longitudinal inferior. . . . .	62
4.43	Montagem das tampas da ligação parede-teto das parede longitudinal inferior - ângulo inverso. . . . .	62
4.44	Tampas da ligação parede-teto da parede longitudinal superior. . . . .	63
5.1	Pinos utilizados para a fixação da Viga. . . . .	66
5.2	Faces encastradas e sentido da aceleração gravítica e zona onde é aplicada a carga distribuída. . . . .	67
5.3	Definições do controlo de malha. . . . .	67
5.4	Definições da malha e malha obtida. . . . .	68
5.5	Resultados para a primeira simulação - flecha. . . . .	69

5.6	Resultados para a primeira simulação - tensão de Von Mises. . . . .	69
5.7	Encaixe com alterações. . . . .	70
5.8	Distribuição das tensões de Von Mises na segunda iteração do encaixe. . .	71
5.9	Malha gerada e alterações realizadas ao encaixe para terceira iteração. . .	71
5.10	Distribuição das tensões de Von Mises na terceira iteração. . . . .	72
5.11	Distribuição das tensões de Von Mises na terceira iteração - zonas críticas.	72
5.12	Distribuição das tensões de Von Mises na quarta iteração - zonas críticas.	74
5.13	Resultados para a última iteração - flecha (deformação encontra-se exage- rada para melhor perceção). . . . .	74
5.14	Cargas aplicadas nesta simulação. . . . .	75
5.15	Definição das faces encastradas. . . . .	76
5.16	Resultados para a simulação da viga transversal - tensão de Von Mises. . .	76
5.17	Resultados para a simulação da viga transversal - flecha. . . . .	77
5.18	<i>Assembly</i> , condições-fronteira e malha para simulação em questão. . . . .	78
5.19	Resultados para a simulação da viga do chão - tensão de Von Mises e flecha.	79
5.20	Elementos posicionados no contentor para transporte. . . . .	80
5.21	Peso total do conjunto. . . . .	81
5.22	Modelo humano com 1.90 m num módulo da casa - medida de 2.5 m de altura da porta e janela, 1 m de altura inferior da janela (situada na parede oposta). . . . .	82
5.23	<i>Renders</i> do produto final, numa configuração com dois módulos - 1 . . . .	83
5.24	<i>Renders</i> do produto final, numa configuração com dois módulos - 2 . . . .	83
5.25	<i>Renders</i> do produto final, numa configuração com dois módulos - 3 . . . .	84



# Capítulo 1

## Introdução

O desenvolvimento das casas modulares e de construções pré-fabricadas tem sofrido um crescimento enorme na sua comercialização para fins habitacionais ao longo dos últimos anos. Os benefícios que este método de construção acarreta, sem comprometer a habitabilidade e conforto da construção tradicional, tem atraído mais investimento e um número cada vez maior de oferta e de soluções, bem como de compradores.

A ideia da casa pré-fabricada parte da análise da mesma como se fosse outro produto qualquer. Tal como Henry Ford, que sistematizou todo o processo fabril da construção do *Ford Model T*, também é possível que o processo da construção da casa seja feito no chão de fábrica com elementos que chegam ao local de construção já montados.

No entanto, a construção destas casas modulares, em muitos casos, ainda parte com base em noções e soluções do método tradicional, muito focado em cada projeto e em cada caso, principalmente porque grande parte dos intervenientes não têm conhecimento acerca dos métodos e ferramentas do Desenvolvimento do Produto [9]. Tendo em conta que o foco da construção e do desenvolvimento deixa de estar assente no local final de construção e passa estar no chão de fábrica, faz sentido que este tipo de produto seja desenvolvido com base em métodos que são naturais à Engenharia e Construção Mecânicas, nomeadamente na área de Desenvolvimento do Produto. Isto permite, também, tornar mais eficiente o processo de construção permitindo, desse modo, a redução dos custos associados e o aumento da qualidade, devido ao controlo das condições de construção.

Este Projeto de Dissertação surge como continuação da Tese de Dissertação da Eng<sup>a</sup> Mafalda Varela, permitindo o desenvolvimento de sistemas e soluções que não foram explorados nesse documento e apoiando-se naqueles aí estudados.

### 1.1 O Produto Modular

À partida, o produto modular em si acarreta vantagens face ao produto integral, apesar de apresentar novos desafios que a ele são inerentes. Podem-se extrair metas para a construção em massa de uma casa modular, uma vez que se podem aplicar estes conceitos ao produto em questão e definir, à partida, certos requisitos e objetivos. Destacam-se os seguintes:

- Maior variedade de produtos - o facto de podermos combinar diferentes módulos, permite criar novos produtos que, aos olhos do consumidor são diferentes, mas que em que os métodos e ferramentas de fabrico são mantidos na sua maioria;

- Diferenciação em massa - possibilidade de haver uma personalização ao gosto de cada cliente através de processos flexíveis e que ao mesmo tempo mantêm o volume de produção alto;
- Redução de custos de investimento em novos produtos semelhantes - aproveitamento dos custos fixos já concretizados;
- Economias de escala - ao serem utilizados os mesmos componentes em diferentes produtos, é possível reduzir os custos de produção, compra de matéria-prima e de transporte;
- Subcontratação e/ou trabalho cooperativo - diferentes entidades podem trabalhar para o mesmo produto;
- Facilidade de manutenção - as reparações e a reciclagem tornam-se mais fáceis. [10]

As vantagens do produto modular face ao integral são claras e é com base nestas vantagens que se pretende desenvolver o produto.

## 1.2 Objetivos do Trabalho

O objetivo desta dissertação passa pela conceção de um edifício modular de forma a que as suas partes constitutivas se possam configurar sem risco de comprometimento estrutural, algo que não foi estudado na tese sobre a qual este trabalho assenta, tese essa que se focou sobretudo no desempenho térmico de um edifício modular [8]. Com este trabalho, pretende-se ainda introduzir inovações e melhorias face ao que existe no mercado, sobretudo ao nível da flexibilidade do projeto e flexibilidade pós-construção do edifício. Deste modo, são introduzidas características diferenciadoras no produto que, em teoria, irão colmatar fraquezas da construção tradicional, retirando todos os benefícios possíveis de um produto modular aplicado a este caso em concreto.

A casa modular deve satisfazer os critérios e requisitos do cliente, quer os que normalmente estão associados à construção dita normal, quer os propostos para esta construção modular.

## 1.3 Estrutura

Esta dissertação divide-se em seis capítulos principais e anexos. A sua organização segue o fio condutor normalmente usado nesta área, uma vez que torna mais fácil a análise de todo o processo e perceber as decisões tomadas. Para facilitar a sua interpretação, um resumo de cada capítulo, excluindo o primeiro por ser introdutório, é feito em seguida:

- No segundo capítulo é feita uma análise histórica a alguns casos de modularidade aplicada à habitação, com foco no porquê desta característica ter ocorrido. São também apresentados dois exemplos atuais, muito diferentes entre si, o que permite abordar ideias diferentes e ter uma abordagem comparativa com estes casos, mais à frente no documento.

- No terceiro capítulo é iniciado o desenvolvimento do produto com foco nas limitações existentes em termos legislativos em Portugal ao nível da habitação e do transporte, fatores cruciais para balizar certos aspetos de engenharia no produto. São também definidos e analisados os requisitos do cliente e aplicadas ferramentas do desenvolvimento do produto nessa análise.
- No capítulo 4 o primeiro conceito nasce a partir da informação descrita nos capítulos anteriores. É construído e desenvolvido até surgir a necessidade de uma mudança de conceito, que força o avanço de uma segunda iteração, que é aprimorada até ao conceito final.
- No capítulo 5 são utilizadas ferramentas de simulação para validar ou indicar alterações ao conceito, através de dados recolhidos das mesmas. Estes dados são em seguida analisados, de modo a fazer uma avaliação crítica aos mesmos e avaliar outros processos alternativos. Aqui também são realizadas análises de ergonomia e de transportabilidade.
- No último capítulo são retiradas conclusões acerca do produto e dos processos utilizados, fazendo uma análise crítica aos mesmos, indicando os pontos fortes e fracos. Além disso, são sugeridos tópicos que deem continuidade ao projeto, quer na melhoria do conceito em geral, quer em certos aspetos mais específicos do conceito gerado neste documento.

Ao longo do documento, são utilizados os termos paredes longitudinais e transversais. De modo a melhorar a interpretação, a sua representação encontra-se na figura 1.1 e tem como base as medidas do paralelepípedo.

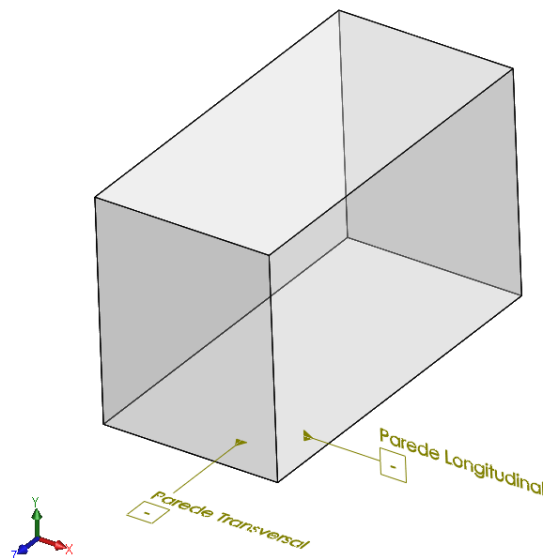


Figura 1.1: Nomenclatura adotada ao longo do documento.





## Capítulo 2

# Revisão do estado de arte

### 2.1 Revisão Bibliográfica

Existem vários níveis de modularidade que podem ser utilizados na construção de casas pré-fabricadas ou modulares, conforme se pode verificar na tabela 2.1 [11]. A construção civil tradicional está no nível de modularidade mais baixo (modularidade quase inexistente), onde os materiais, muitas vezes ainda na sua forma mais básica (são exemplos areia, água e pó de cimento para, misturados no local de construção, fazer betão) são levados até ao local de construção. Pelo contrário, a construção modular pode ter soluções de painéis pré-fabricados ou até módulos inteiros pré-fabricados que são transportados até ao local já concluídos.

Tabela 2.1: Níveis de Modularidade na Construção.

Nível de Modularidade	Tipo	Definição
<b>Elevado</b>	<b>Completa</b>	Elementos-caixa, volumes, edifício completo entregue no local de destino.
	<b>Modular</b>	Elementos estruturais, potencialmente preparados, enviados e montados no local de construção.
	<b>"Pods"</b>	Estrutura pré-montada. Unidades completamente montadas que são ligadas a uma estrutura criada no local de construção.
	<b>Painéis</b>	Elementos estruturais não-volumétricos que podem ser utilizados para criação de espaços Exemplo - SIP's (Structured Insulated panels) e painéis de cimento pré-fabricados.
<b>Baixo</b>	<b>Estruturas Pré-Montadas</b>	Componentes pré-fabricados que não podem ser feitos no local de construção. Exemplo - portas
	<b>Materiais</b>	Materiais de construção normalizados, utilizados no local de construção.

### 2.1.1 Casas Pré-fabricadas

A construção pré-fabricada pode ser definida como sendo um processo normalmente realizado numa fábrica especializada, em que materiais são combinados para formar componentes que, posteriormente, são levados até ao destino e montados na instalação final. [12] [13]

O primeiro caso de construções pré-fabricadas, foi a *Manning's Cottage* (ver figura 2.1) que era construída em Londres para exportação, ainda em 1833. A partir daí, durante o restante século XIX, o uso de edifícios pré-fabricados esteve quase sempre relacionado com a transformação de zonas ou países pouco desenvolvidos, permitindo que, rapidamente, os habitantes dessa região conseguissem ter condições e níveis de conforto semelhantes ao dos países ocidentais: desde o envio de casas de madeira para a Austrália e Nova Zelândia, a casas de chapa metálica para as Caraíbas francesas, construções para a colonização de África ou de apoio à corrida ao ouro da Califórnia, foram muitas as razões que levaram à construção de edifícios pré-fabricados nessa época. [4]

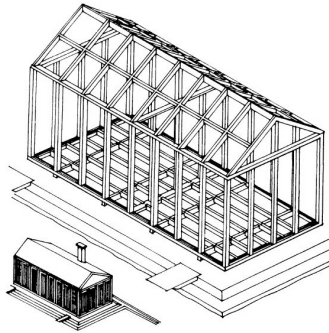


Figura 2.1: *Manning's Cottage House* - 1833.[4]

Com a chegada do século XX, as construções pré-fabricadas passaram a ser associadas ao esforço de guerra por parte dos países envolvidos, de modo a rapidamente conseguirem alojar soldados em zonas estratégicas ou realojar pessoas que viram as suas casas serem destruídas.

Exemplos disso, foram o *Nissen Hut*, usado na Alemanha e países vizinhos e a *Ferrembal Demountable House*, muito utilizada em França. O primeiro consistia em chapas metálicas dobradas à volta de uma estrutura simples de madeira e ferro, de modo a fazer uma cobertura semi-tubular que servia de abrigo aos elementos (ver figura 2.2). O segundo, feito de madeira e alumínio, assentes numa estrutura de aço, usava painéis de madeira pré-fabricados que eram encaixados no local, de modo a formar as paredes, e pilares metálicos para sustentação da cobertura (ver figura 2.3). [4]

Paralelamente, de acordo com o livro *The Prefabricated Home*[14], eram vários os arquitetos e inventores que tentavam dar o seu contributo à indústria, tendo surgido vários projetos, patentes e protótipos de casas pré-fabricadas com o intuito de, por um lado, fornecer casas produzidas em massa para o mercado dos Estados Unidos e, por outro, manter a produtividade das fábricas no pós guerra, permitindo a manutenção dos postos de trabalho e da economia de muitas zonas deles dependentes.

Um exemplo disso é a *Dymaxion House* (figura 2.4), um conceito futurista que tentou aproveitar as fábricas, os materiais e os conhecimentos aeronáuticos para conseguir uma

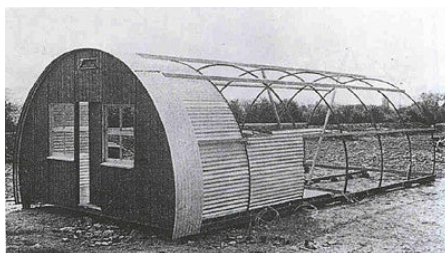


Figura 2.2: *Nissen Hut* em construção - 1945.



Figura 2.3: *Ferembal Demountable House* - 1948.

habitação leve, resistente e barata, feita principalmente de aço e alumínio. O formato permitia estabilidade aerodinâmica com ventos elevados, minimizava a transferência de calor com o ambiente exterior e alimentava os caudais de ventilação para renovação do ar interior.

Estimou-se que era possível construir cerca de 60 000 casas a um custo por unidade de 6500\$, preço semelhante ao de um *Cadillac* e já existiam potenciais clientes, mas investimento inicial necessário, estimado em 10 milhões de dólares, e a reticência do criador em avançar com o projeto acabaram por ditar o fim do do mesmo, tendo sido construída apenas uma casa em 1952, apesar de o desenho já datar de 1927.



Figura 2.4: *Dymaxion House* - 1952.

### 2.1.2 Casas modulares - atualidade

Hoje, existem várias empresas que já fornecem “kits” de montagem, enviando os componentes pré-fabricados ou módulos para o cliente, podendo ser o próprio a montar, a

empresa ou alguém contratado pelo cliente.

Os desafios para a empresa de casas modulares são muito diferentes dos desafios de uma de construção civil e muito mais associados com linhas de montagem e transporte.

Por exemplo, no caso dos transportes, num caso de estudo [11] em que se tentou a construção de casas modulares na China - aproveitando a mão-de-obra e materiais mais baratos - para o mercado australiano, os módulos foram transportados, após embalagem em material plástico, em contentores desde o local de construção até ao porto mais próximo, utilizando camiões. Depois, foram transportados num porta-contentores até ao porto de destino na Austrália realizando, por fim, outra viagem de camião até ao local de montagem. Nalguns contentores, verificaram-se danos nos painéis sanduíche que constituíam os módulos e que necessitaram de troca, devido a danos de impacto e falhas de isolamento e estanquicidade.

Foram também verificados problemas com a montagem devido ao peso das estruturas, chegando algumas às 12 toneladas. Este caso de estudo serve de alerta, indicando que estes pontos são críticos para o projeto.

Assim, é possível encontrar semelhanças entre as várias soluções para este mercado, uma vez que todas têm problemas e desafios semelhantes, apesar de existirem produtos com abordagens e níveis de modularidade diferentes. Todos os casos têm um esquema semelhante ao da figura 2.5, que mostra uma das vantagens do produto modular face à construção tradicional. Após definido o produto entre a empresa e o cliente e de todas as licenças tratadas, pode-se dar início à produção dos componentes (sendo que alguns até já podem estar em *stock*, se forem estandardizados) e, ao mesmo tempo, dar início à preparação do terreno de construção, caso seja necessário. Na construção tradicional isto não é possível pelo simples facto de que a casa só poder começar a ser construída após a preparação do terreno.

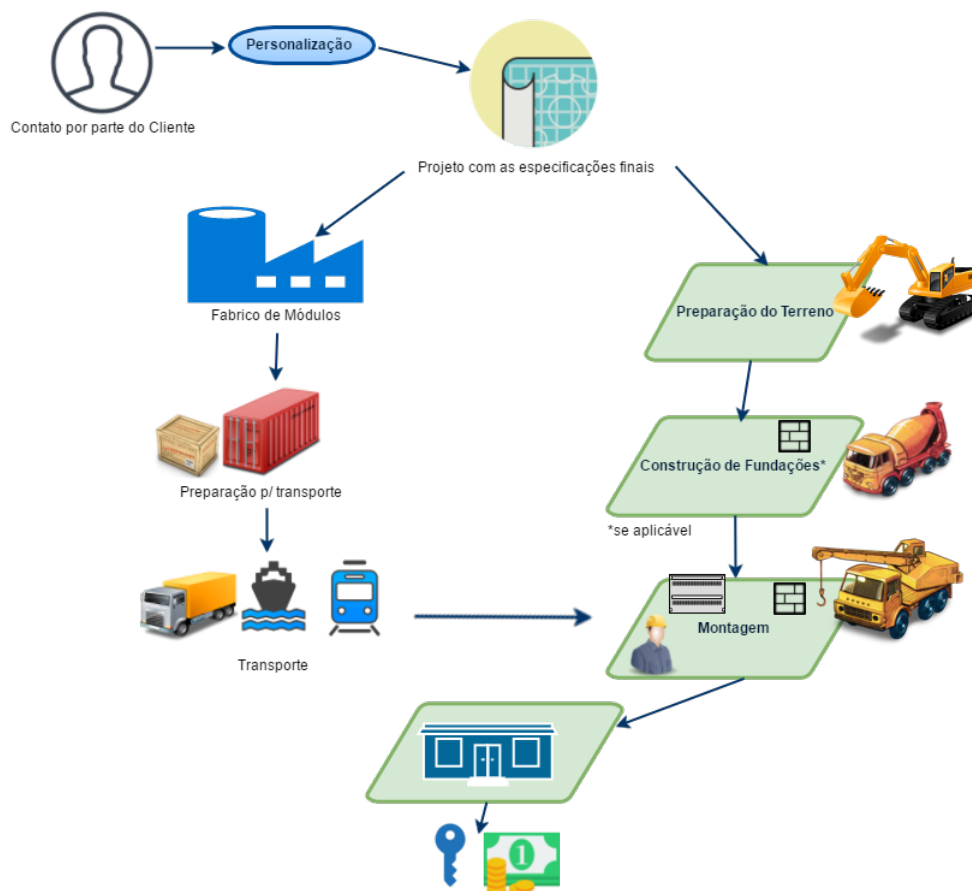


Figura 2.5: Esquema que mostra o processo associado à construção de casas modulares.

### 2.1.3 Fundações

Em muitos casos, é necessária a construção de fundações, sobre as quais é montada a casa modular. Para tal, são normalmente utilizados materiais como como betão, aço ou madeira, de modo a obter rigidez estrutural necessária para suportar as estruturas suprajacentes.

Na construção das fundações para este tipo de casas, é preciso ter especial atenção ao posicionamento dos apoios e uma elevada precisão - enquanto que na construção tradicional, se existir um desvio de um apoio por um qualquer motivo, é possível ajustar as fases seguintes de modo a colmatar esse desvio, na construção de casas modulares, uma vez que os módulos são construídos antes ou durante a preparação do terreno e construção dos alicerces, os ajustes imputarão atrasos e custos acrescidos à obra, pelo que são altamente desaconselháveis.

Em seguida são apresentadas algumas soluções para fundações, que podem ser usadas em construções modulares ou tradicionais.

#### Solução com Cave

Uma das soluções que, por um lado, aumenta a área total útil da casa e, por outro, facilita a instalação de todos os sistemas (elétricos, AVAC etc.) é a de construção em profundi-

dade. Normalmente, é utilizado betão com material isolante, de modo a impermeabilizar as paredes e chão e evitar infiltrações (ver figura 2.6).



Figura 2.6: Construção de cave: as paredes servirão de suporte à estrutura da casa modular.

Apesar de tornar outras fases do projeto mais fáceis e de constituírem uma base sólida para o posicionamento dos módulos, esta é a solução mais cara, quer devido à quantidade de material utilizado, quer devido os custos de escavação do terreno e da própria construção (ver figura 2.7). Estes custos são, muitas vezes, uma percentagem significativa do custo total da casa.



Figura 2.7: Construção de cave: moldes de madeira para vazamento do betão.

### Soluções sem cave

De acordo com o livro “The Modular Home” [15], por norma, a construção de uma única base sólida de betão não é aconselhável: como os painéis ou módulos são pré-fabricados, seguindo todos linhas muito semelhantes, é mais fácil que as tubagens de água, saneamento e AVAC e ligações elétricas estejam acondicionadas num espaço inferior à casa. Desta maneira é possível adaptar o projeto ao local de construção, interferindo o mínimo possível com os módulos e/ou painéis. Por outro lado, a existência desta caixa de ar por

baixo da casa acarreta vantagens do ponto de vista térmico e previne infiltrações. Ainda de acordo com o livro, é especificado que esta altura deverá rondar os 90cm, mas podem ser encontradas soluções com altura menor.

### Perímetro de betão

Uma das opções é a construção de uma estrutura semelhante à da cave, mas com altura muito inferior. Podem ser adicionados pontos de apoio centrais que ajudem no suporte, tal como nas caves. São mais baratas em comparação com as caves, uma vez que a preparação do terreno é mais rápida e é utilizado muito menos material (ver figura 2.8). [15]



Figura 2.8: Posicionamento de módulo sobre fundação de betão.

### Apoios de betão

Outra hipótese é a utilização de pilares de betão que suportem uma estrutura de metal ou madeira que serve de chassis para a casa modular. Isto reduz em muito o material utilizado, principalmente a quantidade de betão, reduzindo também o trabalho necessário a ser desempenhado no local de construção antes da chegada dos módulos/estruturas. Para além disso, de modo a manter a rigidez estrutural em casos extremos (ventos fortes ou sismos por exemplo), são utilizadas “âncoras” laterais, que impedem movimentos laterais do do chassis e, por conseguinte, da casa. [15]

É possível e até aconselhável vedar a zona inferior, de modo a criar uma caixa de ar relativamente estanque uma vez que traz benefícios térmicos e impede o abrigo de animais, algo que pode ser problemático para o conforto dos utilizadores.

### Soluções sem fundações

Também é possível encontrar soluções sem fundações, onde as estruturas são montadas sobre um chassis de metal ou madeira e são pousadas em solo terraplanado. Em seguida, o chassis é ancorado através de correias, à semelhança do que acontece com os apoios de betão, de modo a evitar movimentos com ventos muito elevados, por exemplo.

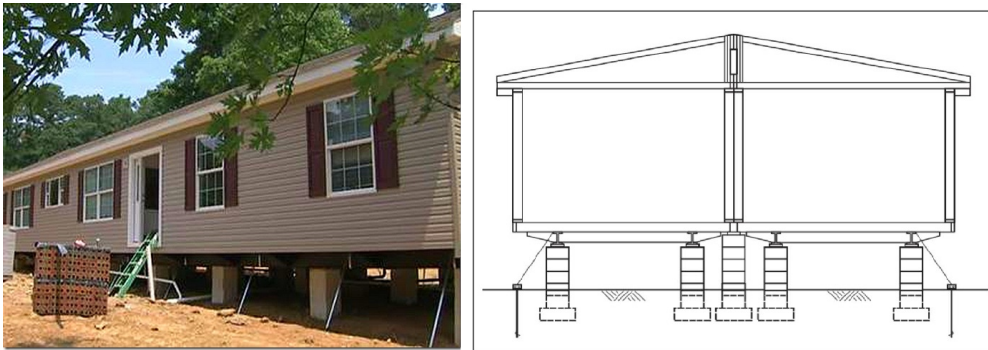


Figura 2.9: Apoios, “âncoras” e chassis - construção e vista em corte.

## 2.2 Exemplos atuais

Em seguida, estão dois exemplos muito diferentes de soluções atuais comercializadas. Primeiro, é apresentada uma solução com SIP's (*Structured Insulated Panels*) com fundações com perímetro em betão, podendo ter também cave. O segundo exemplo, completamente modular, assenta sobre um chassis metálico, não tendo fundações.

### 2.2.1 FlatPak

Um bom exemplo de um projeto semelhante ao pretendido é a empresa *FlatPak*, que aposta num conceito flexível e que permite ter casas com um ou dois pisos com variação de área, combinando diferentes módulos, apresentado na figura 2.10. De acordo com um texto publicado na revista *Dwell*[16], existem três componentes base: painéis de cimento para as paredes; painéis com moldura de madeira, preenchidos por metal, madeira com revestimento de cimento; e molduras de madeira com grandes áreas de vidro. O teto é feito com SIP's de metal e isolamento térmico em sanduíche e todos os painéis das paredes assentam numa base de cimento que serve de fundação.

De acordo com o site da empresa[17] o preço base inclui, para além da estrutura, componentes para cozinha, casa de banho e armários nos quartos, sistemas de ventilação ar-ar e aquecimento por chão radiante, iluminação e canalização e ainda montagem por uma equipa especializada. Assim, os custos não cobertos passam pela preparação do local de construção, licenças e canalização até ao local de construção.

No entanto, é possível encontrar por fóruns da internet, reclamações de compradores que ficaram descontentes pela falta de qualidade de acabamentos dos componentes, sendo necessário à equipa de construção retificar painéis e vidros ou até substituir os mesmos, quer por estarem danificados, quer por não estarem produzidos de acordo com as especificações ou com as dimensões requeridas. Isto levou a atrasos na entrega do produto, fazendo com que uma das grandes mais valias da casa modular - o prazo de entrega da obra - não se tenha verificado. Provavelmente (a informação encontrada é escassa) tratar-se-á de um problema esporádico, uma vez que os comentários são, no geral, positivos. O preço base ronda os 119 000 \$. [5]





Figura 2.10: Exemplos de construção da FlatPak e adaptabilidade ao terreno. [5]

### 2.2.2 KITUR

A KITUR é uma marca portuguesa que fabrica casas modulares em e para Portugal continental, com um nível completo de modularidade. Os elementos-caixa são totalmente construídos em fábrica e levados até ao local de construção, onde são colocados na posição correta. Cada módulo pode variar em área -  $5 \times 2.5\text{m}$  até  $13.5 \times 4\text{m}$ .

De acordo com o catálogo, a base é um chassis de aço galvanizado que suporta o chão, de aço galvanizado e betão leve. As paredes e o teto são compostos por estruturas com perfis de aço e painéis de aço termolacado com poliuretano de 40mm.

Isto permite uma elevada flexibilidade, tendo a empresa 23 opções para o cliente em catálogo, que podem ser ajustadas e personalizadas de acordo com as necessidades e preferências do comprador (ver figura 2.11). Além disso, também permite a alteração da disposição dos módulos ou até o acréscimo ou decréscimo de unidades. [6]



Figura 2.11: Parte do catálogo da KITUR. [6]

O transporte é realizado através de camiões, usando transportes especiais quando necessário, desde o local de fabrico até ao destino e o posicionamento é conseguido através de gruas (ver figura 2.12).



Figura 2.12: Transporte e montagem de uma casa KITUR. [6]

Os preços aproximados para cada habitação podem ser visualizados na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Tabela de preços da KITUR. [1]

Tipologia	Medidas [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Preço [€]
T0	9×3.5	31.5	43 100
T1	10×4	40	50 300
T2	7.5×3.5 + 9×3.5	57.75	66 500
T3	9.5×4 + 9.5×4	76	84 500
T4	7×4 + 7.5×4 + 7.5×4	88	99 900

## Capítulo 3

# Desenvolvimento do projeto

No início de cada projeto, é necessário fazer uma revisão de todos os elementos passíveis de influenciar o seu desenvolvimento. São exemplo as leis e normas que intervêm diretamente no desenho, produção e transporte do produto. Neste caso, existem leis específicas para a habitação que devem estar consideradas, bem como para o transporte, nomeadamente o terrestre, que tem limitações em relação às dimensões e pesos máximos transportáveis. Estas leis e normas são revistas em seguida.

### 3.1 Normas e limitações ao projeto

#### 3.1.1 Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU) - Dimensionamento geral de edifícios

O RGEU, Decreto-Lei n.º 38 382 de 7 de Agosto de 1951 [2], é o documento que define todas as normas construtivas de edifícios, quer comerciais, quer habitacionais. Apesar de haver esforços na tentativa de o atualizar, seguindo normas semelhantes à dos restantes membros da União Europeia, este é o documento pelo qual são seguidas as regras de construção no presente trabalho. Nas tabelas 3.1 e 3.2 podemos encontrar as dimensões mínimas por divisão e gerais, dependendo do número de quartos.

Para além disso, de acordo com ponto 2 do Artigo 65º do mesmo documento, "A altura mínima, piso a piso, em edificações destinadas à habitação é de 2,70m(27M), não podendo ser o pé-direito livre mínimo inferior a 2,40m (24M)" e segundo o ponto 4, "Nos tectos com vigas, inclinados, abobadados ou, em geral, contendo superfícies salientes, a altura piso a piso e ou o pé-direito mínimo definidos nos n.ºs 1 e 3 devem ser mantidos, pelo menos, em 80% da superfície do tecto, admitindo-se na superfície restante que o pé-direito livre possa descer até ao mínimo de 2,20m ou de 2,70m, respectivamente, nos casos de habitação e de comércio".

Por fim, em termos de dimensionamento geral, de acordo com o ponto 1 do Artigo 70.º (Redacção do Decreto-Lei nº650/75, de 18 de Novembro), "A largura dos corredores das habitações não deve ser inferior a 1,10m".

Tabela 3.1: Dimensões das divisões em  $m^2$  Artigo 66.<sup>o</sup> (Redacção do Decreto-Lei n<sup>o</sup>650/75, de 18 de Novembro). [2]

Divisões	Número de compartimentos e tipo de fogo							
	2 $T_0$	3 $T_1$	4 $T_2$	5 $T_3$	6 $T_4$	7 $T_5$	8 $T_6$	Mais de 8 $T_x > 6$
Áreas em $m^2$								
Quarto casal	-	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Quarto duplo	-	-	9	9	9	9	9	Restantes
Quarto duplo	-	-	-	9	9	9	9	quartos de
Quarto duplo	-	-	-	-	9	9	9	9m
Quarto simples	-	-	-	-	6,5	6,5	6,5	6,5
Quarto simples	-	-	-	-	-	-	6,5	6,5
Sala	10	10	12	12	12	16	16	6,5
Cozinha	6	6	6	6	6	6	6	16
Supl. de área obrigatório	6	4	6	8	8	8	10	(x+4)

Tabela 3.2: Dimensões totais mínimas em  $m^2$  - Artigo 77.<sup>o</sup> (Redacção do Decreto-Lei n<sup>o</sup>650/75, de 18 de Novembro). [2]

Área Bruta	Tipos de fogo							
	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_6 > 6$
	35	52	72	91	105	122	134	1,6xAh

### 3.1.2 Transportes

Tendo em conta os pesos e dimensões associados às habitações, o transporte dos componentes e módulos tem de ser realizado via marítima, ferroviária, rodoviária ou uma combinação das três. Assim, de modo a reduzir custos, faz sentido usar contentores que estejam normalizados para os três tipos de transporte. Estes contentores de carga, normalizados pela norma ISO 668:2013[3] (ver figura 3.1), podem ter as medidas da tabela 3.3. De salientar que existem mais medidas mais específicas, como por exemplo o de 53' usado principalmente nos E.U.A. e Canadá. A comparação de tamanhos pode ser visualizada na figura 3.2.

### Regulamento que Fixa os Pesos e as Dimensões Máximos Autorizados para os Veículos em Circulação

Tendo analisado as dimensões dos contentores, é necessário verificar o peso máximo que estes podem transportar. Uma vez que o transporte terá de ser feito, nalgum ponto do percurso, usando estradas e que estas têm limite máximo de peso, é descrito em baixo em que condições o transporte pode ser realizado.



Figura 3.1: Contentores normalizados e meios de transporte de cargas.

Tabela 3.3: Dimensões Normalizadas de Contentores. [3]

		20' container		40' container		40' high-cube container		45' high-cube container	
		imperial	metric	imperial	metric	imperial	metric	imperial	metric
dimensões externas	comp.	19' 10"	6.058 m	40' 0"	12.192 m	40' 0"	12.192 m	45' 0"	13.716 m
	largura	8' 0"	2.438 m	8' 0"	2.438 m	8' 0"	2.438 m	8' 0"	2.438 m
	altura	8' 6"	2.591 m	8' 6"	2.591 m	9' 6"	2.896 m	9' 6"	2.896 m
dimensões internas	comp.	19' 3"	5.867 m	39' 5 <sup>45</sup> / <sub>648</sub> "	12.032 m	39' 4"	12.000 m	44' 4"	13.556 m
	largura	7' 8 <sup>19</sup> / <sub>32</sub> "	2.352 m	7' 8 <sup>19</sup> / <sub>32</sub> "	2.352 m	7' 7"	2.311 m	7' 8 <sup>19</sup> / <sub>32</sub> "	2.352 m
	altura	7' 9 <sup>57</sup> / <sub>64</sub> "	2.385 m	7' 9 <sup>57</sup> / <sub>64</sub> "	2.385 m	8' 9"	2.650 m	8' 9 <sup>15</sup> / <sub>16</sub> "	2.698 m
abertura da porta	largura	7' 8 <sup>1</sup> / <sub>8</sub> "	2.343 m	7' 8 <sup>1</sup> / <sub>8</sub> "	2.343 m	7' 6"	2.280 m	7' 8 <sup>1</sup> / <sub>8</sub> "	2.343 m
	altura	7' 5 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> "	2.280 m	7' 5 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> "	2.280 m	8' 5"	2.560 m	8' 5 <sup>49</sup> / <sub>64</sub> "	2.585 m
volume interno		1,169 <i>ft</i> <sup>3</sup>	33.1 <i>m</i> <sup>3</sup>	2,385 <i>ft</i> <sup>3</sup>	67.5 <i>m</i> <sup>3</sup>	2,660 <i>ft</i> <sup>3</sup>	75.3 <i>m</i> <sup>3</sup>	3,040 <i>ft</i> <sup>3</sup>	86.1 <i>m</i> <sup>3</sup>
peso máximo		66,139 lb	30,400 kg	66,139 lb	30,400 kg	68,008 lb	30,848 kg	66,139 lb	30,400 kg
peso vazio		4,850 lb	2,200 kg	8,380 lb	3,800 kg	8,598 lb	3,900 kg	10,580 lb	4,800 kg
peso transportável		61,289 lb	28,200 kg	57,759 lb	26,200 kg	58,598 lb	26,580 kg	55,559 lb	25,600 kg

## SECÇÃO IV [18]

## Pesos brutos máximos dos veículos para efeitos de circulação

## Artigo 8.º

## Peso bruto máximo dos veículos

1. Os pesos brutos máximos dos veículos fixados, quando em circulação, são os referidos nos números seguintes.
2. Estabelece -se como peso bruto máximo para veículos de:
  - (a) Dois eixos - 19 t;
  - (b) Três eixos - 26 t;
  - (c) Quatro ou mais eixos - 32 t.
3. Estabelece -se como peso bruto máximo para conjunto veículo tractor -semi -reboque de:
  - (a) Três eixos - 29 t;
  - (b) Quatro eixos - 38 t;
  - (c) Cinco ou mais eixos - 40 t;

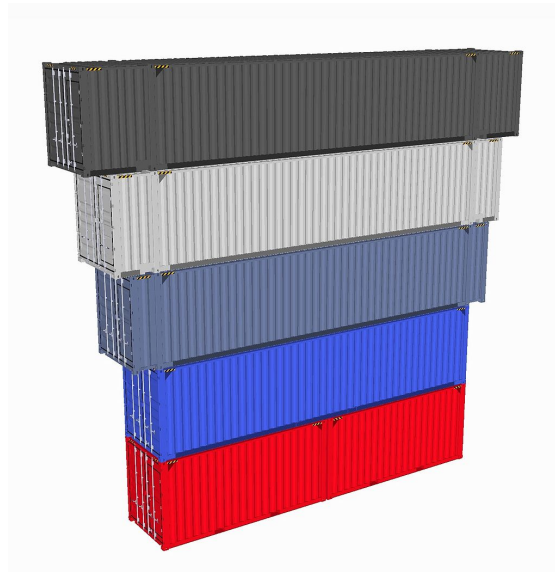


Figura 3.2: Comparação entre contentores - 2x20', 40', 45', 48' e 53'.

- (d) Cinco ou mais eixos transportando dois contentores ISO de 20' ou um contentor ISO de 40' - 44 t.
4. (referente ao transporte de passageiros)
  5. Estabelece -se como peso bruto máximo para conjunto veículo a motor -reboque de:
    - (a) Três eixos - 29 t;
    - (b) Quatro eixos - 37 t;
    - (c) Cinco ou mais eixos - 40 t;
    - (d) Cinco ou mais eixos transportando dois contentores ISO de 20' ou um contentor ISO de 40' - 44 t.
  6. Estabelece -se como peso bruto máximo para reboques de:
    - (a) Um eixo - 10 t;
    - (b) Dois eixos - 18 t;
    - (c) Três ou mais eixos - 24 t.

Estes dados servem para limitar as dimensões e o peso de cada módulo, garantindo que o transporte, para além de viável e dentro da Lei, seja o mais barato possível, por se usarem elementos normalizados e por se diminuir ou até excluir qualquer tipo de transporte especial ou extraordinário, que acarrete custos adicionais, se isso se vier a verificar vantajoso para o projeto.

Assim, analisando a lista de contentores normalizados para a Lei portuguesa, considerando o caso de um contentor de 40' *high cube* (ver tabela 3.3) - é descartado o de 45', uma vez que não está previsto no transporte considerado normal e necessita de licenças

extra - o peso máximo permitido pelo contentor é de 26 580 kg. No entanto, como é possível verificar na alínea c) do ponto 6, o peso máximo bruto do reboque é de 24 000 kg. Isto é, o peso do reboque, somado ao peso do contentor e respetiva carga, não pode ultrapassar os 24 000 kg (além disso, é preciso ter em conta que o peso bruto do conjunto trator - semi reboque não ultrapassa as 44 t).

No exemplo do reboque *Schmitz Cargo Bull 40' Light Frame*, que pesa 4 300 kg, pode-se condicionar até 19 700kg (conjunto carga e contentor). [19]

### 3.1.3 Limitações de peso máximo por estrutura

Uma vez que a maioria dos módulos, painéis ou estruturas são demasiado pesados para serem posicionados pelas pessoas encarregues da montagem, é habitual que sejam utilizadas gruas para efetuar este procedimento. Por norma, uma vez que o tempo de montagem não é muito prolongado e que não é necessária a utilização de gruas fixas, que conseguem suportar cargas superiores e a uma altura e distância mais elevadas, deverão ser utilizadas gruas móveis. Uma vez que existem gruas móveis capazes de suportar várias toneladas, o peso não é o fator limitador do projeto mas, uma vez que quanto maior for o peso a ser movido, maior terá de ser a grua e maior o custo, este é um dos fatores a ter em atenção. À partida, quanto menor a capacidade da grua, quanto maior for a sua adaptabilidade ao terreno e a sua rapidez de trabalho, mais barato deverá ficar o processo de montagem e deverá ser esse o caminho a ser tomado neste projeto.

## 3.2 Especificações do projeto

Uma vez vistas as limitações existentes, é necessário fazer um levantamento dos requisitos. Para tal são usadas, como já referido, ferramentas normalmente utilizadas na desenvolvimento do produto associado à engenharia mecânica.

### 3.2.1 QFD - *Quality Function Deployment*

O QFD é uma ferramenta de desenvolvimento tecnológico, criada em 1972 nos estaleiros de Kobe. Posteriormente, foi trazido para a cultura ocidental, mais especificamente para os EUA, por Ford e Xerox em 1986 e tem vindo a ser crescente o seu uso, quer no Japão, quer nos EUA e Europa, usando versões criadas para se adaptarem à cultura e forma de pensar destes países. [20]

Esta ferramenta permite relacionar as várias áreas do desenvolvimento do produto - desenvolvimento, produção, venda - de modo a que a sua relação traga benefícios quer para a empresa, reduzindo o tempo e o custo de design (até 40 e 60% respetivamente), quer para o cliente, pelas características inerentes do produto face à concorrência, também tida em conta nesta análise. Por norma, são usadas quatro "casas da qualidade", nas quais são relacionados os vários aspetos de design e requisitos do cliente. [20][7]

O QFD permite também que o investimento no desenvolvimento do produto, a utilização de recursos humanos e as alterações ao projeto se façam numa fase inicial, implicando que, no início da produção, já tenham sido analisados todos os componentes e funções do produto de uma forma metódica. (ver figura 3.3).

Na primeira das quatro casas, é analisada a "Voz do Cliente", também designada Matriz da Qualidade, onde são comparados os requisitos do cliente com os requisitos do

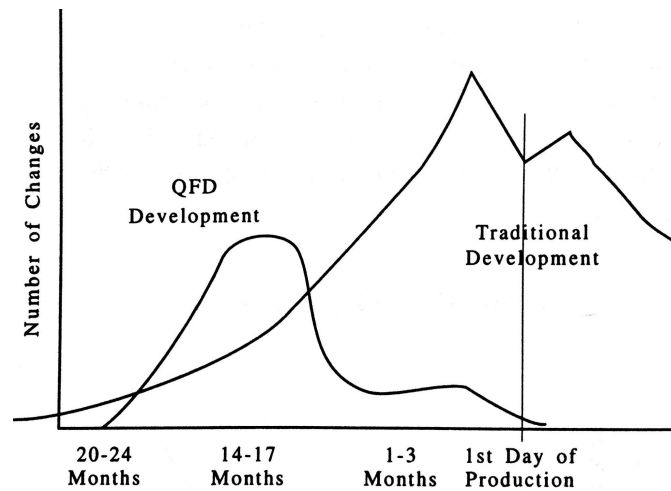


Figura 3.3: Número de alterações ao produto [7]

design. Na segunda, a partir dos resultados da primeira, é gerada a "Voz do Engenheiro", ou Matriz do Produto, mais focada nas características do produto de uma forma geral e ainda sem especificidade de soluções. As casas subsequentes voltam a analisar a "Voz do Cliente", mas neste contexto acadêmico é apenas utilizada a primeira, que permite desde logo uma organização inicial, importante para o projeto. [20]

O esquema da Casa da Qualidade (figura 3.4), mostra o posicionamento de cada *input* e dos *outputs*, necessários para a sua utilização.

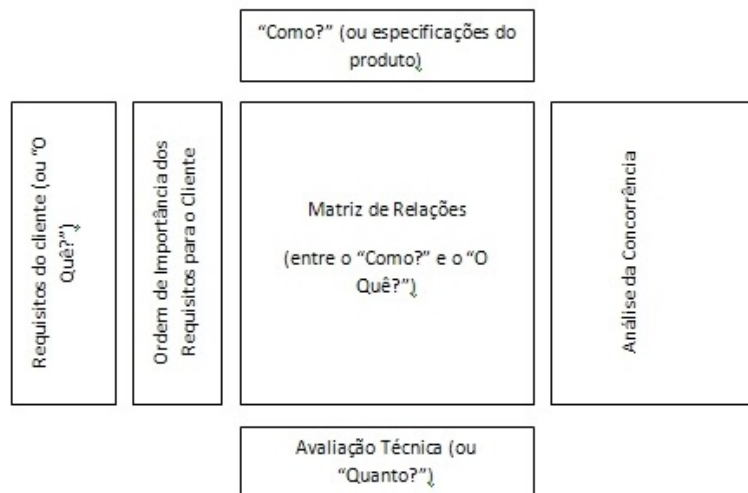


Figura 3.4: Esquema da Casa da Qualidade.

Iniciando pelo lado esquerdo do esquema, uma vez que é por aí que deve ser começada a análise, é realizado um estudo dos requisitos do cliente. Tendo em conta os objetivos do projeto, descritos na secção 1.2, o primeiro passo para obter os requisitos do cliente é definir quem são os clientes-alvo. Esta tarefa passa por responder às seguintes questões: [7]



1. Quem vai utilizar o produto?
2. Quem pode utilizar o produto?
3. Quem pode utilizar o produto no futuro?

Como tal, são definidos como clientes-alvo famílias ou organizações que procuram soluções flexíveis para habitação permanente e com um tempo de construção reduzido.

Desenvolvimentos futuros podem estender a utilização deste conceito, com as devidas alterações, para desenvolvimento de espaços mais amplos e com outro tipo de propósito, tais como edifícios de serviços, edifícios energeticamente neutros, construções temporárias, entre outras.

Em seguida, continuando com o desenvolvimento do produto, é necessário caracterizar as necessidades do cliente - o que é que o cliente precisa que o produto faça, o que o cliente irá valorizar no produto e o que o irá diferenciar da concorrência.

No fundo, é preciso que seja feita uma compilação dos requisitos que os clientes desejam que sejam cumpridos. Devem começar por ser agrupados em categorias gerais e aprofundados em seguida, sendo estes dados inseridos à esquerda da “Casa da Qualidade”. Para este projeto, foram utilizados critérios encontrados na bibliografia, devidamente enquadrados com o contexto, e na tese de dissertação que serve de base. [21][8]

Existem várias ferramentas e maneiras de perceber estes requisitos tais como a observação direta, questionários ou sessões com amostras de clientes, que permitam inferir as melhores opções para o projeto. A categorização destes requisitos, é conseguida através do Modelo de Kano apresentado à frente.

A partir dos requisitos do cliente, são definidos, no topo, as métricas do produto. As ideias qualitativas dos clientes para o produto são transformadas em métricas, isto é, valores, medidas, unidades, entre outras.

Em seguida, podemos ver que ligação existe entre os requisitos do cliente e as métricas do produto, na matriz de relações (ao centro, ainda na figura 3.4), de modo a ver de que maneira são influenciados uns pelos outros, permitindo que as relações mais fortes, isto é, as que intervenham mais significativamente para o projeto tenham mais peso que as restantes.

À direita, insere-se mais um *input*, onde é classificada a concorrência - melhorias em pontos em que a concorrência é forte podem não ter tanto impacto na satisfação do cliente como nos pontos fracos. Assim, também é tido em conta o impacto da diferenciação do produto face ao mercado. [7]

### 3.2.2 Modelo de Kano

O Modelo de Kano foi desenvolvido por Noriaky Kano, permitindo uma avaliação e priorização do investimento, quer de tempo, quer monetário, no cumprimento dos requisitos do cliente, e discretiza-os em três categorias:

- Básicos/obrigatórios - Todos aqueles que são intrínsecos ao produto e que o cliente encara com neutralidade a sua presença no produto. Pelo contrário, a sua ausência provoca grande descontentamento;
- Uni-dimensionais - Aqueles em que a satisfação/ descontentamento do cliente varia proporcionalmente com o desempenho ou existência do componente que cumpre esse requisito;

- Atrativos - Quando um requisito que o cliente não se aperceberia que existia, caso não estivesse lá, é cumprido.

Esta divisão e a relação entre a satisfação do cliente e o cumprimento ou não dos diferentes tipos de requisitos é melhor evidenciada no gráfico da figura 3.5. [7]

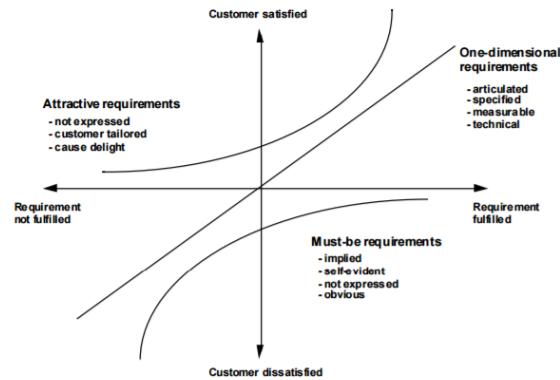


Figura 3.5: Modelo de Kano.

Assim, um grande investimento num requisito obrigatório já existente pode não ser o mais indicado, uma vez que o cliente não irá dar valor nem ficará mais satisfeito por isso. Pelo contrário, um menor investimento num novo requisito atrativo traz, aos olhos do cliente, valor acrescentado ao produto e o grau de satisfação com o mesmo irá aumentar consideravelmente.

Outros elementos, como o custo, são uni-dimensionais, uma vez que a satisfação do cliente aumenta proporcionalmente com a diminuição do mesmo.

Torna-se, portanto, importante fazer a análise dos requisitos do cliente para o produto em questão que, como já dito, para além de manter as características de uma construção tradicional, tem de introduzir novas mais-valias para o consumidor. Com base nestes aspetos, foi realizada a análise de Kano, visualizada na figura 3.6.

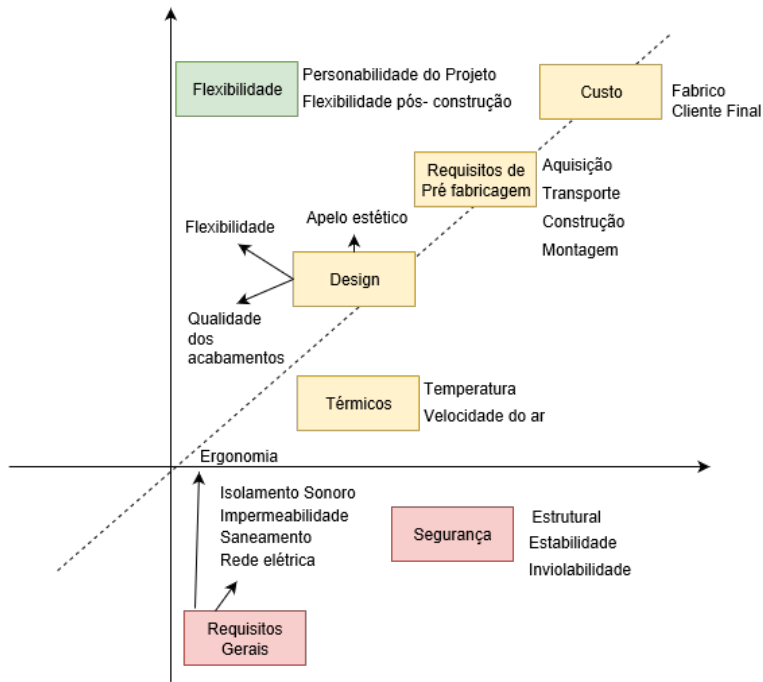


Figura 3.6: Modelo de Kano para este conceito.

### 3.2.3 Aplicação prática do QFD

A análise feita para este projeto partiu da interpretação feita na tese de dissertação já referida, com algumas alterações pertinentes onde os objetivos entre cada conceito divergiam - a análise realizada nesse documento propunha um conceito que tinha o conforto térmico e a eficiência energética como um dos principais fatores, algo que, apesar de importante, não tem um peso tão grande neste projeto. O QFD deste projeto pode ser visualizado na figura 3.7.

Requisitos	Dimensãoman		Estrutura		Têrmicos		Requisitos		Modularidade					Análise da concorrência		Peso absoluto	Peso relativo											
	Nº de quartos [n]	Área útil [m²]	Pé Direito [m]	Altura ao solo [m]	Estrutura - Tipo e material [GPa, m, mm Kg...]	Fundações - Tipo e Material [GPa, m, mm, etc]	Espessura das paredes [m]	Sistemas AVAC [sn, kW, m³/h...]	Percentagem e tipo de envidraçados [%, mm]	Número de Acessos [n]	Isolamento sonoro [dB]	Acessos à rede elétrica (Tomadas) [n]	Sistema de saneamento e água potável [l/min]	Tamanho dos módulos [m]	Fiação dos módulos (oscilações, folgas etc.) [mm,°]			Número de elementos [n]	Rapidez de montagem [h] (Cliente Final)	Rapidez de produção [h] (Fabricante)	KITUP®	FatPak	Produto	Índice Estratégico	Índice de melhoria	Argumento de Vendas		
Segurança	C	5	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	7	6	2,0	1,0	1,5	14,0	5,8		
Estabilidade	C	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	7	6	2,0	1,0	1,0	9,3	3,3		
Inviolabilidade	C	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	7	7	1,0	1,0	1,0	8,0	3,3		
Luz natural	C	5	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	7	6	1,0	1,0	1,0	5,2	2,2		
Luz elétrica	C	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,0	1,0	1,0	5,0	2,1		
Ligações elétricas (Tomadas)	C	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,0	1,0	1,0	5,0	2,1		
Impermeabilidade	C	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	8	8	8	1,0	1,0	1,1	7,7	3,2		
Ergonomia (interior e acessos)	B	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	7	6	1,0	0,9	1,5	8,4	3,5		
Escolha de Topologia	B	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	8	8	9	1,0	1,1	1,2	9,5	4,0		
Saneamento	C	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	7	7	7	1,0	1,0	1,0	5,0	2,1		
Isolamento sonoro	C	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	7	7	7	1,0	1,0	1,0	5,0	2,1		
Temperatura regulável	B	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	7	7	1,5	1,1	1,2	7,9	3,3		
Conforto térmico	C	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	7	7	1,5	1,1	1,2	7,9	3,3		
Facilidade de Transporte	B	8	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	9	5	9	2,0	1,2	1,5	14,6	6,1		
Facilidade de Produção	B	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	6	8	2,0	1,0	1,5	12,3	5,1		
Facilidade de Montagem	B	8	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	9	6	8	2,0	1,0	1,5	12,3	5,1		
Personalidade do Projeto	A	9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	7	8	1,5	1,4	1,5	18,6	7,8		
Flexibilidade pós-construção	A	9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	7	1	7	2,0	1,5	1,5	20,5	8,6		
Qualidade dos acabamentos	B	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	8	7	1,5	1,0	1,5	10,8	4,5		
Apelo estético	B	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	6	7	1,5	1,2	1,2	8,4	3,5		
Manutenção fácil	B	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	7	1,5	1,4	1,5	12,6	5,3		
Manutenção mínima	B	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	7	1,0	1,4	1,2	11,8	4,9		
Baixo custo pl/ construtor	B	8	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1,0	1,0	1,0	8,0	3,3		
Baixo custo pl/ cliente final	B	8	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	9	5	7	1,0	0,9	1,5	11,4	4,7		
Peso Absoluto		740	308	270	357	283	245	583	422	277	238	302	293	22	103	185	472	276									239,1	100,0
Peso Relativo		12,1	5,0	4,4	5,8	4,6	4,0	9,5	6,9	4,5	3,9	4,9	4,8	0,4	1,7	3,0	7,7	4,5									8,3	4,0
KITUP®		7	7	6	6	7	5	5	4	5	4	6	5	6	5	6	8	8									5	5
FlatPak		7	7	8	9	7	6	7	6	5	6	5	6	5	5	5	4	4									4	4
Produto		7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	5	7									7	7
Dificuldade de Atuação		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1									15	15
Importância das Características		84,4	35,2	30,8	42,6	32,3	33,9	57,0	41,3	21,1	23,3	27,9	23,9	2,2	9,5	22,6	92,3	42,8									79,2	32,2
Importância das Características (R)		11,5	4,8	4,2	5,8	4,4	4,6	7,8	5,6	2,9	3,2	3,8	3,3	0,3	1,3	3,1	12,6	5,8									10,8	4,4

Figura 3.7: QFD elaborado para este projeto.

Aqui, foram correlacionados os requerimentos do cliente com as métricas necessárias para a boa desempenho do produto, bem como feita a comparação com os dois concorrentes descritos anteriormente (Flatpak e KITUR). Além disso, foi feita uma estimativa da dificuldade de execução e foram retirados valores que permitiram obter algumas conclusões acerca da priorização, quer das métricas, quer dos requisitos.

De modo a facilitar a visualização destes dados, foram criados dois gráficos, que podem ser observados nas figuras 3.8 e 3.9.

No gráfico da priorização dos requisitos, figura 3.8, destacam-se as características da flexibilidade nos primeiros lugares e a segurança, característica obrigatória que não pode ser descuidada. No fim da lista, estão elementos que têm de existir, têm de funcionar bem mas que não necessitam de demasiada atenção nesta fase.



Figura 3.8: Gráficos com priorização de requisitos - QFD.

No gráfico da priorização de métricas, figura 3.9, destacam-se, nos três primeiros lugares, elementos que têm um impacto abrangente em termos de engenharia e na percepção da qualidade (e de valor acrescentado) por parte do utilizador. Por outro lado, as métricas com menor pontuação são as que estão estandardizadas e que, à partida, não requerem grande atenção nesta fase.

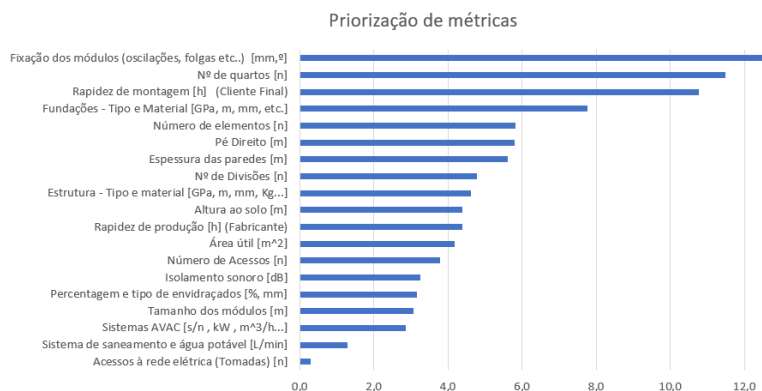


Figura 3.9: Gráficos com priorização de métricas - QFD.

Conjugando esta informação com a do modelo de Kano, podemos concluir que foram destacados elementos/características obrigatórios e diferenciadores nas posições cimeiras.

O modelo de Kano permite-nos fazer uma distinção entre eles. Tomemos as características “segurança” e “flexibilidade” como exemplo. Quando for atingido um nível de segurança aceitável, qualquer alteração no sentido de tornar o produto ainda mais seguro não trará, aos olhos do utilizador, qualquer valor acrescentado.

Por outro lado, uma aposta em tornar o sistema mais flexível (mesmo após ter sido encontrada uma boa solução) pode trazer um maior valor acrescentado.

## Capítulo 4

# Desenvolvimento do conceito

Neste capítulo, é dado início ao conceito propriamente dito, sendo o desenvolvimento do mesmo apoiado na informação obtida até então. É apresentada uma primeira proposta e, após percepção de que esta não constituía uma base suficientemente sólida para prosseguir, é realizada uma análise crítica e apresentada uma segunda proposta, que é desenvolvida e iterada até ao conceito final.

O primeiro conceito apresenta painéis com metade do pé-direito mínimo da casa, com a estrutura de suporte a passar através dos painéis. O segundo apresenta uma solução com painéis mais pequenos, com  $1/4$  do pé-direito mínimo da casa e com a estrutura de suporte situada na interface dos mesmos, estrutura essa que suporta o teto, constituído por elementos muito semelhantes ao das paredes. Todos os passos deste desenvolvimento são descritos em seguida.

### 4.1 Proposta 1

No início do desenvolvimento do conceito, definiu-se que a planta da casa seria constituída por elementos quadrados e retangulares, comumente usados na construção. Definiu-se ainda a existência de dois elementos ou módulos - um retângulo e um quadrado com metade da área desse mesmo retângulo. A conjugação desses dois módulos permite flexibilidade no formato final da planta da casa e, por outro lado, uniformidade no processo de construção e montagem, como se pode ver na figura 4.1.

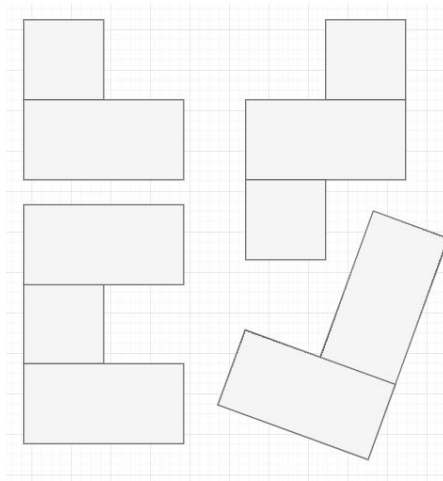


Figura 4.1: Exemplos formatos possíveis com elementos quadrangulares e retangulares.

Foi também definido que, do ponto de vista da segurança, faz sentido ter fundações de betão, de modo a oferecer estabilidade e adaptabilidade ao terreno. Existem desvantagens, uma vez que tem de ser contratada mão-de-obra local para execução das mesmas, por comparação com um chassis simplesmente pousado no solo, mas ganha-se com o facto de não ter de existir o transporte de um componente que seria uma percentagem muito significativa do peso total. Também a percepção de segurança por parte do utilizador pode ser influenciada, uma vez que, neste caso, são usadas soluções tradicionais que podem ser assumidas como seguras por quem não tem conhecimento acerca do produto.

Uma vez que tem benefícios térmicos e que os custos ficam mais baixos do que construir uma cave, para além do facto de não se ter um chassis, foi escolhida uma fundação que segue o perímetro dos módulos.

As paredes são constituídas por painéis sanduíche, cujo conceito foi iniciado na tese na qual esta se apoia, que supôs painéis de grandes dimensões -  $2400 \times 2000$  m (figura 4.2). Apesar do conforto e da performance térmica serem requisitos retirados do QFD, é importante referir que a importância dada neste produto difere do estudo feito nessa tese, uma vez que um dos objetivos era obter a distinção de *Casa Passiva*, ou seja, obter um nível muito elevado de otimização energética que, apesar de importante, não é objetivo neste documento. Assim, foi assumido um meio-termo face ao proposto nesse documento e definiram-se as medidas da tabela 4.1.



Figura 4.2: Painel que serve de base a este projeto. [8]



Tabela 4.1: Comparação dos painéis

Componentes do painel	Espessura dos componentes do painel existente [mm]	Espessura dos componentes proposta para este documento [mm]
Pinho	15	15
Superfície de metal	2	2
PUR	251	200
Superfície de metal	2	2

Em seguida, de modo a definir o formato e dimensões dos painéis das paredes, foram usados dois critérios: a área que estes tinham de ocupar e os formatos necessários para formarem todos os elementos normais e básicos de uma habitação - paredes, janelas e portas, de variados formatos.

Em relação à área das paredes, uma vez que estamos a falar de modelos de construção retangulares, faz sentido usar quadrados e/ou retângulos na construção dos mesmos. As dimensões dos contentores de transporte eliminam logo a hipótese de um painel único para cada parede, o que também não faria sentido do ponto de vista de montagem devido às dimensões excessivas do painel. Na figura 4.3, é possível ver alguns formatos possíveis que foram considerados para os painéis, numa fase inicial.

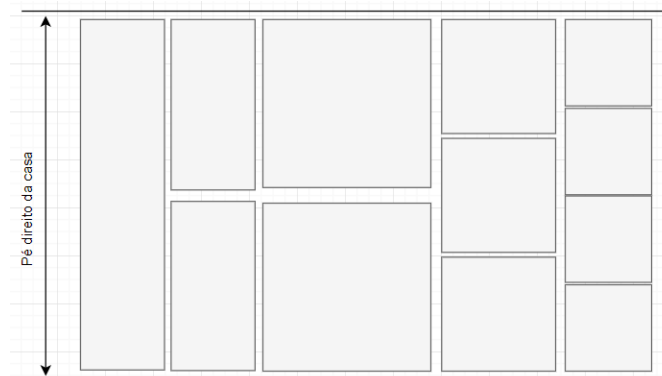


Figura 4.3: Análise morfológica dos formatos possíveis para a formação das paredes.

O segundo critério, onde é analisada a morfologia de portas e janelas, levou a que se supusesse a existência de painéis diferentes entre si, de modo a, juntos, poderem criar as aberturas necessárias para o encaixe destes componentes, visíveis na figura 4.4.

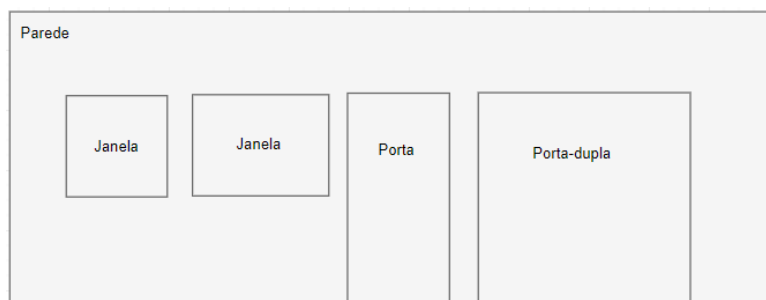


Figura 4.4: Aberturas na parede necessárias para encaixe de elementos básicos da casa.

#### 4.1.1 Desenvolvimento da parede básica

Começando por estudar o elemento básico da montagem da casa, a parede simples e sem aberturas, é necessário analisar a interação entre cada painel e de que forma estes se vão conjugar, independentemente do tamanho que possam vir a ter. Começou-se por assumir painéis quadrados e, prevendo a existência de cargas para além do peso próprio (ventos fortes, por exemplo), a necessidade de existir uma estrutura que mantenha a integridade da construção, uma vez que cada bloco é maioritariamente constituído por espuma de alta densidade, para além dos requisitos retirados do QFD, como a facilidade de montagem e de transporte.

##### Painel básico

Assim, foi desenvolvido um primeiro painel básico, com forma semelhante à do painel original [8] que cumpre estes requisitos de forma (ver figura 4.5). As reentrâncias e saliências (a vermelho) permitem o posicionamento e encaixe entre blocos adjacentes, horizontal ou verticalmente, diminuindo a possibilidade de infiltrações, e os furos passantes (um em cada extremidade) alojam os elementos estruturais verticais (nas zonas a azul), como se pode verificar na figura. Nesta versão, os encaixes macho de cada painel (visto de frente) encontram-se à esquerda e em baixo e os fêmea à direita e em cima. Os elementos estruturais possuem um encaixe fêmea no topo e um macho na base.

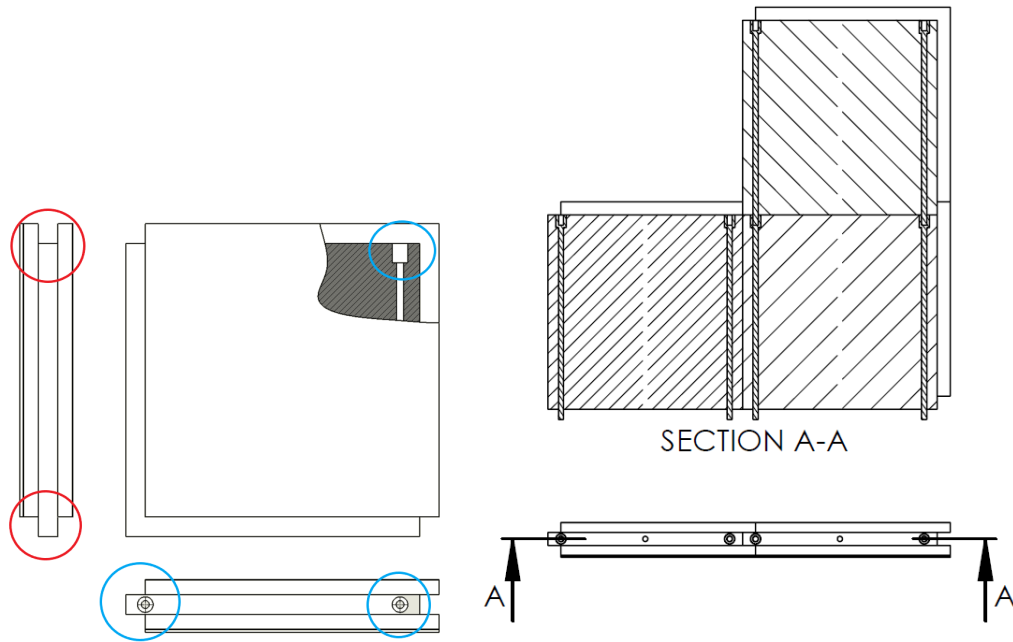


Figura 4.5: Desenho da primeira versão de um painel básico.

### Tamanho e tipo de painéis

Em paralelo com o estudo e desenvolvimento do painel básico, foi também analisado o tamanho e o número de variantes do painel, para cumprir com todas as formas e funções necessárias.

O primeiro conceito foi formado a partir da análise morfológica presente na figura 4.3, utilizando a terceira opção: a conjugação de elementos modulares quadrados e com formas semelhantes, na medida do possível, em que o lado do quadrado corresponde a metade da altura do pé-direito da casa. Uma vez que é impossível obter aberturas (portas e janelas) utilizando exclusivamente este tipo de painel, foram desenhadas variantes do mesmo. Assim, obtiveram-se três tipos de painéis (figura 4.6): os painéis básicos (painéis de formato quadrado com metade do pé-direito da casa), painéis em L (que formam os cantos das portas e janelas) e os meios-panéis (que permitem estender as janelas lateralmente e dar altura às portas) - figura 4.7.

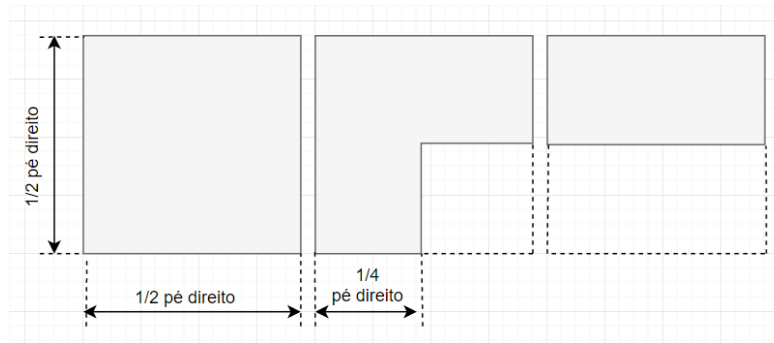


Figura 4.6: Painéis concebidos para o primeiro conceito.

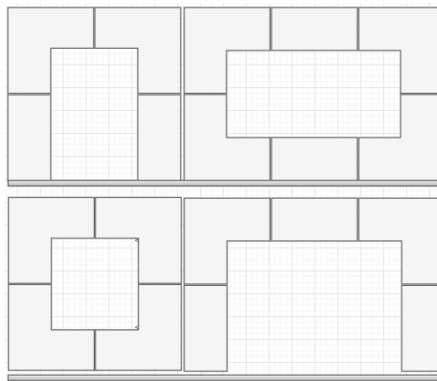


Figura 4.7: Aberturas para encaixe de elementos no primeiro conceito - portas e janelas.

Uma vez que o topo e base dos blocos são diferentes entre si (devido aos encaixes macho e fêmea) e que o interior do bloco é diferente do exterior (devido aos acabamentos diferentes das paredes interior e exterior), este conceito obriga a que existam quatro versões dos painéis em L e duas dos meios-painéis (ver figura 4.8). Ou seja, estes fatores implicam que cada canto e que o meio-bloco horizontal e vertical sejam diferentes entre si, uma vez que os encaixes assim o determinam - não é possível, por rotação em torno de qualquer eixo, que um destes blocos execute a função de outro.

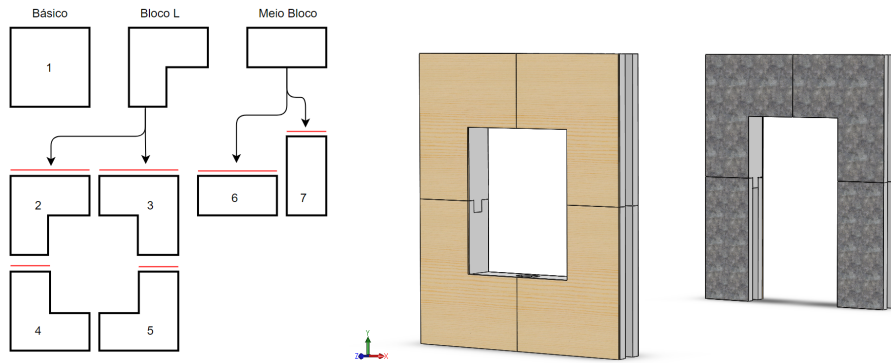


Figura 4.8: Número de blocos modelados para versão CAD da primeira proposta - as linhas a vermelho representam o topo de cada bloco.

#### 4.1.2 Ligação a 90º parede - parede

Paralelamente com o desenvolvimento dos painéis e da estrutura, foi desenvolvida a ligação dos cantos dos módulos. Estes elementos, para além de ligarem as duas paredes, têm de evitar a existência uma ponte térmica ao longo de toda a aresta vertical da casa. Assim, o material escolhido foi o mesmo que o do interior dos painéis, PUR de alta densidade. De modo a que este elemento tivesse resistência mecânica, foi previsto que seria atravessado no centro, verticalmente, por um elemento estrutural, semelhante ao dos painéis.

Uma vez que os encaixes esquerdo e direito dos painéis são diferentes, foi criado um canto assimétrico com dois encaixes diferentes, uma vez que de um lado é encaixado o macho de uma lateral de um painel, e de outro, a fêmea da lateral de outro painel, como se pode ver na figura 4.18, na zona a vermelho. A seta azul, na mesma figura, indica o espaço para o elemento estrutural metálico, não representado.

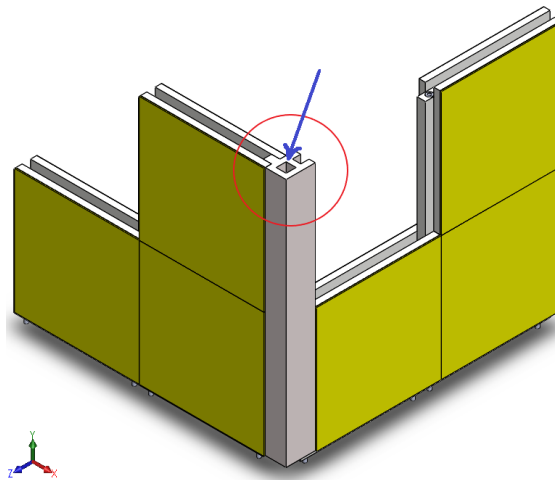


Figura 4.9: Primeiro conceito para a ligação do canto.

### 4.1.3 Desenvolvimento do teto

Seguindo a linha de pensamento usada, no desenvolvimento do teto, considerou-se o uso de painéis semelhantes ou até mesmo iguais aos das paredes. Este fator, para além de manter os custos baixos, mantendo a diversidade de componentes mínima, permite aproximar este produto ao estudo térmico efetuado já efetuado [8], que usava os mesmo painéis em todas as faces - paredes, chão e teto.

Assim, foi necessário desenhar uma estrutura que:

1. segurasse os painéis na posição correta ;
2. se apoiasse nos apoios existentes na estrutura inferior - a existência de vãos longitudinais variáveis, devido à existência de aberturas (portas e janelas) não poderia ser problema.

Inicialmente, considerou-se que o teto seria paralelo ao chão, mas essa ideia rapidamente foi posta de parte - uma vez que não existe nenhum elemento comum aos diferentes painéis que assegurasse a vedação das juntas dos painéis do teto, estando estas expostas aos elementos, e que o vão seguramente iria ter uma flecha onde a água iria acumular, o risco de existirem infiltrações ao longo do tempo nessas juntas levou a que se optasse por um teto inclinado. Assim, a água é escoada e permite uma maior durabilidade do conjunto e, por conseguinte, menor manutenção necessária.

De modo a simplificar o *design*, optou-se por um telhado de “uma água” (figura 4.10), eliminando assim a criação de mais ligações angulares desnecessárias. Do ponto de vista do encaixe dos módulos, também existe vantagem pois a conjugação de dois módulos pode criar uma estrutura de “duas águas”.

De modo a, mais uma vez, diminuir a variabilidade dos elementos envolvidos, os blocos do teto são colocados da mesma maneira que os blocos da parede, tendo a estrutura vigas de secção igual à dos pilares das paredes. Estas vigas são apoiadas nos pilares da parede transferido o seu peso e a carga dos painéis para a estrutura inferior.

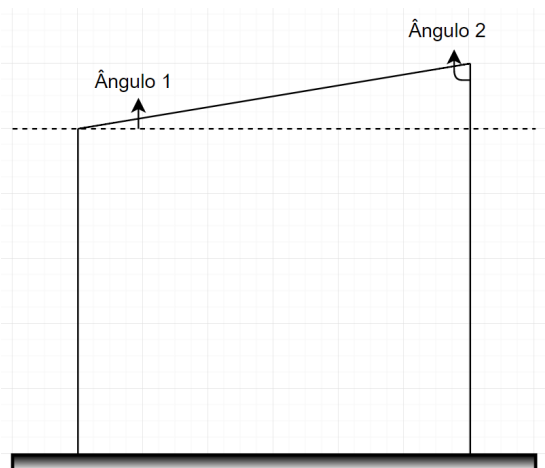


Figura 4.10: Secção transversal de um módulo.

Foram então colocados três problemas:

- como são apoiadas as vigas nas zonas sem pilar - aberturas na parede, janelas e portas;
- como é feita a ligação entre os pilares da parede e vigas do teto;
- como é que é mantida a estanquidade da ligação parede-teto.

O primeiro ponto, pressupõe um elemento horizontal que ligue os pilares existentes em cada parede longitudinal. Assim, as vigas do teto apoiam-se nesse elemento horizontal que, por sua vez faz a transferência da carga para os pilares.

Para primeira proposta, assumiu-se um *design* simples, em que a estrutura assentava diretamente na viga. Painéis especiais para vedar a zona do canto asseguravam a continuidade da superfície da parede segundo o ângulo parede-teto. Devido ao fato de existirem dois ângulos diferentes, uma vez que o teto é só de uma “água”, foram criados dois blocos diferentes, neste conceito inicial.

Foram feitas duas tentativas neste conceito. Numa, tentou-se manter os blocos do teto sem alterações, sendo o acerto feito a partir da alteração de um bloco básico (ou meio bloco básico, ao qual é feito um corte de modo a que os contatos coincidam - figura 4.11.

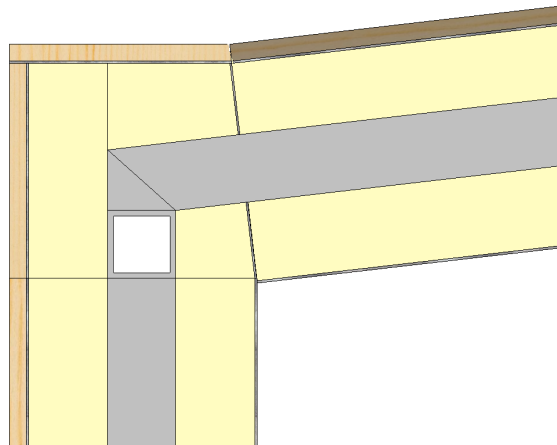


Figura 4.11: Primeiro conceito para a ligação parede-teto.

A segunda tentativa pressupunha alterações em quatro painéis - nos dois extremos do teto e nos dois superiores da parede. O objetivo passava por ter um contato com um ângulo igual ao formado pelo da viga transversal ao módulo e deste modo vedar a toda a zona - figura 4.12.

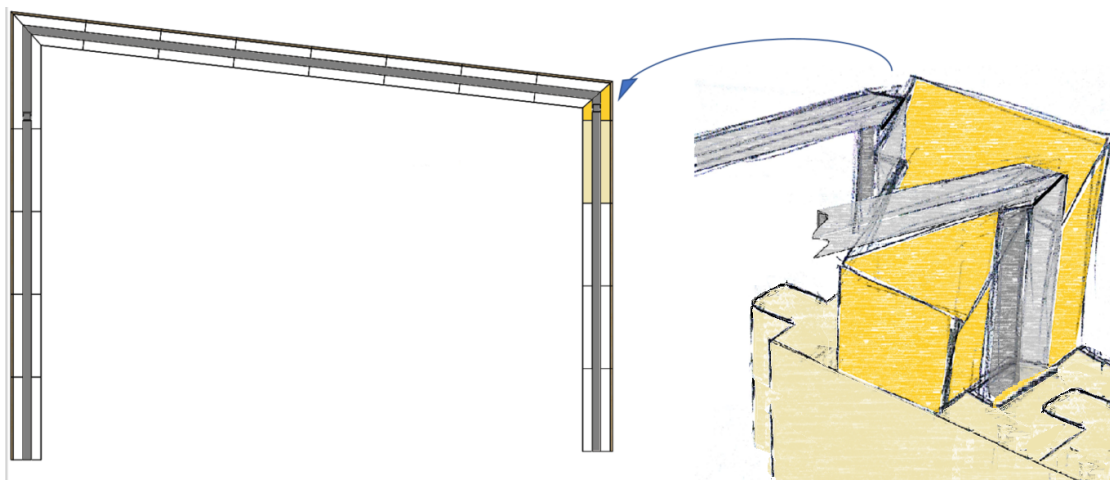


Figura 4.12: Primeiro conceito, revisto, para a ligação parede-teto. Secção transversal e respetivo esboço - cores iguais representam os mesmos elementos.

## 4.2 FMEA

O FMEA é uma metodologia que visa identificar possíveis falhas e estimar os efeitos que que essas falhas possam ter. Assim, é estuda a relação direta entre a possível falha e os efeitos que isso poderá causar. [22]

Esta metodologia pode (deve) ser aplicada numa primeira fase, no desenvolvimento do conceito, onde é verificado que o produto irá cumprir com as funções pretendidas através da identificação de imperfeições no *design*. A flexibilidade existente nesta fase inicial permite que seja muito mais fácil e económico realizar uma correção do que em fases posteriores, quando estão vários elementos definidos.

Apesar de existirem mais componentes, o FMEA aplicado aos painéis foi o suficiente para serem encontrados problemas que desencadearam um novo conceito, como é possível verificar na tabela 4.2.



Tabela 4.2: FMEA aplicado ao painel básico.

Função	Potencial Falha	Potencial efeito da falha	Severidade	Potencial causa da falha	Alteração proposta
Vedação dos elementos exteriores	Diferenças de durabilidade entre encaixes de painéis machos e fêmeas	Encaixes assimétricos dos painéis pode levar a que um lado venha a ter performances diferentes	Média	Assimetria dos painéis.	Tornar os painéis simétricos
	Acumulação de água na interface horizontal de dois blocos	Aparecimento de bolor; Diminuição da performance térmica	Média	Design da junta permite acumulação de água se ocorrer uma fissura no lado exterior da interface horizontal dos painéis.	Reorientação do encaixe macho-fêmea de modo a evitar acumulação por gravidade de água
Ligação com portas/janelas	Folga na ligação painéis - porta/janela; Fraca resistência mecânica da ligação	Queda/ desmontagem do conjunto janela/porta e respetivo "frame"; infiltrações devido a folgas	Muito Grave	Não existem elementos estruturais na interface Porta/ Janela - Parede; zona de ligação constituída por espuma.	Alteração do elemento estrutural para a extremidade do painel
Alojamento da estrutura	Falta de espaço para estrutura	Caso seja necessário tornar o design da estrutura mais resistente, não é possível alterar o diâmetro devido aos constrangimentos de espaço no interior do bloco	Grave	Alojamento da estrutura situa-se no interior do bloco, que pode levar a constrangimentos impossíveis de ultrapassar nas etapas seguintes.	Alteração do elemento estrutural para a extremidade do painel

As alterações propostas, referidas na última coluna da tabela, foram no sentido de modificar a disposição da estrutura no painel, devido aos fatores enunciados.

A falha considerada como “muito grave” é prevenida com esta alteração, pois se a estrutura se localizar entre painéis, então as aberturas para portas e janelas estarão delimitadas pela própria estrutura, o que permite uma fixação mecânica muito superior face à da primeira proposta, que efetivamente não iria conseguir segurar estes elementos, ou, no mínimo, necessitaria de um encaixe muito mais complexo.

A falha considerada como “grave” também é prevenida uma vez que, caso os elementos estruturais estivessem no centro do bloco, toda a sua área teria de estar contida na sua espessura, ao invés de que, se estiver nas extremidades, apenas metade da área está contida na sua espessura (a restante fica no bloco adjacente). Isto permite que a estrutura possa vir a ser muito mais robusta, se necessário, sem grandes alterações de morfologia.

Por fim, esta alteração não só previne ou minimiza os riscos destas falhas existirem, como também melhora o *design* do ponto de vista da produção, uma vez que, se a estrutura for acomodada nas extremidades dos painéis, não há necessidade de existirem furos passantes no interior dos mesmos, algo que poderia levar a custos mais elevados, devido à difícil execução deste tipo de operações. Além disso, já eram considerados encaixes laterais nesta proposta (encaixes machos e fêmeas laterais dos painéis) pelo que operações nessas zonas já teriam de ser feitas no primeiro conceito. Assim, existe uma diminuição do número e tipo de operações uma vez que foram combinadas duas funções na mesma zona.

### 4.3 Proposta 2

Assim, no seguimento das falhas encontradas no FMEA da secção anterior, foram realizadas alterações ao *design* em múltiplas zonas e elementos, evidenciados em seguida. Outros elementos, como as fundações foram mantidas da proposta 1.

### 4.3.1 Parede básica

#### Painel básico

As alterações realizadas neste elemento, tiveram em foco os seguintes pontos:

1. realizar as correções retiradas do FMEA;
2. diminuir o número e a dificuldade dos processos de fabrico;
3. facilitar o processo de montagem.

Começando pela sugestão do FMEA referente à reorientação dos encaixes, alterou-se o posicionamento do encaixe macho-fêmea horizontal, existentes nos topos e bases de cada painel, como é visível na figura 4.13.

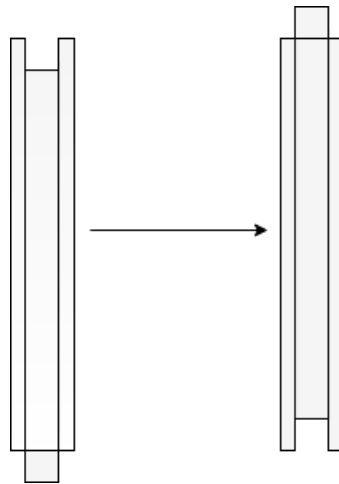


Figura 4.13: Reorientação do encaixe topo-base dos painéis.

De modo a que o interior do bloco não tivesse de ser intervencionado, foi desenhado um ajustamento que passou a estrutura aí existente para as interfaces laterais de cada bloco, eliminando qualquer tipo de furo passante. Deste modo, também se conseguiu ter um bloco simétrico, o que elimina o outro problema identificado no FMEA. O conceito do bloco, já final, passou a ser o da figura 4.14 que também mostra uma montagem de um conjunto genérico. É importante referir que ainda não estão definidas dimensões da estrutura ou dos painéis, pelo que estas figuras apenas mostram o formato geral e a conjugação dos elementos.

Na figura 4.14, podemos ver à esquerda o bloco e à direita uma montagem genérica de três blocos e dois pilares. Comparando com o primeiro conceito, há uma clara melhoria do acondicionamento da estrutura e do painel.

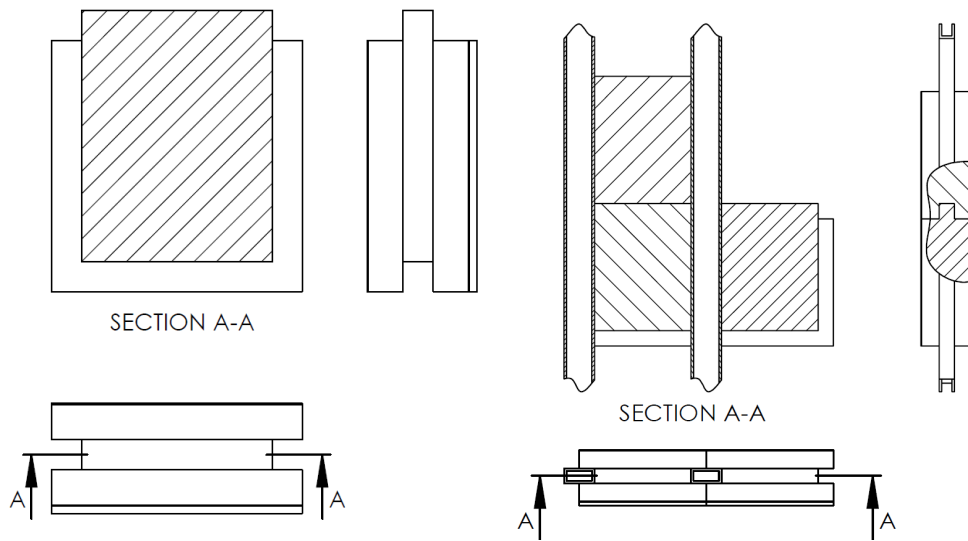


Figura 4.14: Conceito do bloco básico final - elemento e conjunto.

### Tamanho e tipo de painéis

A análise feita ao conceito explicado na proposta 1, mostrou que do ponto de vista de montagem, fazia sentido explorar a hipótese de utilizar blocos básicos mais pequenos, de modo a mais facilmente e com menores recursos humanos e logísticos poderem ser montados na fase de construção.

Assim, iniciou-se o estudo usando a quarta opção visível na figura 4.3. Esta hipótese contempla o uso de painéis com aproximadamente  $1/4$  do pé-direito mínimo. Ou seja, o bloco deste conceito tem  $1/4$  da área do conceito anterior, mantendo o mesmo aspeto e características.

Para uma primeira montagem são utilizados painéis com  $500 \times 500$  mm de área de parede (sem contar com encaixes machos ou fêmeas) e perfis retangulares normalizados com secção de  $120 \times 60 \times 5$  mm, uma vez que as proporções são compatíveis. As alterações, caso necessárias, decorreriam das simulações realizadas na componente de simulação do *Solidworks*, feitas no próximo capítulo. Uma vez que estas alterações não foram necessárias, este foi o painel usado até à versão final do documento. O seu desenho técnico pode ser visualizado no anexo C.

Fazendo uma análise semelhante à feita no conceito anterior, foram analisadas de que maneira poderiam ser obtidas as formas evidenciadas na figura 4.4, de onde se obteve a montagem da figura 4.15.

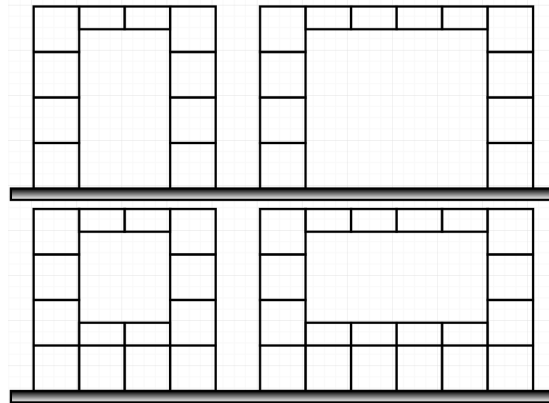


Figura 4.15: Aberturas para encaixe de elementos no segundo conceito - portas e janelas.

### Elementos estruturais da parede

Como pode ser visto na figura 4.14, os blocos são presos por elementos estruturais verticais (pilares) de secção retangular de  $120 \times 60 \times 5$  mm. No entanto, foi necessário prever o posicionamento dos apoios e a maneira como os painéis suprajacentes às portas e janelas se fixariam. Começou-se por se fazer um esboço para uma abertura genérica, que pode ser visualizado na figura 4.16, sendo possível verificar a existência de um elemento estrutural horizontal (viga) que segura os blocos por cima da abertura. Esta viga atravessa o encaixe inferior (fêmea) de cada bloco, segurando-os da mesma forma que um encaixe entre blocos. Neste ponto, fica a faltar apenas o sistema de encaixe, que, uma vez que não influencia a restante estrutura, ficou para uma fase posterior.

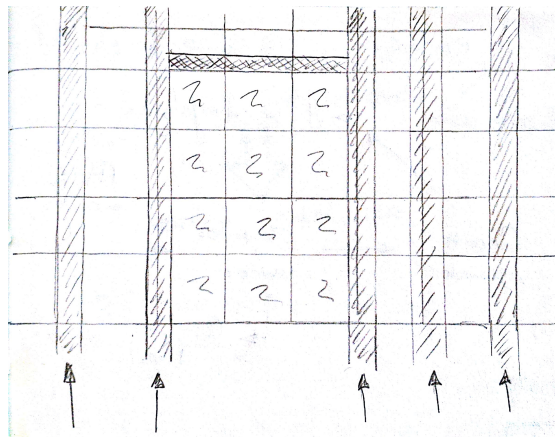


Figura 4.16: Esboço da estrutura para uma abertura genérica.

A partir do esboço, foi elaborado um *assembly* que mostra melhor o posicionamento dos elementos e as diferenças entre aberturas. Na figura 4.17, pode ser visionada a morfologia da estrutura de uma porta e de uma janela, à esquerda e direita respetivamente. A única diferença entre os dois é a existência de painéis e respetivos pilares inferiores, no caso da janela. O vão pode ser variado, como já referido, para formar elementos de diferentes comprimentos, desde uma porta normal a, em teoria, portas de garagem.

Este sistema obrigou à criação de um conjunto de peças que resultam da combinação de uma viga de secção  $60 \times 60$  mm (contorno vermelho, figura 4.17) com o comprimento do vão e de pilares de secção  $120 \times 60$  mm (contornos azuis, figura 4.17) com a altura compreendida entre a ombreira da porta/janela e o teto. Esta peça, apesar de não ser tão estandardizada como as restantes, uma vez que podem existir várias variantes, mantém um elevado grau de semelhança entre cada variante, grande o suficiente para que o único problema em termos de produção seja obter os parâmetros da peça por projeto. Ou seja, após definidos a quantidade e o tipo de aberturas por projeto, a mesma linha de produção pode produzir e montar as diferentes peças sem existir variação de processos.

Em relação aos pilares inferiores, colocados onde está presente uma janela, estes resultam de um perfil metálico retangular normalizado igual aos restantes pilares ( $120 \times 60$  [mm]) apenas com um comprimento diferente, que em termos de produção também não traz qualquer constrangimento.

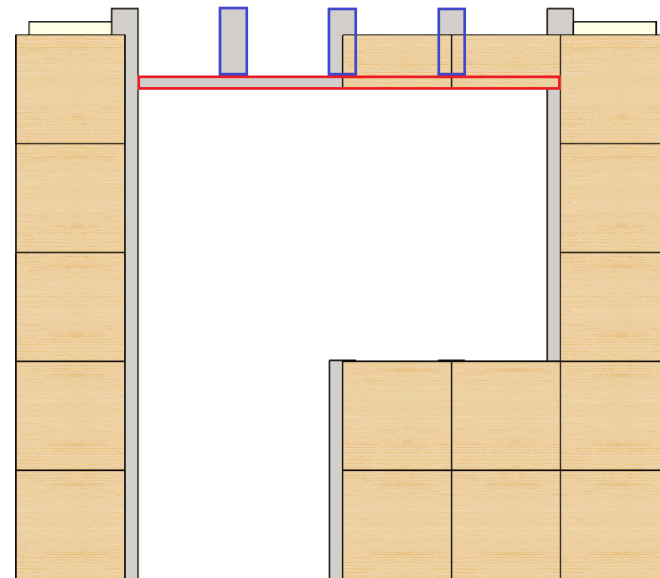


Figura 4.17: Estrutura para aberturas genéricas - porta à esquerda e janela à direita

### 4.3.2 Ligação a $90^\circ$ parede-parede

A evolução seguinte do elemento de ligação entre duas paredes perpendiculares surgiu com a alteração existente no segundo conceito de painéis. Uma vez que os painéis a serem ligados são simétricos, a ligação também o pôde passar a ser, algo que beneficiou outros aspetos, como a ligação inter-modular. Este aspeto foi possível devido ao facto de todas as ligações terem passado a ser idênticas e do facto de se ter adotado uma simetria em dois eixos, permitindo quatro encaixes em vez de dois. De notar ainda a existência de um furo passante para o elemento estrutural. É importante referir que este elemento tem como dimensões máximas a largura da secção de espuma do painel, de modo a que, por fora, possa levar tampas com o objetivo de tapar as ranhuras que não estejam em uso. Desta maneira, é possível usar este canto em todas as situações, diminuindo o número de elementos necessários.

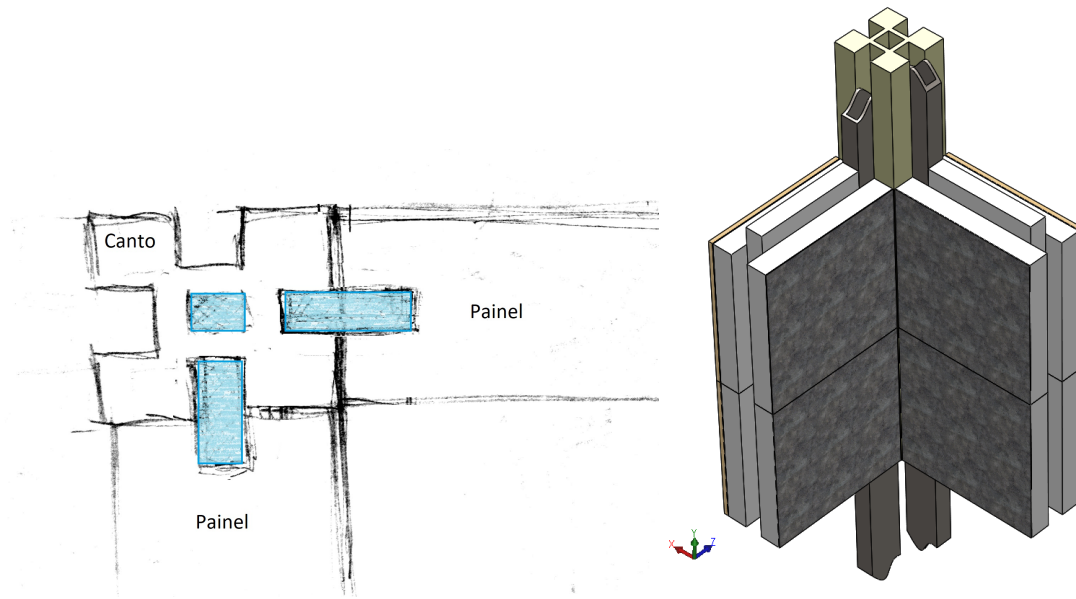


Figura 4.18: Segundo conceito para a ligação do canto - esboço e desenho CAD.

### 4.3.3 Ligação parede-teto

A evolução da primeira proposta surge da tentativa de poder ter vãos transversais variáveis, aumentando assim a flexibilidade de todo o conjunto, algo que é importante, como podemos ver na análise de Kano e no QFD. A variabilidade do vão transversal tem implicações diretas nos dois ângulos do teto (figura 4.10) e, para tentar colmatar este problema, surgiu a ideia de um sistema mecânico que se pudesse adaptar às diferentes situações.

#### Primeira Iteração

Assim, a solução consistiu numa dobradiça que permite a variação do ângulo da viga transversal do módulo aquando da montagem, que é posteriormente fixa. Inicialmente, foi previsto que a viga longitudinal, isto é, a viga que está sobre a parede, na mesma direção desta, estivesse diretamente sobre os blocos superiores da parede, apoiada nos pilares da parede, como é evidenciado na figura 4.19. Esta morfologia introduziu problemas de *design*, uma vez que, nas zonas onde existem vãos (portas ou janelas), não existe pilar de suporte e poderia existir um problema com a flecha. Este deslocamento da viga, iria comprimir a zona dos painéis constituída por PUR, caso o vão fosse demasiado grande, ou deixar a zona para encaixe de portas e janelas desajustado. Para além disso, seria necessário criar um elemento adicional para fixar os painéis do teto.

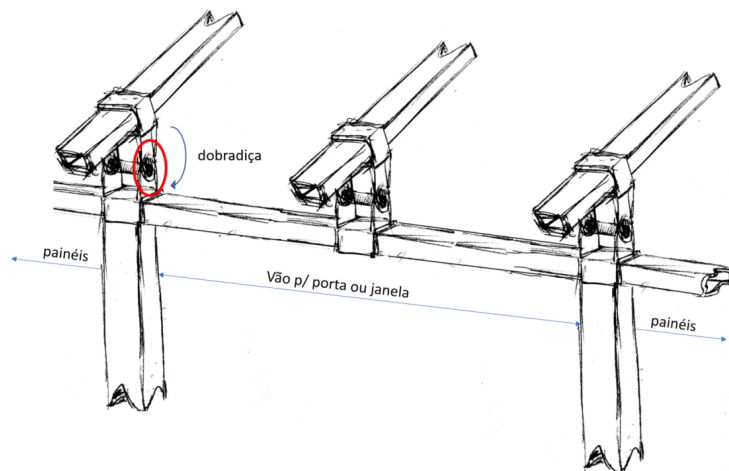


Figura 4.19: Primeira ideia para um sistema de dobradiça no encaixe.

### Segunda Iteração

A solução encontrada para contornar estes problemas foi o reposicionamento da viga para o teto, fazendo com que o este se comporte como uma estrutura única com vários pontos de apoio, em vez de estruturas individuais justapostas com dois pontos de apoio, como se pode ver na figura 4.20.

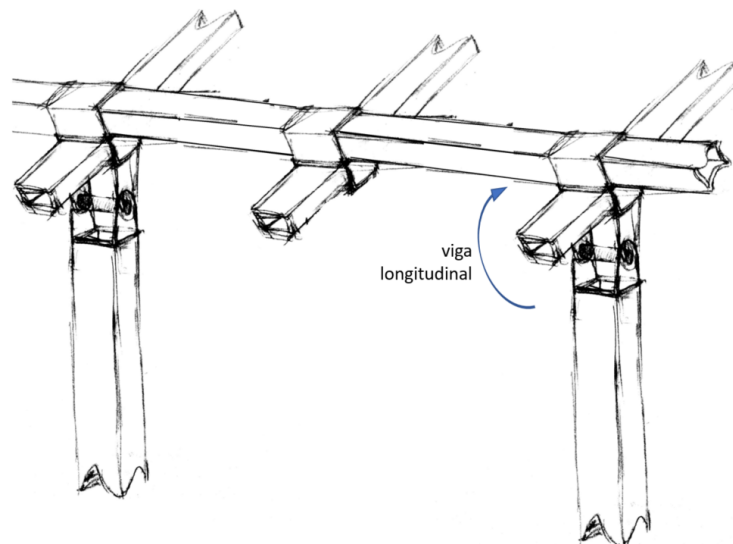


Figura 4.20: Segunda iteração com um sistema de dobradiça no encaixe pilar-viga: mudança de posição da viga longitudinal.

### Terceira Iteração

Ainda assim, após uma revisão ao conceito, foi detetado um erro: a peça de encaixe entre as vigas transversal e longitudinal, onde existe vão para portas ou janelas suportava o

peso da estrutura composta pela viga transversal e pelos painéis, transferindo-o para a viga longitudinal. Ao fazer um reajuste do posicionamento destas (figura 4.21), consegue-se que esse encaixe tenha apenas funções de posicionamento, ficando a carga suportada pela viga. Desta maneira, obteve-se o conceito (figura 4.21).

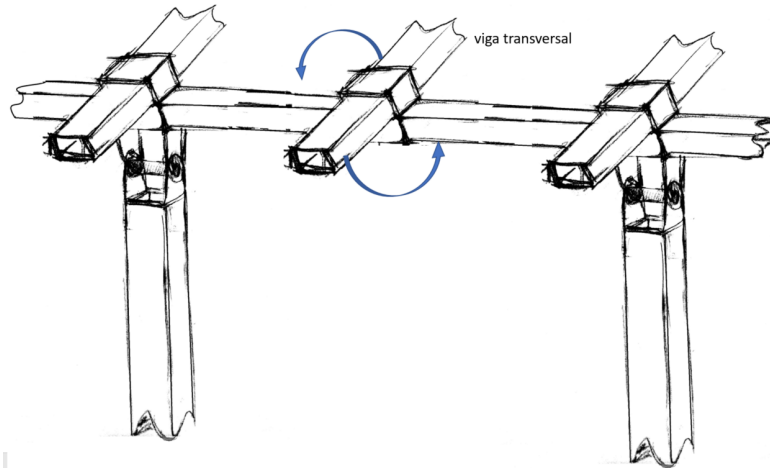


Figura 4.21: Terceira e final iteração com um sistema de dobradiça no encaixe pilar-viga: troca de posição das vigas longitudinal e transversais.

Este conceito cria um problema em relação à vedação, uma vez que não há continuidade dos blocos da parede para os blocos do teto. Na tentativa de se encontrar uma solução que permitisse, com o mesmo conjunto de peças, obter geometrias variáveis, chegou-se à criação de tampas-dobradiça: consistem em duas peças tipo chapa com uma das extremidades cilíndrica. As duas tampas encaixadas permitem obter os ângulos necessários, vedando a zona em questão. De forma a proteger termicamente essa zona, PUR expandido é injetado à posteriori, já com a parede montada, semelhante ao que é utilizado na construção de casas de madeira.

Estas tampas tratam-se de chapas metálicas retas com um dos rebordos dobrado com a forma de uma superfície cilíndrica. As diferenças entre as tampas inferiores e superiores consiste apenas no diâmetro dos cilindros, por forma a que um encaixe no outro, deixando livre o movimento relativo entre eles, como é possível observar na figura 4.22.

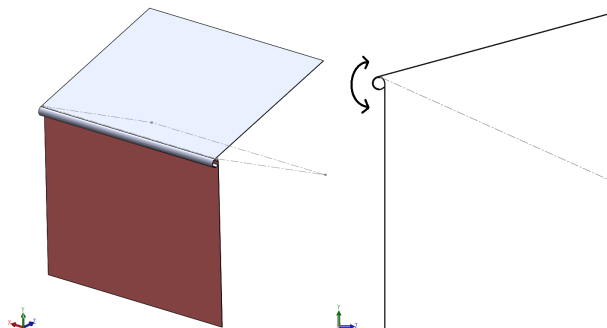


Figura 4.22: Tampas com geometria variável - face vermelha é coincidente com a face exterior da parede longitudinal da casa.



### Quarta Iteração

A última solução decorreu de uma análise feita à largura do módulo. A utilização de elementos quadrados com medidas iguais por toda a casa implica que qualquer alteração de uma medida geral do módulo (altura, comprimento, largura) seja em função do número de blocos, que têm dimensões fixas.

Alguns exemplos destas medidas podem ser encontrados na tabela 4.3, explicada na figura 4.23. Note-se que o vão apenas pode variar horizontalmente de 500 em 500 mm - linha azul clara - e que o comprimento da hipotenusa - linha verde - , de 250 em 250 mm. Esta diferença deve-se ao facto de poderem ser usados meios-painéis horizontais no caso do teto, mas não meios-painéis verticais, no caso da parede.

Tabela 4.3: Exemplos da relação das medidas para painéis básicos 500×500 mm.

Casos	Largura interior [mm]	Largura entre apoios [mm]	Hip. (blocos)[mm]	Hip. entre apoios [mm]	Diferença entre paredes [mm]
1	4000	4204	4250	4380	1229
2	4500	4704	4750	4880	1299
	4500	4704	5000	5130	2047
3	5000	5204	5250	5380	1365
	5000	5204	5500	5630	2148
4	5500	5704	5750	5880	1428

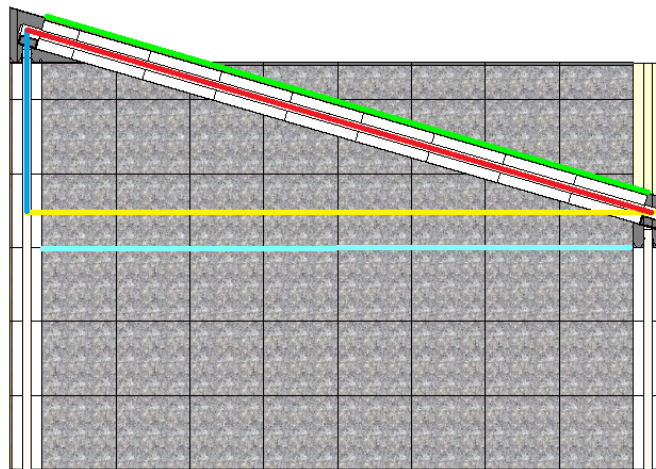


Figura 4.23: Medidas da tabela 4.3 evidenciadas a cores diferentes.

Neste ponto, foi feita uma análise que é resumida no segundo FMEA, na figura 4.4.

Tabela 4.4: FMEA aplicado ao encaixe pilar-viga do teto.

Função	Potencial Falha	Potencial efeito da falha	Severidade	Potencial causa da falha	Solução proposta
Ligação dos pilares da parede às vigas transversais do teto	Falência mecânica do componente principal utilizado	Ligação estrutural comprometida - Morte ou ferimentos graves dos utilizadores	Muito Grave	Possível concentração de tensões na zona da dobradiça	Simulação e dimensionamento de acordo com os resultados, revisão de conceito
	Falência mecânica do pino principal da dobradiça	Ligação estrutural comprometida - Morte ou ferimentos graves dos utilizadores	Muito Grave	Dimensionamento mal executado do componente -possíveis tensões de corte elevadas ao longo deste componente	Simulação e dimensionamento de acordo com os resultados, revisão de conceito
	Falência dos pinos secundários da dobradiça	Ligação deixa de ser rígida e passa a não oferecer resistência aos momentos da viga transversal- Morte ou ferimentos graves dos utilizadores	Muito Grave	Únicos elementos que oferecem resistência aos momentos da viga - tensões demasiado elevadas para o componente	Simulação e dimensionamento de acordo com os resultados, revisão de conceito
Transferência de cargas do teto para a parede	Falência mecânica do componente principal utilizado	Ligação estrutural comprometida - Morte ou ferimentos graves dos utilizadores	Muito Grave	Possível concentração de tensões na zona da dobradiça	Simulação e dimensionamento de acordo com os resultados, revisão de conceito
	Falência mecânica do pino principal da dobradiça	Ligação estrutural comprometida - Morte ou ferimentos graves dos utilizadores	Muito Grave	Dimensionamento mal executado do componente - possíveis tensões de corte elevadas ao longo deste componente	Simulação e dimensionamento de acordo com os resultados, revisão de conceito
	Falência dos pinos secundários da dobradiça	Ligação deixa de ser rígida e passa a não oferecer resistência aos momentos da viga transversal - Morte ou ferimentos graves dos utilizadores	Muito Grave	Únicos elementos que oferecem resistência aos momentos da viga - tensões demasiado elevadas para o componente	Simulação e dimensionamento de acordo com os resultados, revisão de conceito
Fixação transversal das vigas do teto	Falência da ligação aparafusada encaixe-viga	Deslize da viga ao longo da direção do encaixe, queda da viga e painéis dessa subestrutura	Muito Grave	Tensões demasiado elevadas para o componente	Simulação e dimensionamento de acordo com os resultados

Assim, alterou-se o conceito para um sistema mais simples, sem dobradiça, mas mantendo os restantes elementos da última iteração, como o posicionamento dos pilares e vigas que se manteve, como se pode verificar na figura 4.24, já num contexto de CAD.

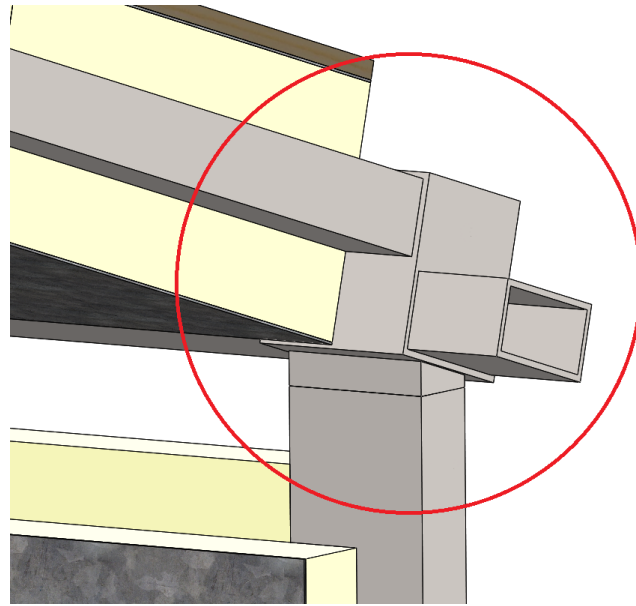


Figura 4.24: Quarta iteração do elemento de ligação do pilar da parede e viga do teto.

Do ponto de vista da produção, esta alteração implica que se tenha de produzir uma família de peças ao invés de uma. Isto é, esta peça é construída com um ângulo diferente para cada projeto, dependendo da largura do módulo. No entanto, as diferenças são pequenas o suficiente para que não existam demasiadas alterações, que implicariam um nível de flexibilidade da produção maior e, por conseguinte, um custo mais elevado. Além disso, é possível, numa fase inicial, avançar com este sistema e, só mais tarde, optar pela variação do vão.

Também as tampas foram sujeitas a alterações, uma vez que foi detetado, na tentativa de adaptação a este último conceito, um problema que seria de difícil resolução: o facto das tampas terem um rebordo que saía da face da parede (face vermelha, figura 4.22), implicava que tivesse de existir uma alteração caso outro módulo fosse colocado ao lado, algo que não só é possível como até provável. Além disso, esta solução não cobria a zona interior, também ela a necessitar de vedação.

Assim, foram desenvolvidas tampas com uma nova geometria, que faz coincidir a face exterior de cada tampa com a face das paredes interiores e exteriores. Uma vez que os pontos de apoio ficam sobre uma face que é maioritariamente constituída por espuma e que, por isso, não oferece grande resistência mecânica, optou-se por encaixar a tampa exterior à tampa interior - estas fixam-se mutuamente, sendo limitadas inferiormente pelos painéis (não só pela secção de espuma mas também pelas de metal e madeira), superiormente pelo teto e, lateralmente, por *snap-fits* existentes na ligação entre as tampas. Na direção da parede longitudinal, são fixas pela própria estrutura, adjacente. Estas são constituídas por chapas metálicas quinadas, de modo a obter a forma pretendida, sendo que à parte exterior/interior é adicionado o acabamento usado nos painéis. Este encaixe permite que a montagem seja extremamente eficiente.

Devido à diferentes dimensões existentes, são necessárias quatro tampas distintas para estas zonas - duas, interna e externa, para o encaixe entre a parede longitudinal inferior e o teto e outras duas, interna e externa, para a parede longitudinal superior também

com o teto. A representação das tampas desenvolvidas está situada mais à frente no documento.

Foram ainda consideradas outras duas soluções, descartadas por razões diferentes, uma ligação colada entre tampas e tampas poliméricas com *snap fits*.

Estas soluções não passaram da fase inicial, uma vez que foi considerado que a ligação colada não oferecia as melhores condições de montagem, uma vez que o formato das tampas previne o uso de grampos para uma boa colagem. A segunda solução, apesar de possível, teria de recorrer a processos de produção por injeção, processo esse que pode vir a ser considerado numa fase futura, caso a cadência de produção aumente, mas que para já pode ser algo prematuro, devido aos custos associados. Assim, optou-se pela solução descrita anteriormente.

### **Paredes transversais**

Após definição e modelação dos restantes elementos do conceito, foram adicionadas algumas peças a esta secção do módulo, de modo a cobrir a zona superior da interface da parede longitudinal mais alta, do teto e da parede transversal. Estas peças permitem vedar esta zona, bem como dar um aspeto visual melhor, uma vez que cobrem todas as faces de espuma que ainda se encontravam expostas.

Para uma primeira fase, considerou-se uma peça feita em metal, semelhante às chapas existentes nos painéis, com um recorte a seguir as linhas da casa e quinada para se apoiar na zona superior do painel.

Este recorte tem de variar de acordo com a inclinação da casa - ou seja, tal como no caso dos apoios, caso se varie o vão, terá de se alterar o ângulo do corte deste elemento - mas, mais uma vez, as alterações são simples o suficiente para que se possam fazer na mesma linha de produção, sem causar grandes transtornos nem perdas de tempo.

Esta primeira peça, representada a azul na figura 4.25, é fixa por duas saliências soldadas à placa que são fixas por *snap-fits* a ranhuras existentes no topo dos pilares, fazendo com o que o processo de montagem seja extremamente fácil e rápido, bem como uma eventual substituição da peça.

A segunda peça, representada a verde na figura 4.25, é semelhante, e serve para tapar a área restante da zona. Também é presa por *snap-fits* à estrutura, mas ao pilar da parede longitudinal.

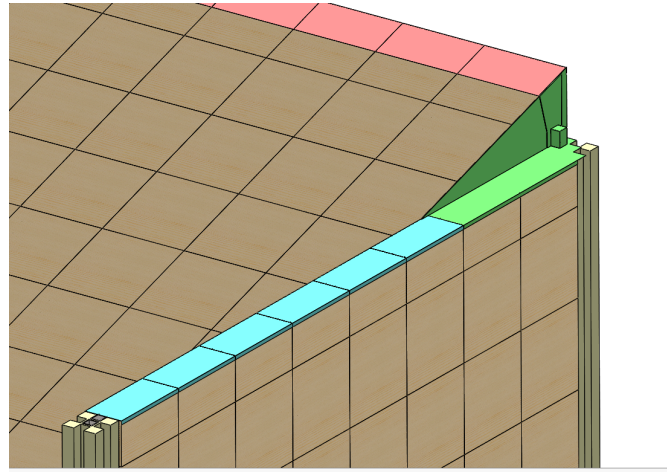


Figura 4.25: Tampas descritas nesta secção.

#### 4.3.4 Desenvolvimento do chão e apoios

Tal como visto no capítulo 2, existem várias formas de fixar edifícios ao solo. Assim sendo, no início do desenvolvimento dos apoios e sobre a forma como cada módulo iria assentar no chão, foi estabelecido que se iria usar uma base de betão como fundação, por várias razões:

- adaptabilidade ao solo - é mais fácil adaptar o betão ao terreno, do que uma estrutura que tenha de ter apoios variáveis, de modo acompanhar o terreno, mesmo que haja uma terraplanagem prévia;
- facilidade de construção - é possível começar a construção com recursos locais, uma vez que a fundação terá um perfil retangular básico, sem grande dificuldade de execução e com materiais fáceis de arranjar. Isto permite que a construção comece antes de serem transportadas peças da fábrica para o local;
- diminuição dos custos de transporte - uma estrutura inteira desenhada para suportar os módulos seria forçosamente um dos maiores custos em termos de transporte, devido ao tamanho e espaço ocupados.

Ou seja, os sistemas de encaixe desenvolvidos pressupõem, como já visto, uma caixa de ar por baixo do chão da casa e, além disso, uma base de betão, onde são ancorados os apoios e elementos estruturais.

Utilizando a mesma linha de raciocínio que no desenvolvimento do teto, tentou-se utilizar painéis idênticos aos da parede, de modo a ter a menor diferenciação possível no número de elementos e, conseqüentemente, na produção.

Assim, o sistema de suporte dos painéis é idêntico ao dos sistemas das paredes e teto, utilizando vigas de secção igual às vigas do teto e pilares da parede, dispostas transversalmente ao módulo.

Uma vez que os módulos do chão, teto e paredes são idênticos, faz sentido que sejam montados de forma coerente, isto é, que não haja desfasamento no seu posicionamento. Isto implica que as extremidades de cada viga do chão coincidam com uma base de

um pilar. Desenhou-se então um sistema de encaixe que alinha estes dois componentes, de modo a que o seu posicionamento seja coerente e que o conjunto chão-parede-teto-parede funcione estruturalmente como um todo. A primeira ideia para o encaixe está representada na figura 4.26. Aqui, são consideradas ligações aparafusadas entre base-encaixe-viga e base-encaixe-pilar.

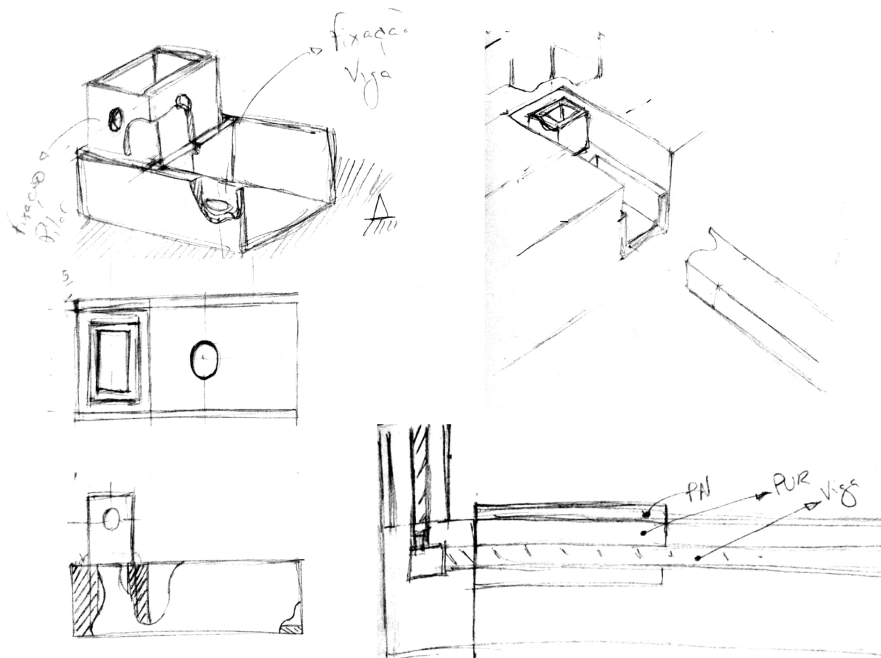


Figura 4.26: Primeiro conceito para o encaixe da viga do chão com o pilar da parede.

A evolução do sistema resulta de uma simplificação da morfologia: se o encaixe for envolvido por betão, podendo até o interior da base da viga ser preenchida por material, a saliência central para o encaixe do pilar não executa nenhuma função em particular e pode ser retirada. O encaixe serve, assim, para alinhar os dois elementos aquando da construção, impedindo (ou pelo menos diminuindo o risco de) erros de construção (ver figura 4.27).

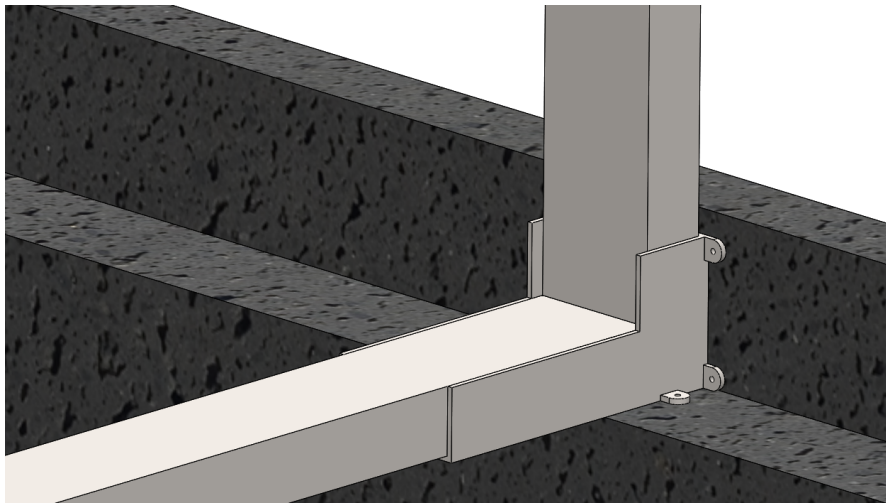


Figura 4.27: CAD final do encaixe da viga do chão com o pilar da parede.

Em resumo, há a construção das fundações, criando a base para estes encaixes. Em seguida, é montada a estrutura pilar-encaixe-viga, cujo alinhamento é assegurado pelo encaixe e os esforços absorvidos pela base. Posteriormente todo o encaixe é coberto com betão, fixando todos os componentes, passando as extremidades dos pilares e vigas então a funcionar como encastres numa secção maior, aumentando a solidez de toda a estrutura.

Apesar de isto significar a colocação de betão após montagem, por se tratar de uma zona crítica onde a manutenção é muito difícil de executar, por estar situada na base da casa, considerou-se a segurança como principal fator (tal como previsto no QFD, uma vez que não interfere com os elementos suprajacentes) e decidiu-se, então, por esta opção, que permite uma melhor fixação permanente. Na figura 4.28 pode ser vista a zona a ser concluída com betão, após montagem dos componentes.

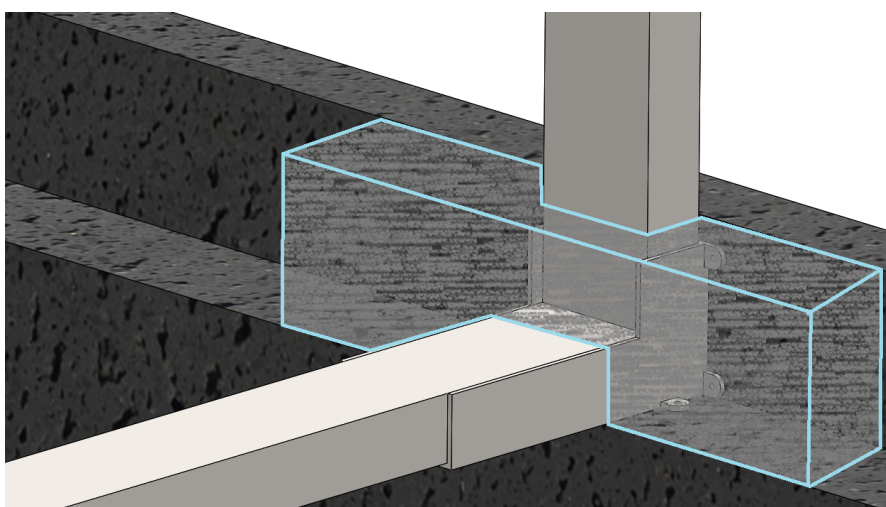


Figura 4.28: Zona encastrada com betão do encaixe.

### 4.3.5 Extremidades dos módulos

#### Estrutura

Após o desenvolvimento de alguns dos elementos fundamentais da casa modular, procedeu-se à modelação das paredes transversais, com a convicção de que não iriam existir diferenças em relação às paredes longitudinais. Tal não acontece, devido ao facto de, se forem utilizadas vigas com perfil retangular na estrutura do último “pórtico”, a face dos módulos entra em interferência com a própria estrutura.

Assim, foi necessário proceder à alteração destes elementos. Apesar de terem sido estudadas outras hipóteses - realizar um corte nos painéis de modo a que estes acomodassem a saliência da estrutura, por exemplo - optou-se por alterar a secção da mesma, passando a utilizar um perfil quadrado  $60 \times 60$  mm nestas zonas com ligações adaptadas para o efeito (viga existente segundo a linha azul da figura 4.29).

Assim, mantém-se a uniformidade dos painéis da parede e consegue-se juntar as faces da parede transversal e teto, algo que traz vantagens em termos de produção: para além do perfil diferente dos restantes (mas ainda assim normalizado, podendo ser adquirido externamente se necessário), apenas é necessário produzir de maneira diferente 4 elementos de ligação parede-teto por módulo (indicados pelas setas azuis na figura 4.29) com metade da largura dos normais (indicados a vermelho, na mesma figura), algo que gera menos perturbações na produção do que a execução de cortes de diferentes geometrias em múltiplos painéis.

#### Parede

Pela mesma razão, foi decidido que o formato da parede não acompanha o formato do telhado da casa: o formato triangular necessário seria feito a custo de alterações nos painéis. Posteriormente, verificou-se ainda que este formato ajuda a que a junção intermódulos seja igual com qualquer lado que venha a ser conectado (figura 4.29, contorno verde).

Esteticamente é dúbio, podendo causar alguma estranheza devido ao formato pouco comum mas, uma vez que este é um trabalho académico com perspetivas de engenharia, foi esta solução encontrada.

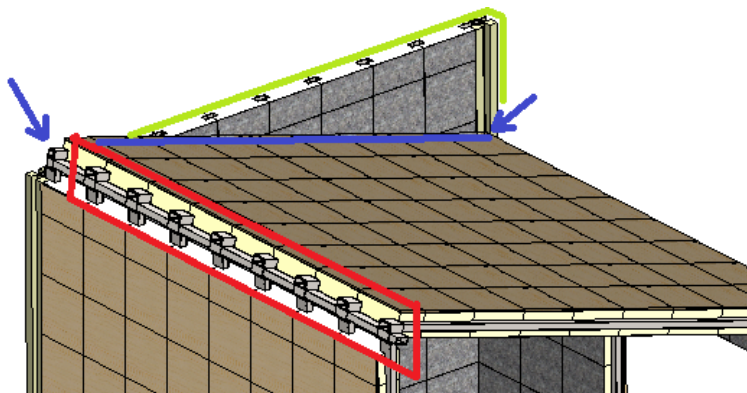


Figura 4.29: Morfologias adotadas na parede transversal.



### 4.3.6 Revisão do conceito

#### *Design for Assembly*

O *Design for Assembly* (DFA), consiste no estudo do produto do ponto de vista da montagem - por melhor que seja um conceito, convém que os seus componentes sejam possíveis de montar e que exista uma ordem definida de montagem, por forma a que o produto não avance para fases posteriores do desenvolvimento com erros que podem custar muito tempo e dinheiro a corrigir. Como tal, neste ponto é feita uma revisão ao conjunto das peças criadas, de maneira a verificar que estas são compatíveis umas com as outras e que não existem problemas de montagem.

A partir das várias montagens e ficheiros CAD gerados na construção do conceito, foi realizada uma montagem virtual de modo a analisar, do ponto de vista de forma e montagem, os pontos fortes e as fraquezas do conceito e, nestas últimas, realizar as alterações necessárias.

A partir do *assembly*, foi possível verificar que existia um problema de montagem dos painéis do teto e do chão: enquanto que é possível montar os painéis da parede superiormente, antes da montagem das vigas e suportes, o mesmo não é possível com os painéis horizontais ou inclinados. Isto acontece porque a estrutura também serve de suporte aos painéis e não existe forma de os encaixar sem interferências com os outros elementos já montados, nomeadamente os pilares da parede longitudinal.

Ainda que, no caso da montagem dos painéis do teto, existisse a opção de montar os painéis com a montagem das vigas transversais, onde estes eram posicionados à medida que a viga deslizava de um encaixe para o outro (ver figura 4.30), tal seria impraticável com o caso das vigas do chão, uma vez que os seus encaixes são dos primeiros elementos a serem montados e a sua morfologia não permite essa sequência de montagem. Ainda assim, apesar de exequível, este tipo de montagem dos painéis do teto envolveria ter trabalhadores a posicionar painéis ao mesmo tempo que as vigas se movimentavam, algo que envolveria um processo mais difícil para os trabalhadores e envolveria mais riscos e mais mão-de-obra, para além de ser necessário uma permanência mais prolongada da grua no local de construção, algo que poderia aumentar o custo.

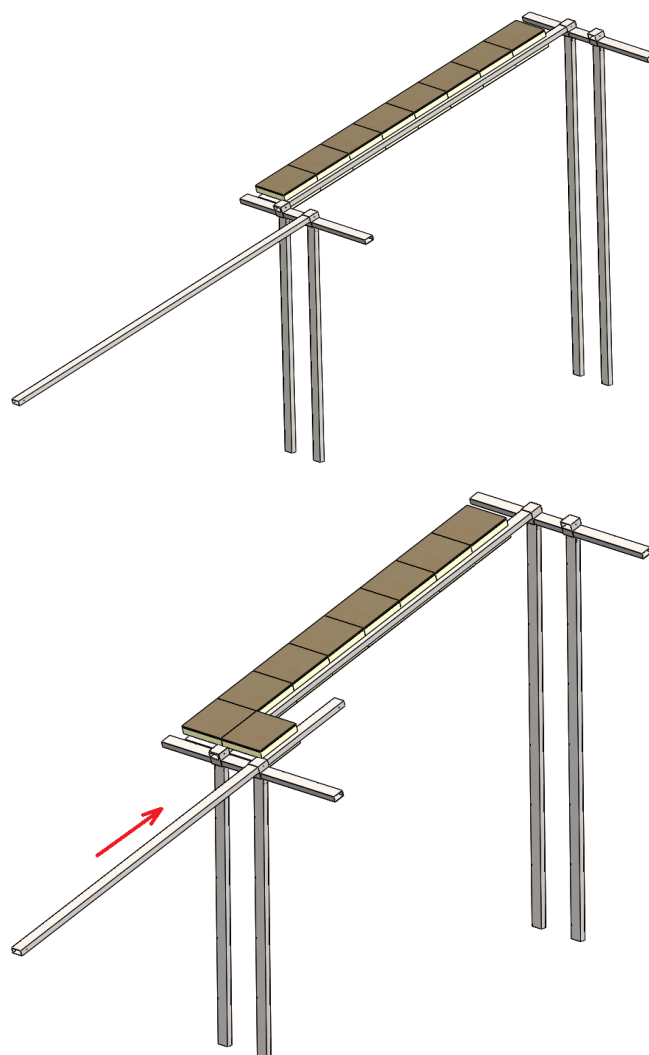


Figura 4.30: Deslize da viga para encaixe dos painéis do teto - hipótese de montagem.

Isto levou a que se alterasse o painel do teto e da parede. Não havendo outra alternativa, foi considerada a hipótese de separar os blocos a metade, verticalmente na direção paralela à da parede, sendo estes posteriormente colados. Do ponto de vista de montagem, esta morfologia retira todos os constrangimentos existentes - figura 4.31.

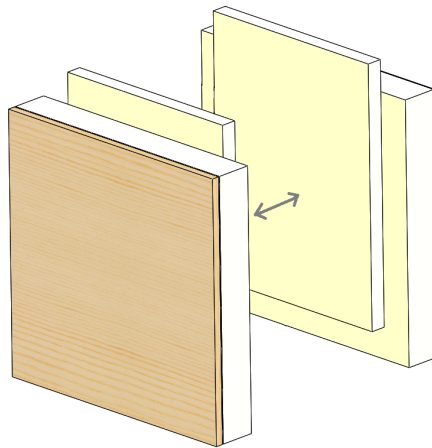


Figura 4.31: Painel básico dividido.

Apesar de esta solução ser possível em teoria, antes de avançar para a produção seria necessário realizar testes a esta ligação, testes esses que não são possíveis de realizar em contexto académico, nem simulados, uma vez que requerem modelos especiais para interação de ligações coladas.

Assumindo que esta solução tem boas características mecânicas, faz sentido que a produção de todos os painéis seja feita “às metades” e que os blocos das paredes sejam montados em fábrica. Isto reduz a disparidade dos modelos a produzir, o que leva a uma redução de custos através da economia de escala, apesar de existirem custos associados à colagem a ter em conta.

### **Sequência de montagem de um módulo**

Em seguida é descrita a sequência de montagem do conjunto de peças CAD intervenientes num módulo  $8 \times 4$  m. Por uma questão de visualização, não é montado o módulo completo, para que se perceba e se consigam visualizar todos os componentes.

Começando pela base, esta consiste num perímetro retangular de betão com uma altura suficiente para gerar a caixa de ar necessária para a montagem dos sistemas de saneamento, elétrico e AVAC, figura 4.32, tal como explicado anteriormente.

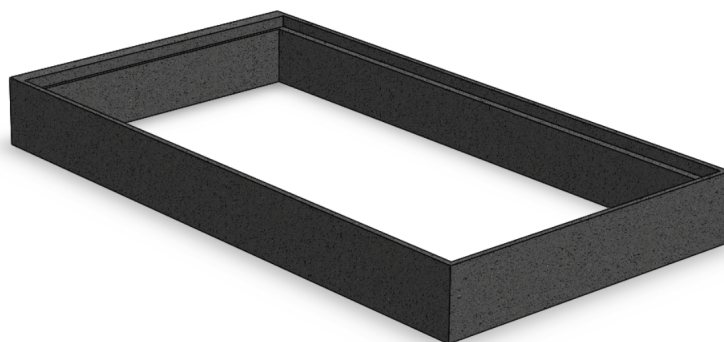


Figura 4.32: Base de betão com reêntrancias para acomodação dos encaixes.

Na fase posterior, são posicionados os apoios das vigas e pilares, utilizando os furos nas orelhas para obter uma fixação provisória, utilizando pinos ou parafusos. Este posicionamento é muito importante porque, caso seja cometido algum erro, as restantes peças poderão não encaixar devidamente.

Após a montagem das vigas e pilares nas posições corretas, são criados novos elementos de betão de modo a criar um encaixe dos apoios da estrutura 4.33.

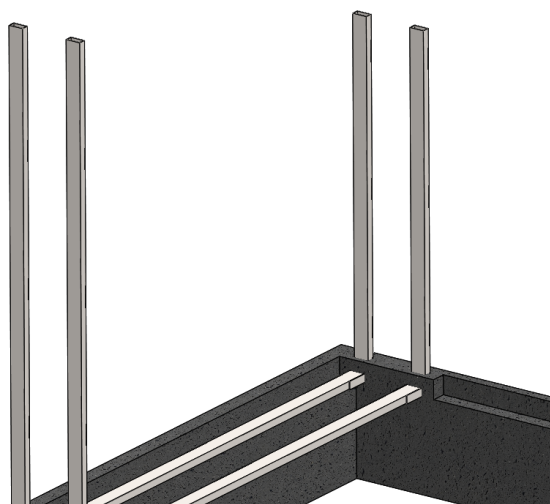


Figura 4.33: Encaixe dos pilares, vigas e respetivos encaixes.

De salientar que, no caso dos pilares de canto, os elementos de espuma que fazem a ligação nos cantos das paredes já devem ir em conjunto com o pilar, devido à sua configuração especial - figura 4.34.

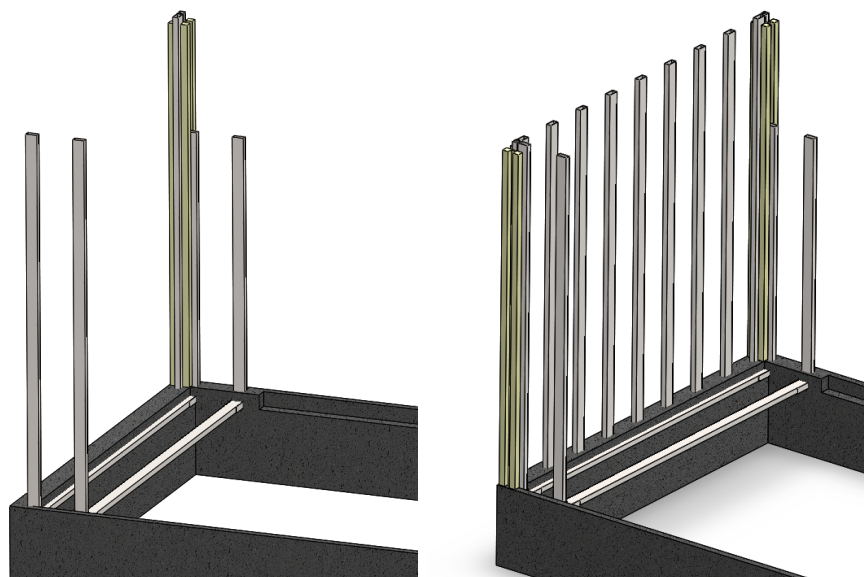


Figura 4.34: Base de betão com vigas do chão e pilares encastrados.

Em seguida, é possível começar a montar os painéis de uma das paredes transversais e das paredes longitudinais. Onde foram anteriormente projetadas aberturas, devem ser colocados os elementos a elas associados - encaixes, vigas das ombreiras, pilares, entre outras, como é representado na figura 4.35.

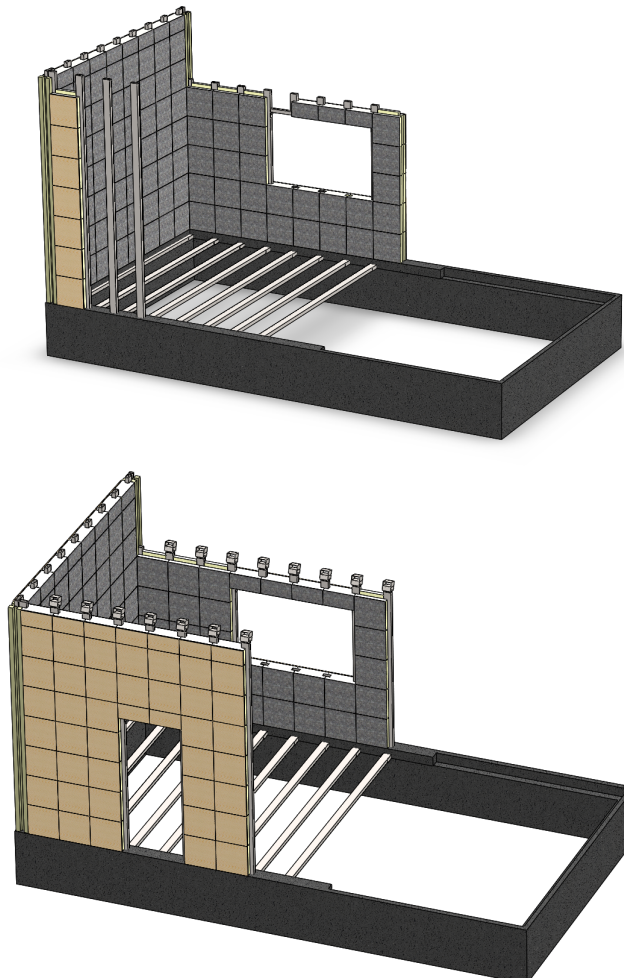


Figura 4.35: Montagem das paredes, aberturas e encaixes.

O passo seguinte consiste em colocar os encaixes entre a parede e teto para, posteriormente, serem colocadas as vigas longitudinais, isto é, as vigas que são paralelas às paredes longitudinais - figura 4.36.

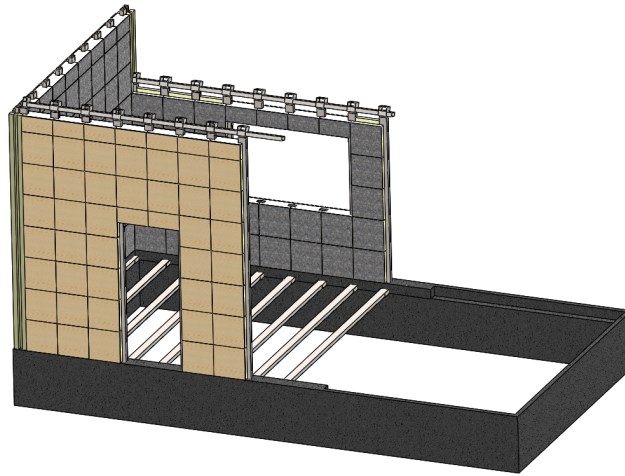


Figura 4.36: Montagem dos encaixes parede-teto e das vigas longitudinais.

A colocação das vigas do teto e fixação aos encaixes são os passos seguintes. De notar a diferença de secção das vigas e encaixes junto à parede transversal e dos restantes - figura 4.37

Uma vez posicionados os encaixes e as vigas longitudinais, é necessário que esta montagem seja executada deslizando a viga desde o primeiro encaixe até alcançar o segundo.

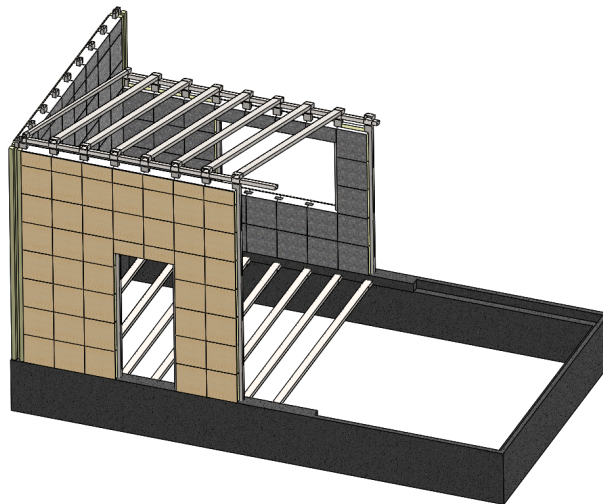


Figura 4.37: Montagem dos encaixes parede-teto e respetivas vigas.

Em seguida, são colocados os painéis do teto, que vêm divididos em duas partes, sendo colados com o auxílio de grampos, figura 4.38.

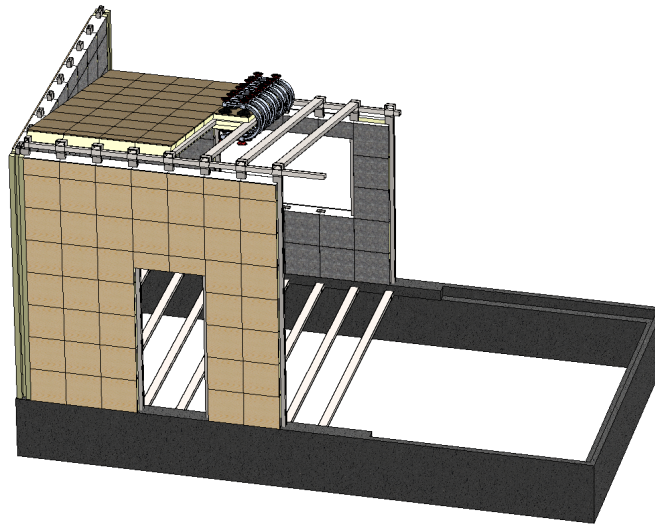


Figura 4.38: Montagem dos painéis com o auxílio de grampos.

De notar que, apesar de ter sido inicialmente considerado que ambas as paredes transversais poderiam ser montadas ao mesmo tempo, tal não pode acontecer devido à montagem associada aos painéis do teto e do chão, uma vez que necessitam de grampos, que por sua vez necessitam de espaço para serem colocados e executar a sua função de aperto dos painéis - a figura 4.39 mostra que uma das faces tem de estar livre para o aperto do mesmo.

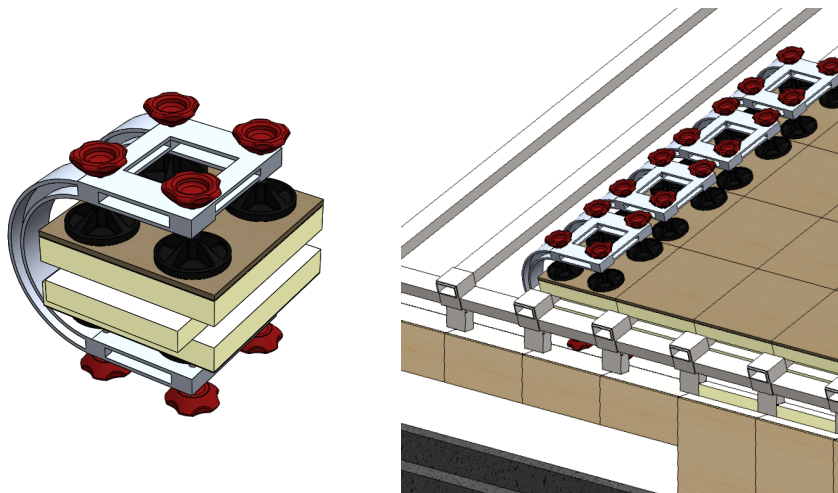


Figura 4.39: Montagem dos painéis do teto - necessidade de uma face livre para aperto do painel.

O passo seguinte passa por montar, de maneira semelhante à montagem do teto (com o auxílio dos grampos, juntando as metades de cada bloco, colando-os), os painéis do chão e a última parede de topo, de maneira semelhante à primeira - figura 4.40.



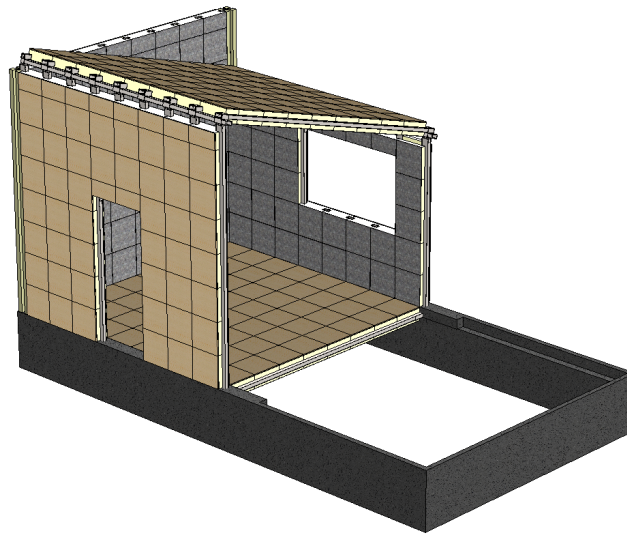


Figura 4.40: Montagem dos painéis do chão

O último passo consiste na montagem dos elementos que permitem a vedação do módulo, que são de montagem rápida devido à utilização de *snap-fits*.

Primeiro são montadas as tampas retangulares que cobrem os painéis das paredes transversais e, em seguida, os painéis que cobrem os cantos nas ligações superiores das três faces: paredes longitudinal e transversal e teto - figura 4.41.

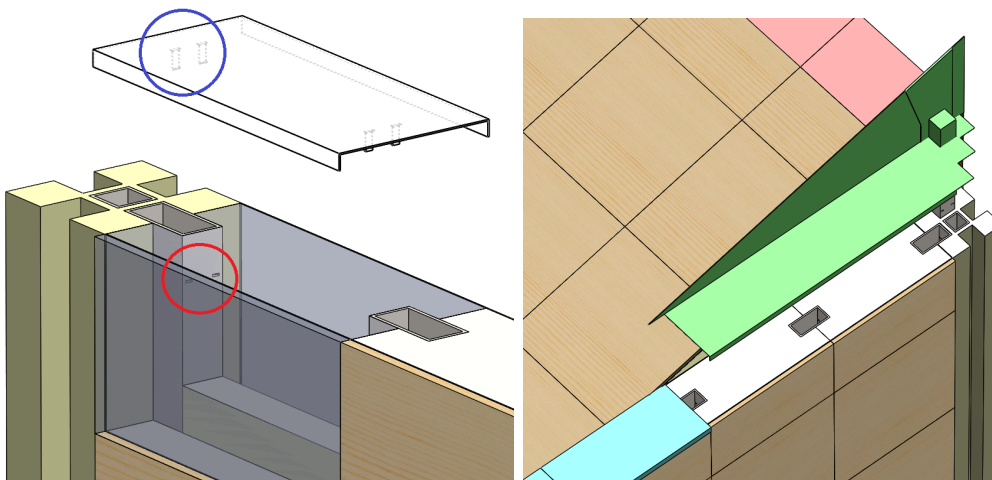


Figura 4.41: Montagem das tampas das paredes transversais

As tampas das paredes longitudinais inferior e superior são montadas da mesma forma - primeiro posiciona-se a interior (representada a azul nas imagens 4.42, 4.43 e 4.44) e, em seguida, a exterior (representada a verde nas figuras 4.42 e 4.43 e a vermelho na figura 4.44), sendo que estas se fixam mutuamente, como se pode verificar nas figuras já referidas. Os círculos vermelhos, em cada uma das duas primeiras imagens representam

os mesmos encaixes, um já montado e outro ainda por montar. Após a colocação das tampas, deve ser aspergido PUR sobre as superfícies internas, de modo a que este expanda e ocupe a secção entre as mesmas. Tal como já referido, isto evita a existência de uma ponte térmica nesta zona.

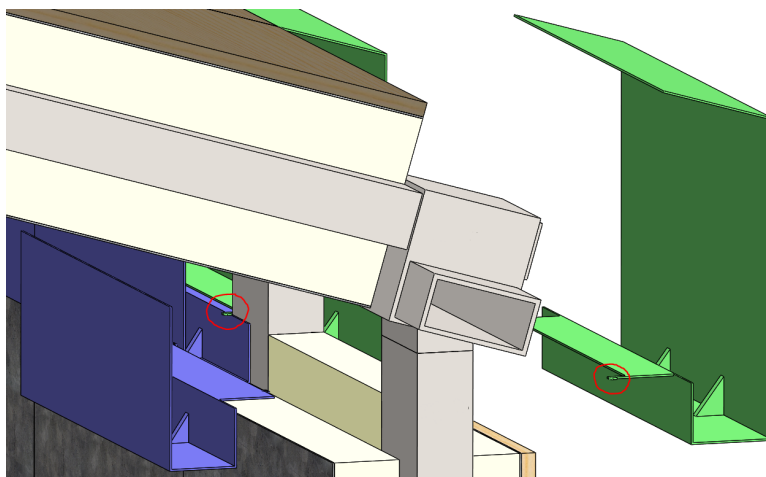


Figura 4.42: Montagem das tampas da ligação parede-teto da paredes longitudinal inferior.

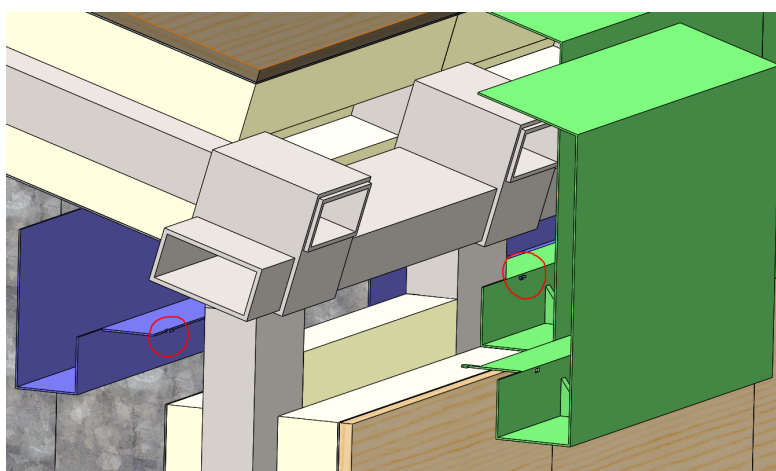


Figura 4.43: Montagem das tampas da ligação parede-teto das parede longitudinal inferior - ângulo inverso.

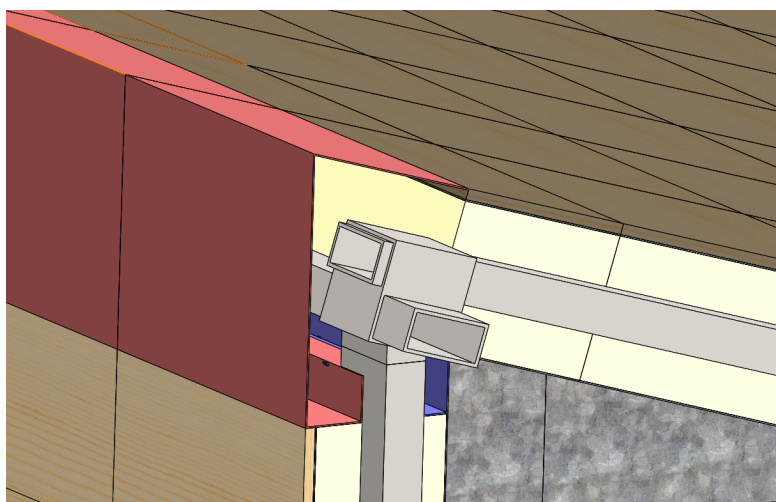


Figura 4.44: Tampas da ligação parede-teto da parede longitudinal superior.



## Capítulo 5

# Validação do conceito final

### 5.1 Simulações

De modo a validar toda a fase de desenvolvimento do conceito, torna-se necessária a realização de simulações, cálculos e construção de protótipos que permitam analisar e alterar, onde necessário, o conceito. Por melhor que sejam as preparações e a conceção durante o desenvolvimento do conceito, existem sempre elementos que necessitam de ser alterados. Além disso, há que cumprir com as normas existentes para cada produto, onde estão descritos testes a serem realizados que comprovem a *performance* do produto.

Neste contexto académico, onde não existiu possibilidade de testar um protótipo físico, foram realizadas simulações utilizando a componente FEA (*Finite Element Analysis* do *Solidworks*. Apesar deste componente, na versão estudante, não ser utilizado na indústria nem no desenvolvimento do produto em geral, por existirem ferramentas que são consideradas mais exatas no mercado, é um bom ponto de partida para indicar se o caminho traçado até então foi bem definido.

É importante dizer que, uma vez que não esteve disponível poder computacional suficiente para a realização de simulações detalhadas com todo o modelo e em diferentes condições de utilização, foram selecionados certos conjuntos de componentes base, que foram testados de modo a que os resultados pudessem ser extrapolados para todo o conjunto. Os *assemblys* escolhidos permitiram simular cargas exercidas sobre o vão transversal, o vão das aberturas (portas e janelas) e o vão do chão.

#### 5.1.1 Vão transversal

##### Simulação - primeira iteração

De modo a perceber se o conceito tem condições para se sustentar, quando sujeito a cargas externas, começou-se por se realizar uma simulação a um pórtico simples, constituído por dois pilares de comprimentos diferentes, dois encaixes pilar-viga, uma viga transversal e uma viga longitudinal adaptada exclusivamente para este teste. Como ponto de partida, foi atribuído a cada componente aço S185, escolhido por ser comumente usado em estruturas metálicas, a todos os elementos desta simulação (propriedades na tabela 5.1), exceto os pinos, que são introduzidos como condição fronteira e não fazem parte da mesma.

Tabela 5.1: Valores definidos para o aço S185 no *Solidworks*.

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo de elasticidade	$2.1 \times 10^{11}$	Nm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.28	—
Módulo de cisalhamento	$7.9 \times 10^{10}$	Nm <sup>-2</sup>
Densidade	7800	kg·m <sup>-3</sup>
Tensão de ruptura	$2.9 \times 10^8$	Nm <sup>-2</sup>
Tensão de cedência	$1.75 \times 10^8$	Nm <sup>-2</sup>
Coefficiente de expansão térmica	$1.1 \times 10^{-5}$	K <sup>-1</sup>
Condutividade térmica	14	W(m·K) <sup>-1</sup>
Calor específico	440	J(kg·K) <sup>-1</sup>

Em seguida, de modo a fixar a viga aos encaixes, foram utilizados dois pinos de 10 mm de diâmetro por cada encaixe. Apesar de esta ligação poder ser aparafusada, com mais ou menos elementos de ligação, uma vez que existe o espaço e o acesso para tal, do ponto de vista da simulação, esta solução é suficiente para os resultados pretendidos, onde o importante é verificar que o encaixe e os próprios elementos estruturais aguentam com os esforços e que a flecha não é excessiva (figura 5.1). Ou seja, esta simulação pretende testar os elementos em si, deixando o dimensionamento de elementos de fixação secundários para uma fase posterior, que não é contemplada neste documento.

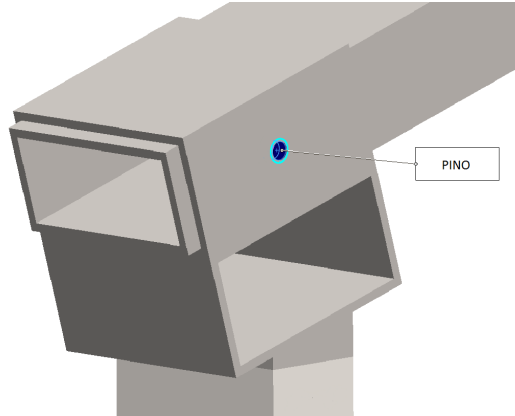


Figura 5.1: Pinos utilizados para a fixação da Viga.

As restantes relações entre faces foram definidas automaticamente, utilizando a ferramenta do *Solidworks* para o efeito. A ferramenta deteta faces em contacto e define os mesmos automaticamente.

O passo seguinte consistiu na definição das restantes condições fronteira: fixaram-se as faces inferiores dos pilares e atribuiu-se a aceleração gravítica a toda a estrutura. Isto permite simular o encastre dos pilares e aplicar a influência do peso próprio da estrutura, uma vez que o *software* calcula automaticamente o peso de cada elemento. Em relação ao encastre, apesar de não serem fixas as faces laterais na zona inferior dos pilares, esta é uma aproximação que, à partida, introduz um fator de segurança, uma vez que aumenta o comprimento dos pilares. A figura 5.2 representa os *inputs* na simulação descritos.

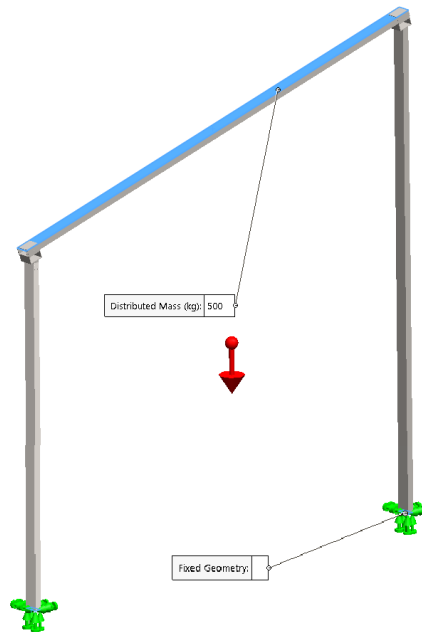


Figura 5.2: Faces encastradas e sentido da aceleração gravítica e zona onde é aplicada a carga distribuída.

Para finalizar as condições fronteira, foi definida a carga aplicada sobre a face superior da viga transversal, com uma massa de 500kg aplicada segundo o vetor da aceleração gravítica, já definido anteriormente com o valor de  $9.8 \text{ ms}^{-2}$  (figura 5.2, seta vermelha). Este valor de carga permite introduzir um coeficiente de segurança na simulação - se a estrutura aguentar com meia tonelada por pórtico, estará à partida preparada para lidar com qualquer situação de carga vertical ao longo do ciclo de vida do produto.

Em seguida, com as condições-fronteira definidas, foi definido o controlo de malha (*mesh control*), nas zonas com geometrias que requerem uma malha mais refinada. Na zona das ligações e em certas arestas, foi aplicada esta ferramenta, onde se optou por uma malha espaçada de 1mm, como se pode ver na figura 5.3.

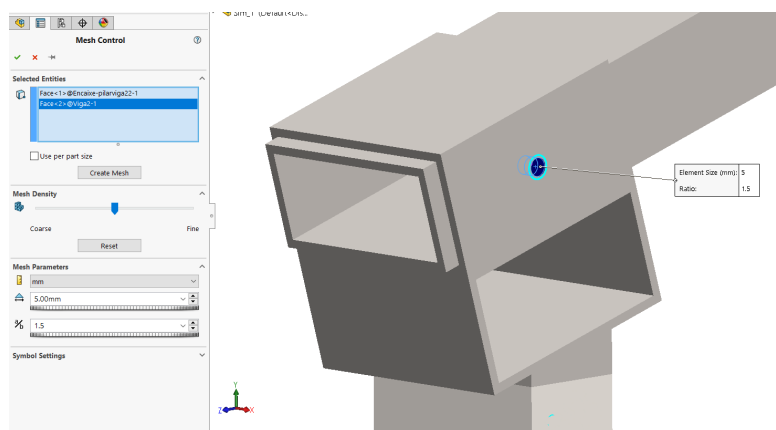


Figura 5.3: Definições do controlo de malha.

A malha foi definida, neste passo, utilizando 10 mm de distância entre nós. Apesar de existirem outras zonas que, provavelmente, mereciam uma maior definição da malha, não existiram recursos computacionais para melhorar a malha geral. Ainda assim, para os pilares e vigas, com comprimentos consideráveis face ao tamanho dos elementos, este é um valor aceitável e que permite tirar algumas conclusões. Esta situação foi corrigida, na medida do possível, com a introdução de novos elementos no controlo de malha, tal como é possível verificar na figura 5.4.

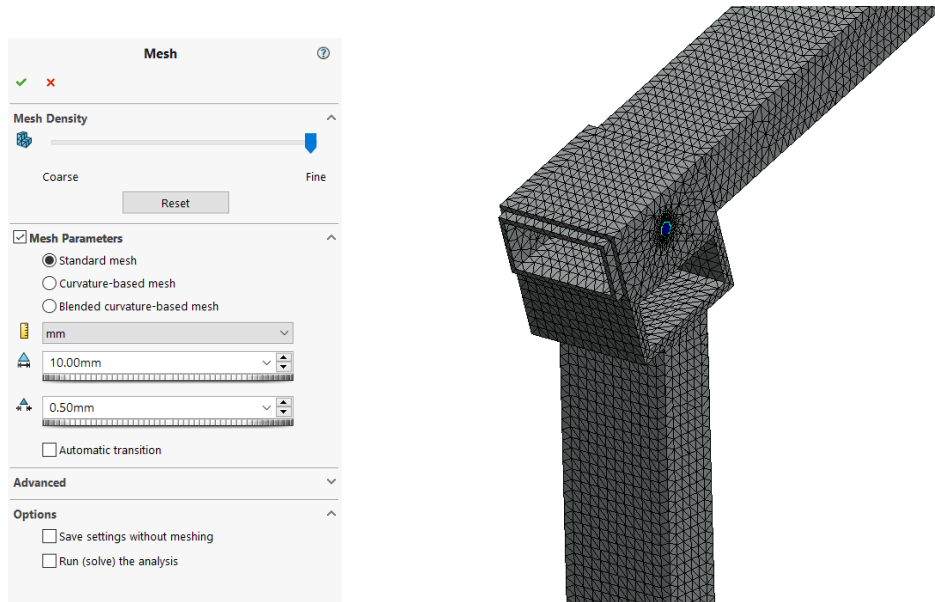


Figura 5.4: Definições da malha e malha obtida.

Com toda a preparação concluída, foi possível iniciar a simulação, cujos resultados e ações tomadas a partir desses resultados são apresentados na secção seguinte.

### Resultados obtidos - primeira iteração

Das simulações realizadas com os passos descritos na secção anterior, foram obtidos dois conjuntos de resultados que interessam analisar: a tensão de Von Mises, que permite ver até que ponto o material é capaz de lidar com as cargas impostas, por comparação com a tensão de cedência do material, e os deslocamentos, que permitem inferir se a estrutura é capaz de manter a forma original - uma flecha muito grande implica que possam ser criadas folgas entre os painéis ou deslocamentos dos mesmos, algo que não é de todo aconselhável.

Assim, para a flecha, foram obtidos os resultados da figura 5.5. O valor máximo foi de 17.2 mm, na zona central, como seria de esperar. À partida não será um valor problemático, tendo em conta que o comprimento da viga ultrapassa os 4 m.



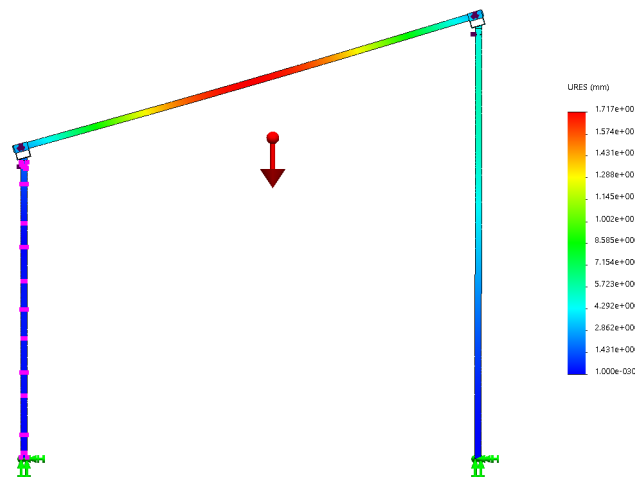


Figura 5.5: Resultados para a primeira simulação - flecha.

Apesar de os resultados para a flecha terem sido positivos, o mesmo não aconteceu com a tensão de Von Mises, onde o valor da tensão de cedência foi ultrapassado em várias zonas do encaixe pilar-viga. Ou seja, as vigas e pilares suportam os esforços sem problemas, mas o encaixe está sujeito a tensões muito superiores, uma vez que, para além de transferirem a carga descendente da viga para os pilares, tem de suportar os momentos gerados na viga, figura 5.6.

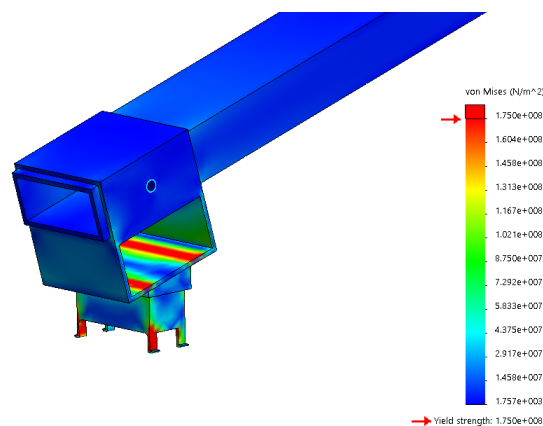


Figura 5.6: Resultados para a primeira simulação - tensão de Von Mises.

### Simulação - segunda iteração

De modo a melhorar o desempenho do encaixe, foram feitas alterações na morfologia do mesmo, acrescentando quatro reforços que ajudam a distribuir melhor as tensões acumuladas nas zonas a vermelho visíveis na figura 5.6, que mostra tensões acumuladas na face inferior do suporte, bem como nos *snap-fits*.

Assim, de modo a colmatar o primeiro problema, foram adicionados quatro reforços,

dois de cada lado do suporte, que permitem que os esforços sejam melhor distribuídos. Para além disso, foram adicionados dois pinos de 5 mm de diâmetro, que permitem que exista um relaxamento das tensões nos *snap-fits*, passando estes a terem funções de posicionamento aquando da montagem e de auxílio aos próprios pinos, figura 5.7.

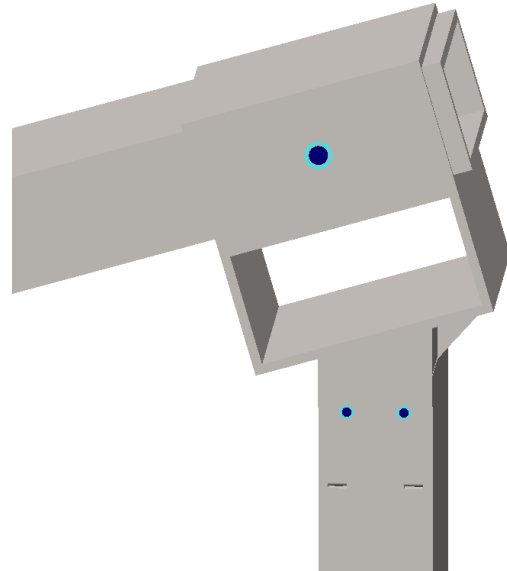


Figura 5.7: Encaixe com alterações.

De modo a melhorar a exatidão da simulação, prevenindo algum fenómeno de *locking* que possa ter ocorrido, foram adicionadas algumas arestas críticas ao controlo de malha, de maneira a ter uma melhor ideia das tensões/deslocamentos envolvidos nestas zonas.

### Resultados - segunda iteração

As alterações realizadas melhoraram o desempenho do encaixe, mas não o suficiente para que a tensão de cedência não tenha sido atingida nalgumas zonas do mesmo, como é possível verificar na figura 5.8. Em relação à flecha, os resultados não variaram suficiente para serem dignos de nota, mantendo-se a flecha máxima na casa dos 16 mm e a variação idêntica, face à primeira iteração.

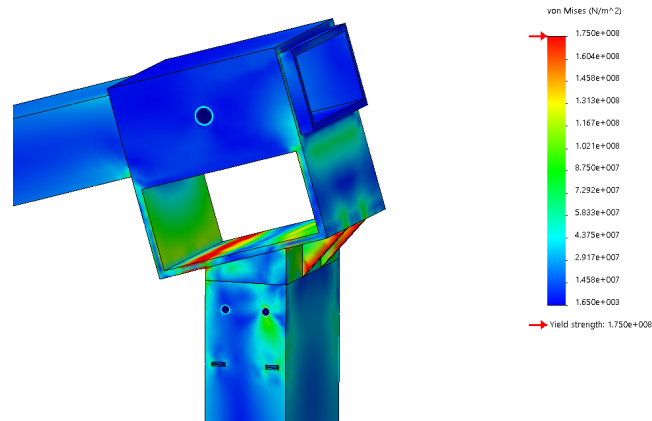


Figura 5.8: Distribuição das tensões de Von Mises na segunda iteração do encaixe.

### Simulação - terceira iteração

A iteração seguinte passou por reforçar toda a zona inferior do encaixe, para além de acrescentar um par de pinos, que permitem que as concentrações sejam ainda mais distribuídas. Esta zona inferior, em vez de ter reforços, passa a ser um bloco sólido, de modo a que exista material suficiente para absorver melhor as tensões aí existentes. Por outro lado, as novas arestas criadas também foram adicionadas ao controlo de malha, de modo a que a malha tivesse espaçamento de 1 mm nesta zona. Na figura 5.9, é possível verificar a nova malha e formato do componente.

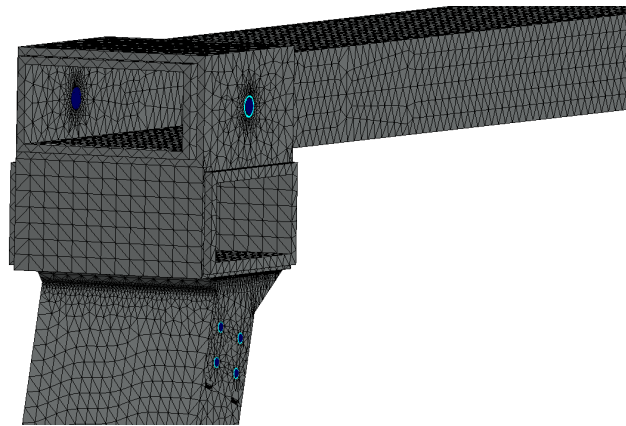


Figura 5.9: Malha gerada e alterações realizadas ao encaixe para terceira iteração.

### Resultados - terceira iteração

Esta iteração trouxe claras melhorias, como seria de esperar, à zona inferior do encaixe, que deixa de ser a zona com mais elementos a ultrapassarem a tensão de cedência, para estar quase toda abaixo desse limite. Também são verificadas melhorias significativas na zona da interface com o pilar, onde a área que ultrapassa o limite de elasticidade é bastante inferior. Ainda assim, verifica-se que ainda existem certas zonas que ultrapassam,

como é possível verificar na figura 5.10.

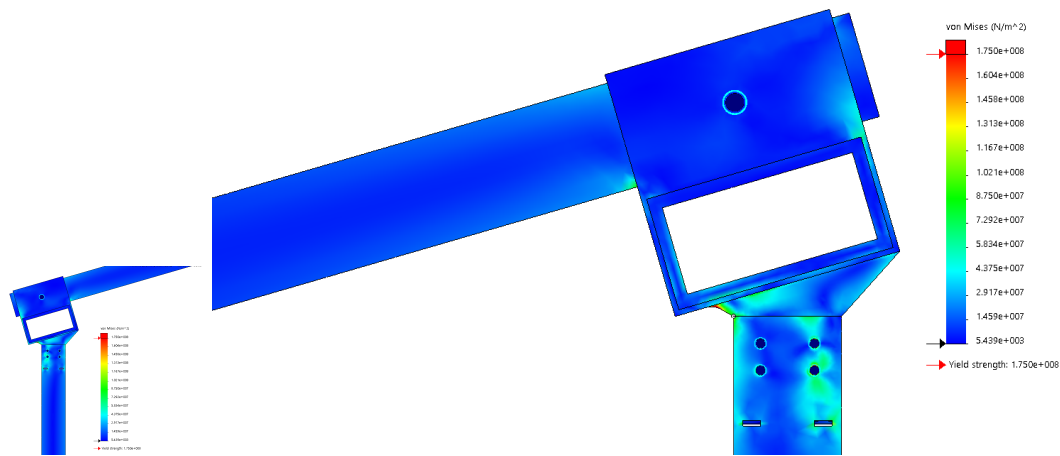


Figura 5.10: Distribuição das tensões de Von Mises na terceira iteração.

Nesta simulação, uma vez que as zonas “vermelhas” são bastantes reduzidas, teve de ser feita uma análise mais aprofundada, visível na figura 5.11, que mostra todas as zonas do encaixe que ultrapassam os  $1.5 \times 10^8 \text{ Nm}^{-2}$ .

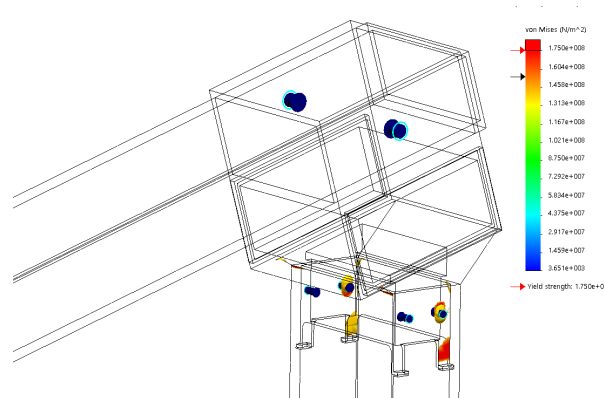


Figura 5.11: Distribuição das tensões de Von Mises na terceira iteração - zonas críticas.

A flecha teve um perfil semelhante às restantes simulações, mas com o valor máximo a decrescer para 13.2 mm.

### Simulação final

Tendo em conta os resultados obtidos, foi feita uma análise crítica a todo o processo e chegou-se à conclusão que, tendo em conta que o componente crítico é o encaixe e que este não consegue lidar com a carga de 500kg distribuídos por cada pórtico, fazia sentido aumentar a resistência do material, de modo a ter a certeza os limites mecânicos da estrutura não são ultrapassados. Apesar de este componente poder ter um custo de produção mais caro, uma vez que se trata de um componente crítico, deve-se ter o fator segurança em primeiro lugar.

Assim, optou-se pela utilização do aço normalizado AISI 4340, que tem as características - tensão de cedência, em particular - pretendidas, visíveis na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Características do Aço AISI 4340 normalizado no *Solidworks*.

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo de elasticidade	$2.05 \times 10^{11}$	$\text{Nm}^{-2}$
Coefficiente de Poisson	0.32	- -
Módulo de cisalhamento	$8.00 \times 10^{10}$	$\text{Nm}^{-2}$
Densidade	7850	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Tensão de ruptura	$1.10 \times 10^{10}$	$\text{Nm}^2$
Tensão de cedência	$7.10 \times 10^8$	$\text{Nm}^{-2}$
Coefficiente de expansão térmica	$1.10 \times 10^{-5}$	$\text{K}^{-1}$
Condutividade térmica	44.5	$\text{W}(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
Calor específico	475	$\text{J}(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$

As condições da simulação presente na secção 5.1.1 foram repetidas, ponto por ponto, com a alteração do material no encaixe pilar-viga e no diâmetro dos pinos inferiores, que passaram a ter diâmetro de 7.5mm, de modo a diminuir a tensão na interface do encaixe com o pilar.

Também se cortaram os pilares verticais, uma vez que não são componentes críticos, permitindo assim que o tempo de simulação se reduzisse para menos de 50%.

### Resultados obtidos - simulação final

Para esta última simulação, com as características descritas na secção anterior, chegou-se aos resultados existentes na figura 5.12. Pode-se notar, como esperado, que as zonas críticas já não ultrapassam a tensão de cedência, uma vez que esta aumentou consideravelmente. Na zona dos pinos, é possível notar que a alteração ao diâmetro foi suficiente para que os esforços não fossem tão elevados fazendo com que os pilares os consigam absorver sem ultrapassarem a sua tensão de cedência.

Este é um bom ponto de partida para este projeto, uma vez que ainda há espaço para melhorias, seja analisando materiais diferentes, seja fazendo pequenas alterações à sua morfologia tendo em conta o DFM.

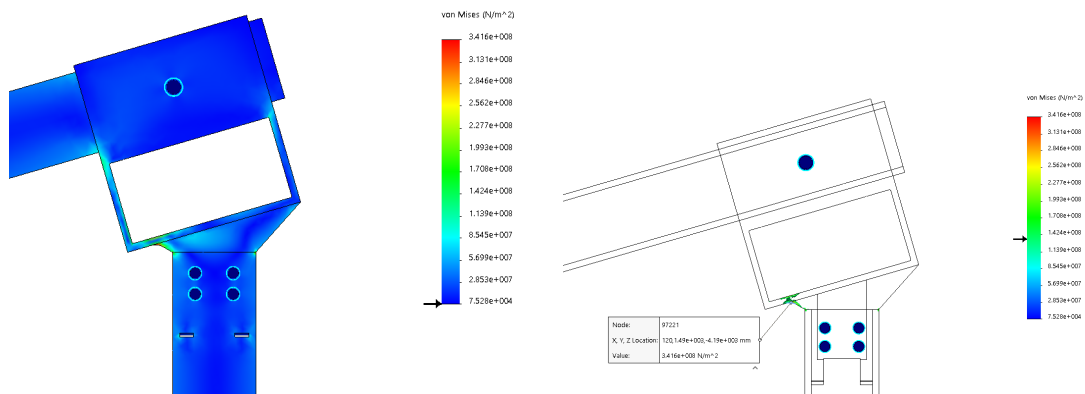


Figura 5.12: Distribuição das tensões de Von Mises na quarta iteração - zonas críticas.

Em relação à flecha, o valor foi mais baixo do que o da simulação anterior, apresentando um valor máximo de 9 mm aproximadamente, tal como seria de esperar, devido ao aumento da rigidez do material do encaixe.

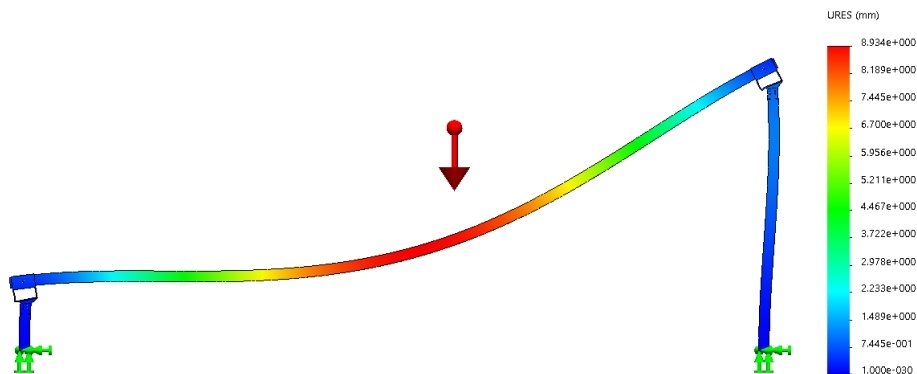


Figura 5.13: Resultados para a última iteração - flecha (deformação encontra-se exagerada para melhor perceção).

### 5.1.2 Vão longitudinal

De modo a perceber melhor até que ponto é possível criar aberturas nas paredes, foi necessário realizar simulações aos componentes que nelas interferem. Apesar de o vão longitudinal, testado na secção anterior, também ter algum impacto na flexibilidade do módulo e, por conseguinte, do produto, a dimensão da abertura do vão transversal tem um impacto muito maior, pois permite prever as dimensões máximas de portas e janelas. Ou seja, o facto de se poder ter aberturas de grandes dimensões constitui um elemento importante, porque a flexibilidade do produto aumenta drasticamente.

### Simulações - primeira iteração

Assim procedeu-se à realização de um *assembly* que permitisse simular, de forma simplificada, este conjunto, tendo mais uma vez em conta os recursos computacionais disponíveis. Escolheu-se um vão com dois metros, que corresponde a três pontos de apoio (das três vigas longitudinais) por cada viga transversal e quatro pontos de apoio de toda a estrutura. Estas três vigas longitudinais não foram inseridas na simulação, de modo reduzir o número de elementos. Ainda assim, foram introduzidas as duas que ligam os encaixes que suportam a estrutura, precisamente para ter uma ideia da influência das cargas que vêm das vigas concordantes nos apoios, elemento crítico das simulações realizadas na secção 5.1.1.

Semelhante às simulações anteriores, foram aplicadas cargas nas faces superiores das vigas, longitudinais e transversais (figura 5.14), que permitem simular a presença dos painéis, para além de uma eventual carga extra. A carga na viga longitudinal foi reduzida, uma vez que são adicionadas as cargas das vigas transversais, algo que não era considerado na simulação anterior.

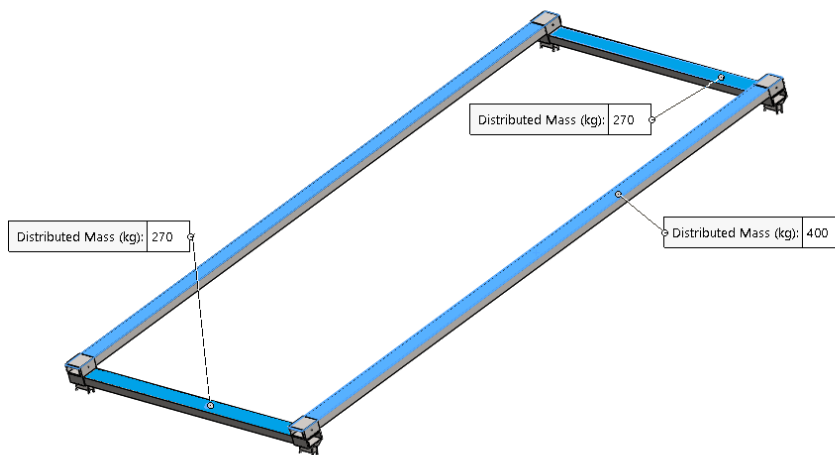


Figura 5.14: Cargas aplicadas nesta simulação.

Os pontos de apoio foram definidos nas faces de contacto do apoio do encaixe pilar-viga - figura 5.15.

O controlo de malha aplicada foi idêntica à da última simulação, uma vez que os apoios são iguais, o mesmo acontecendo com as definições da malha.

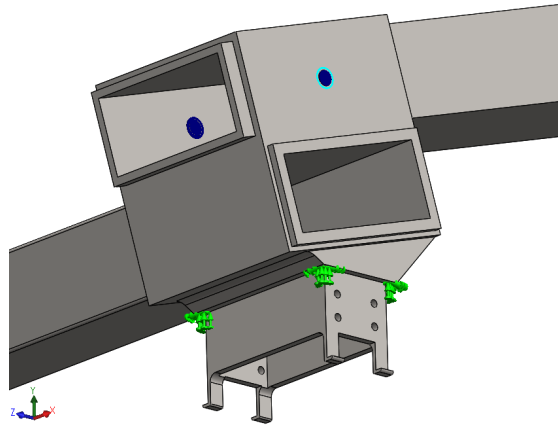


Figura 5.15: Definição das faces encastradas.

### Resultados - primeira iteração

Em relação aos elementos simulados, nenhum ultrapassou a tensão limite de elasticidade, ficando bem aquém do mesmo, como é possível verificar na figura 5.16.

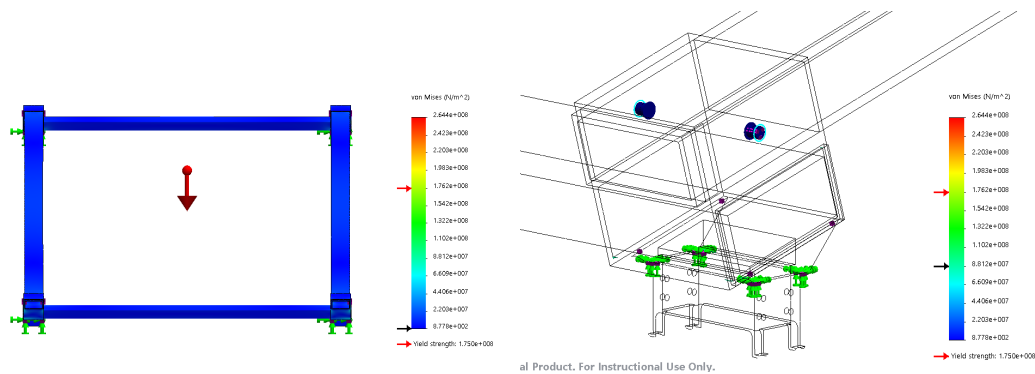


Figura 5.16: Resultados para a simulação da viga transversal - tensão de Von Mises.

Em relação à flecha, o valor também foi menor, comparado com o valor anterior, devido à diferença de cargas como é possível observar na figura 5.17).



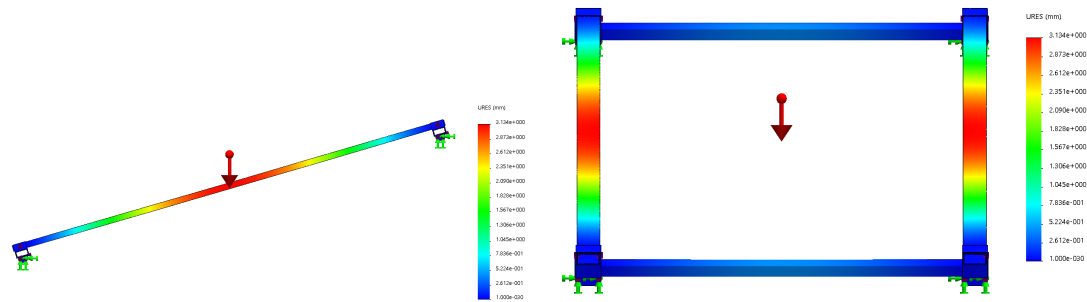


Figura 5.17: Resultados para a simulação da viga transversal - flecha.

### 5.1.3 Viga do chão

O último elemento simulado, a viga do chão, tem um grande impacto na utilização diária do produto. É com estes elementos (e com os painéis neles apoiados) que se dá a maior interação. Apesar de não ter de suportar cargas, para além das impostas pelas pessoas e objetos que interfiram diretamente sobre cada viga, o desempenho deste elemento tem, tal como já explicado, um impacto direto no nível de conforto do utilizador, bem como na perceção da qualidade do mesmo. É importante que não existam grandes oscilações com a mudança de cargas, de modo a que o utilizador não sinta o chão a abanar ou a ondular se, por exemplo, alguém saltar dentro de casa.

Assim, as simulações seguintes permitem inferir se estes elementos cumprem com estes requisitos.

#### Simulações - Iteração 1

Para simular este componente, foi criado um *assembly* com a viga e dois blocos, que representam o encaسته de betão. Uma vez que o betão tem deformações mínimas e não é simulado neste documento, os blocos foram considerados elementos rígidos.

Foi atribuída uma carga, através de uma massa distribuída, tal como nas simulações anteriores. Uma vez que a geometria é bem mais simples, não houve necessidade de definir controlo de malha, escolhendo-se uma malha com 10 mm de espaçamento entre nós. Foram encastradas as faces inferiores dos blocos, de modo a fixar todo o *assembly* (figura 5.19).

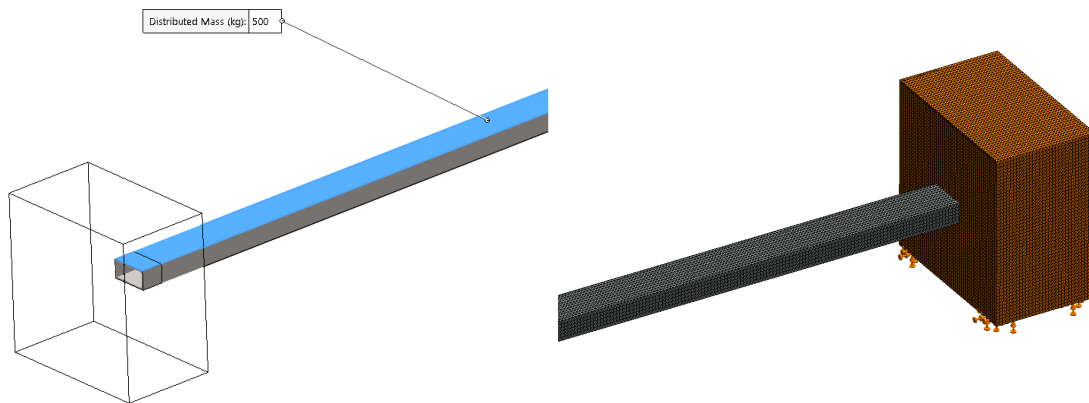


Figura 5.18: *Assembly*, condições-fronteira e malha para simulação em questão.

### Resultados - Iteração 1

Os resultados para esta simulação foram positivos, como esperado, uma vez que se usaram parâmetros semelhantes às simulações das vigas do teto, de secção e material (Aço S185) iguais, e comprimento menor.

A tensão de Von Mises manteve-se abaixo do limite de cedência em todas as zonas da viga, aproximando-se até ao valor máximo de  $1.42 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  nas zonas críticas.

Esta simulação não supôs o preenchimento do volume interno da zona encastrada da viga mas, com a introdução de aberturas que permitam que este preenchimento ocorra, deverá ser possível baixar ainda mais este valor.

Em relação à flecha, esta teve um valor máximo de aproximadamente 5.8mm, apresentado na figura 5.19.

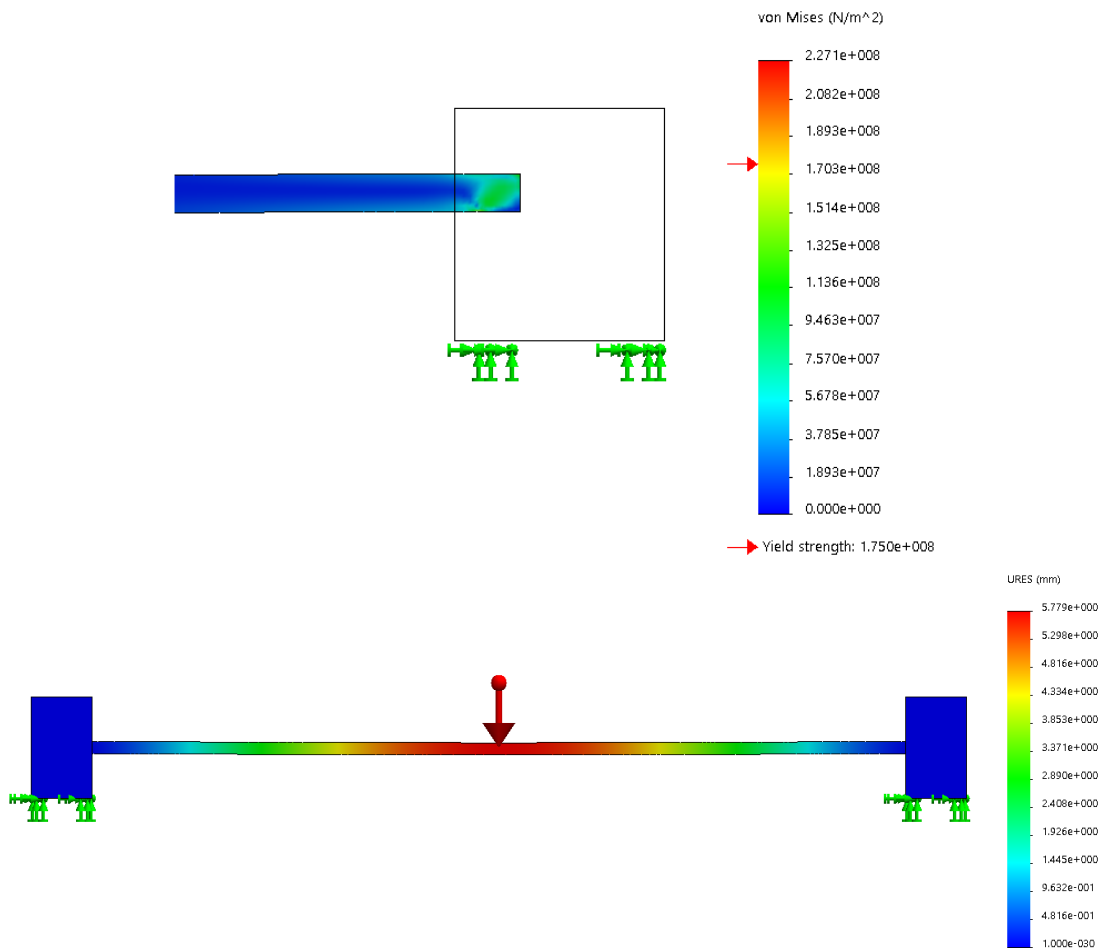


Figura 5.19: Resultados para a simulação da viga do chão - tensão de Von Mises e flecha.

## 5.2 Componentes

### 5.2.1 Transporte contentorizado

Após ser feito um levantamento dos elementos, que pode ser consultado no Apêndice A dos Anexos, foi feita uma verificação da possibilidade de transporte contentorizado, proposta à partida.

Assim, usando os mesmos ficheiros CAD usados no *assembly* geral, com o auxílio de um ficheiro CAD de um contentor ISO de 6 m, foi analisada a quantidade de peças que é possível transportar no mesmo.

Numa tentativa de evitar o esmagamento dos painéis, os elementos estruturais com peso mais elevado foram colocados no fundo do contentor e, superiormente, foram encaixados os painéis básicos, como se pode perceber na figura 5.20.

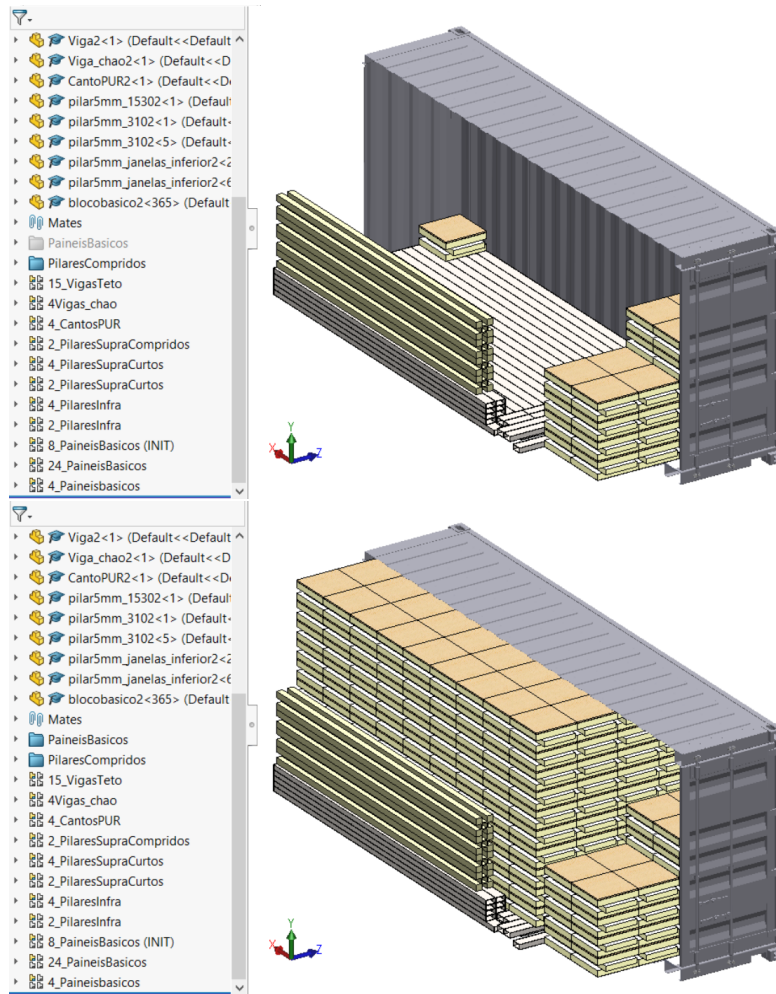


Figura 5.20: Elementos posicionados no contentor para transporte.

Apesar de não ser possível colocar todo o inventário de um módulo, pode-se perceber que, uma vez que está uma grande percentagem dos painéis quadrados (paredes, chão e teto - tipo de elemento com maior número e que ocupa mais volume) de um módulo  $8 \times 4$  m e grande parte dos elementos estruturais, é possível transportar todos os componentes pré-fabricados em dois contentores ISO de 6 m ou em um de 12 m. A figura 5.21 mostra o peso total do conjunto transportado e o inventário dos componentes inseridos no contentor no anexo B.

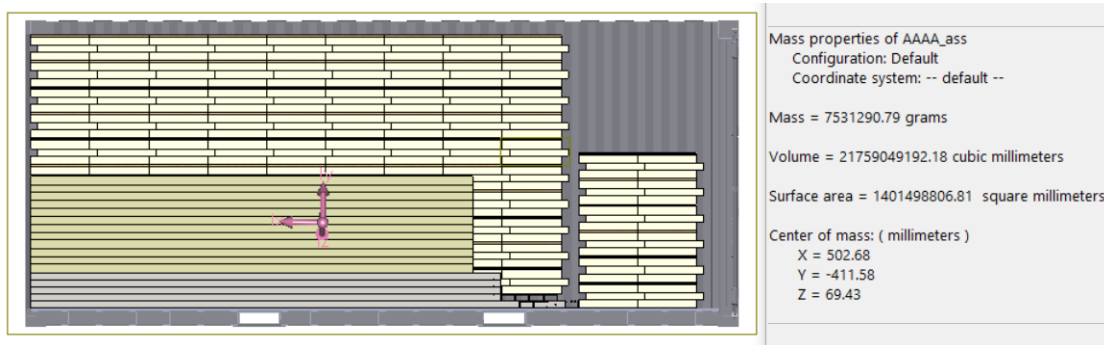


Figura 5.21: Peso total do conjunto.

Não se procedeu à análise dos restantes elementos, uma vez que foi provado que é possível realiza-lo como proposto - mais de 50% da massa já está alocada neste contentor, incluindo grande parte dos elementos de baixa densidade, os painéis. Ou seja, é possível fazer uma otimização em dois contentores, onde se pode ter em conta a distribuição de peso, a sequência de montagem e/ou os prazos de produção/montagem, a acomodação dos elementos para transporte (de modo a evitar danos) ou simplesmente chegar à conclusão que é mais económico e viável transportar tudo num contentor de 12 m. De qualquer das maneiras, como já referido, é possível utilizar contentores ISO para o transporte e esse era o objetivo inicial, que foi cumprido.

### Análise Ergonómica

Tal como em qualquer projeto de produtos que são para uso humano, tem de ser realizada uma análise ergonómica, onde são avaliadas as dimensões do produto, em especial das interfaces destinadas à manipulação/uso humano, do ponto de vista do utilizador. Esta análise tem o fim de verificar se requisitos como a segurança e conforto estão presentes neste produto.

Aplicado ao projeto em questão, esta análise passa por rever medidas gerais como o pé-direito, medidas de portas e janelas - não só em termos de dimensão como de posicionamento face ao utilizador - e alturas das aberturas.

Para tal, foi posicionado um modelo humano num módulo  $8 \times 4$  m, de modo a perceber se as dimensões tinham sido corretamente equacionadas, aquando do desenvolvimento do conceito.

Pode-se perceber, através da figura 5.22, que, uma vez que as dimensões humanas foram tidas em conta desde o início do projeto, o dimensionamento dos elementos foi adequado neste aspeto. Além disso, as eventuais alterações feitas em fases posteriores, no caso de ser necessário aumentar a segurança estrutural, por exemplo, conseguem ser, à partida, feitas sem alterar o dimensionamento dos elementos que interferem com a ergonomia. É possível, por exemplo, alterar a espessura das secções retangulares de modo a reforçar a estrutura ou alterar a espessura das chapas metálicas dos painéis sem criar constrangimentos para o utilizador.

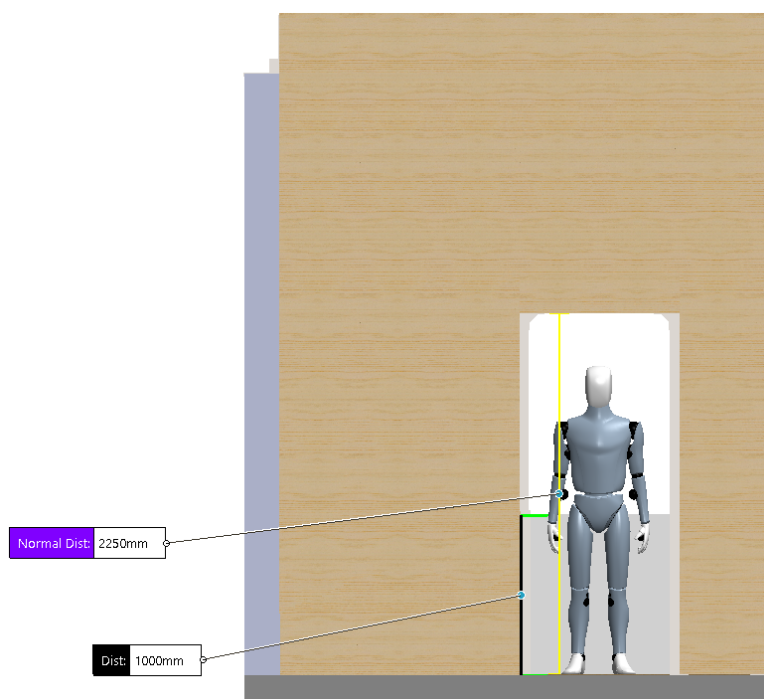


Figura 5.22: Modelo humano com 1.90 m num módulo da casa - medida de 2.5 m de altura da porta e janela, 1 m de altura inferior da janela (situada na parede oposta).

### 5.3 Apresentação do conceito validado

Com o objetivo de mostrar o produto num contexto real, são apresentadas nas figuras seguintes, da figura 5.23 à 5.25, alguns *renders* do conceito validado, já montado. Nestas figuras, é apresentado um conjunto de dois módulos, 8×4 m conjugado com um de 4×4 m.

No entanto, tal como é possível verificar na figura 5.23, um quadrado de área de 64 m<sup>2</sup> é obtido com a adição do módulo de menor dimensão, 4×4 m.

É possível, também, variar o posicionamento das aberturas em qualquer parede, desde que dentro do valor do vão máximo. Neste documento limitou-se a 2 m, mas existe a possibilidade de existirem soluções com vão maior, mediante mais testes e mudanças à morfologia.

As dimensões do módulo 8×4 m estão presentes no desenho técnico do anexo C.

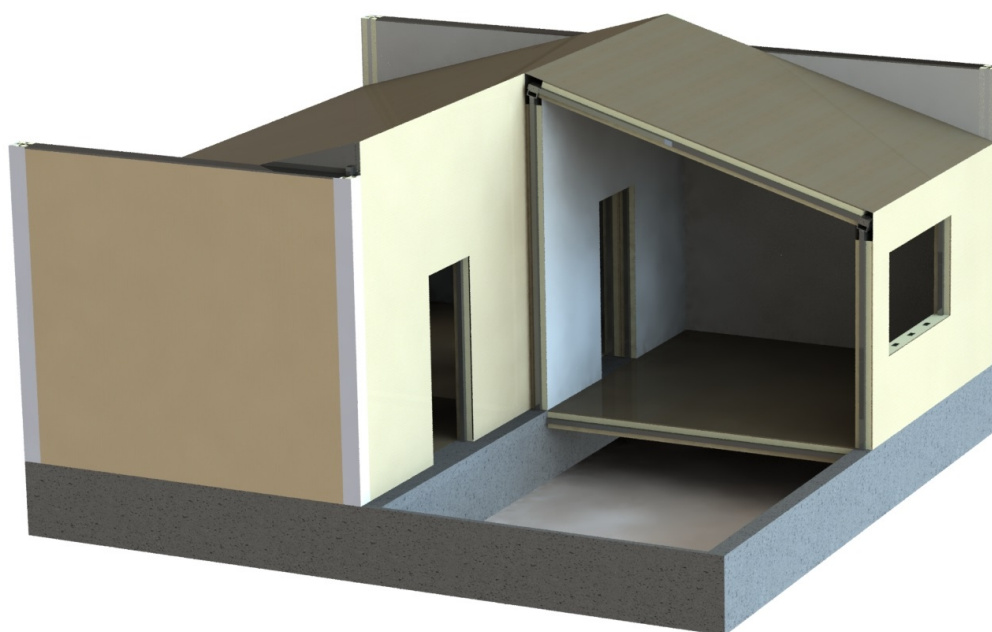


Figura 5.23: *Renders* do produto final, numa configuração com dois módulos - 1



Figura 5.24: *Renders* do produto final, numa configuração com dois módulos - 2

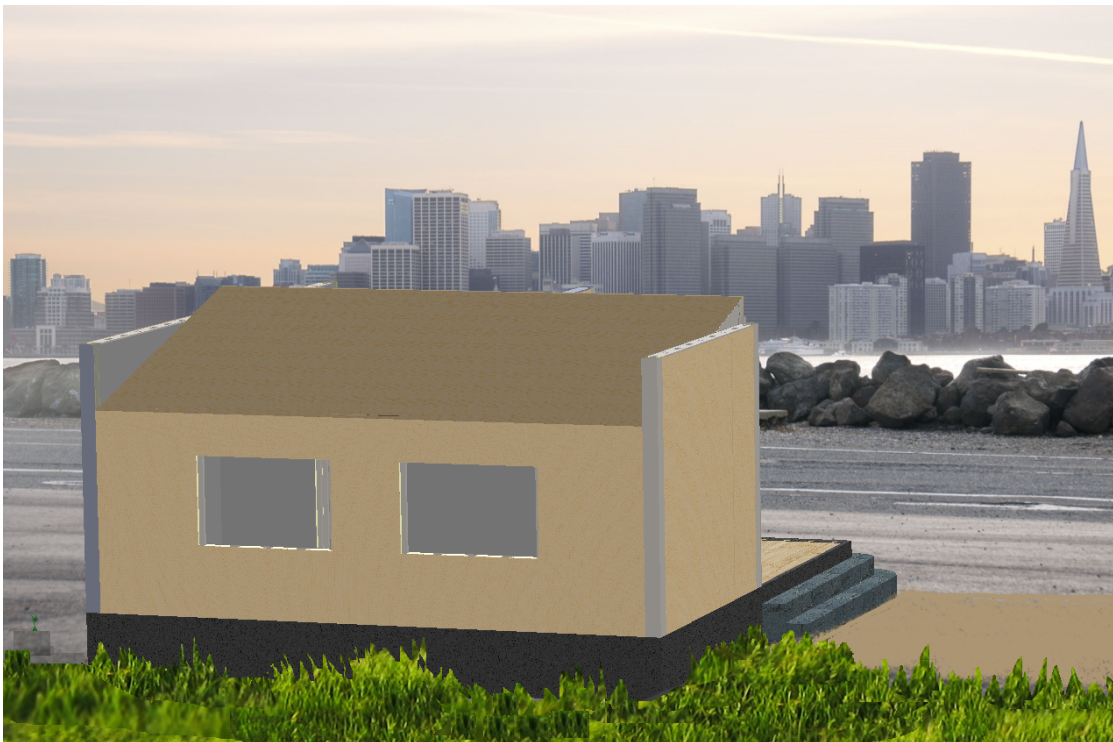


Figura 5.25: *Renders* do produto final, numa configuração com dois módulos - 3



## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalhos futuros

### 6.1 Conclusões

O desenvolvimento das casas modulares está em rápido avanço. Os requisitos para a habitação, um pouco como em todas as indústrias e produtos, estão a evoluir no sentido de aumentar a eficiência e flexibilidade, ao mesmo tempo que se diminui o impacto ambiental, quer na produção, quer na utilização e descomissionamento. Assim, de modo a dar resposta ao mercado, é importante que exista um desenvolvimento estruturado e multi-disciplinar que permita a criação de soluções tecnologicamente mais avançadas, criativas e diferenciadoras.

Com estes objetivos em mente, tendo como ponto de partida uma tese que fez um desenvolvimento maioritariamente térmico de uma casa modular, foram definidos os requisitos do cliente, utilizando ferramentas do desenvolvimento do produto que provaram ser mais-valias para o mesmo. Apesar do seu uso não ter sido aprofundado, permitiram fazer uma reflexão acerca do caminho que estava a ser tomado e prevenir problemas antes de estes acontecerem, para além de ajudarem em muito a definição e melhoria do produto.

Foi proposto um conceito inicial e, percebendo a sua fragilidade, avançou-se para outro que trouxe melhorias à morfologia, à produção, ao transporte e montagem, entre outros. Dentro deste conceito, foram sendo feitas várias iterações a cada componente e sistema, até encontrar um que cumpriu com os requisitos definidos, principalmente com a flexibilidade e segurança, que se descobriu serem prioritários para este produto.

A seguir, foi realizada uma validação do conceito, onde se avaliou o desempenho mecânico da estrutura, permitindo inferir se o conceito proposto conseguia funcionar em condições de cargas verticais, usando um valor acima do valor esperado de funcionamento, de modo a garantir a segurança. Os resultados desta validação foram satisfatórios, uma vez que se conseguiu, com uma boa margem, que os componentes estruturais não ultrapassassem o limite de elasticidade, além de uma flecha reduzida, crucial para o conforto dos utilizadores, no caso do chão, e da montagem dos painéis, no caso do teto. Há que ressaltar, no entanto, que estas simulações devem apenas ser usadas para a construção da próxima iteração do projeto, uma vez que não foram estudados os efeitos de cargas laterais (devido ao vento, por exemplo), sismos ou o efeito de cargas cíclicas internas (expansão e contração térmicas) ou externas, nem o efeito da fadiga dos materiais a longo prazo.

Um ponto importante, não abordado neste documento, é o desempenho dos painéis em

termos mecânicos. Apesar da fixação dos mesmos à estrutura ser satisfatória em termos teóricos, a utilização de espuma num elemento que define o volume do próprio produto deve ser melhor abordado, quer em termos produtivos, quer em termos mecânicos. De acordo com a análise DFA, a solução encontrada para a montagem dos painéis do teto e do chão, não é validada neste documento, por impossibilidade de simulação da colagem das metades dos painéis.

Na validação da transportabilidade do produto, fator essencial num produto modular deste tipo, os resultados foram claramente positivos, uma vez que se conseguiu que o produto cumprisse com todos os requisitos iniciais. É, efetivamente, um produto que pode ser, na sua maioria (excluem-se as fundações), pré-fabricado longe do local de construção e montado no mesmo, uma vez que é transportável de uma forma standardizada e sustentável.

Em relação aos custos, não é feita uma avaliação ao preço total da casa pela simples razão de terem sido desenvolvidos vários componentes e que não foram especificados os métodos de produção de todos. Do ponto de vista do utilizador, este preço também irá variar consoante a distância ao ponto de produção, devido ao transporte. Outros fatores, como instalações elétricas e de saneamento básico teriam ainda de ser considerados no custo total para o utilizador, bem como o custo da mão-de-obra local usada na construção das fundações.

Apesar disso, o valor monetário, quer para o produtor, quer para o consumidor, esteve presente em cada passo, uma vez que foi sempre tentado optar por formas que otimizassem a produção, utilizando sempre que possível elementos iguais em locais e funções diferentes, morfologias semelhantes e componentes standardizados. O peso a ser transportado e montado, também foi tido em conta, estando dentro dos limites estabelecidos inicialmente.

Assim, a solução final proposta consiste numa base para um produto inovador, destinado à habitação, com um nível de modularidade suficiente para abranger os requisitos de pequenas e grandes famílias ou, inclusive, acompanhar o crescimento da família, devido à sua flexibilidade pós-construção. Este conceito, apesar de ainda não estar maduro o suficiente para avançar para protótipo, tem pontos fortes que podem ser utilizados nas próximas iterações. Um exemplo é a morfologia dos painéis e o método de montagem da estrutura, que permite que a mesma se dê rapidamente. A própria estrutura, apesar de sólida e resistente, cumpre o requerimento da flexibilidade e consegue, de uma forma consistente, dar resposta às diferentes ideias existentes e àquelas que possam vir a surgir.

A elaboração deste projeto e documento envolveu uma série de áreas do conhecimento da engenharia mecânica que foram necessárias explorar e aprofundar. Para além disto, a criatividade e a abertura a novas ideias estiveram sempre presentes, sendo muitas vezes os fatores que mais impulsionaram o desenvolvimento deste produto, por vezes mais ainda que os *hard skills* adquiridos ao longo do percurso académico. Terminado o desenvolvimento, é com agrado que se vê a conceção da casa modular apresentada neste documento.

Os objetivos propostos foram totalmente atingidos. Partiu-se de um conceito que foi em grande parte analisado termicamente e propôs-se um novo conceito que fez o projeto ganhar outro tipo de consistência e permitirá, caso continue, uma evolução do mesmo. Quem analisar as soluções aqui propostas para avançar com a próxima iteração, terá uma base sólida para o fazer, pegando nos pontos fortes desta dissertação e melhorando os menos bons.

## 6.2 Trabalhos futuros

A partir das conclusões retiradas neste documento, podem ser definidos os próximos passos para este projeto, que é verdadeiramente multi-disciplinar e que, até atingir maturidade suficiente para avançar para protótipo, pode originar vários temas de dissertação.

Começando por onde este trabalho começou, a partir da análise térmica, é sugerida uma nova análise deste tipo em que se utilizem os componentes e soluções aqui desenvolvidos de modo a, por um lado validar o conceito desenvolvido e, por outro, sugerir alterações que melhorem as características térmicas do mesmo. Pode ser aproveitado o facto de serem possíveis múltiplas configurações para se definir um conjunto predefinido de plantas e aberturas nas paredes, com base nos requisitos térmicos.

É possível também estudar os processos produtivos e de montagem dos elementos aqui criados, de modo a fazer uma otimização dos mesmos, realizando um DFA e DFM mais aprofundados. Para além disso, sugere-se um desenvolvimento em detalhe dos meios de fixação dos elementos.

Em termos de análise estrutural, é proposto um estudo das normas e regulamentos em vigor, portuguesas e europeias, fazendo as alterações necessárias para que o produto cumpra com as mesmas com um maior rigor e que permita a comercialização do produto. Neste ponto, podem ser abordados vários tópicos como a análise estrutural, estática e dinâmica, dos diferentes componentes, com especial ênfase nos painéis, que não foram abordados neste documento.

Por fim, depois de reunidas as condições necessárias, é proposta a construção de um protótipo, à escala, que permita validar o conceito.



# Referências

- [1] KITUR. Produtos & Preços [Online] [Consultado em 13 de Mar. de 2017];. Available from: <http://www.kitur.pt/0/pt/areas/>.
- [2] Decreto-Lei nº 38 382 de 7 de Agosto de 1951, [Online]. Portugal. [Consultado em 27 Mar. 2017]; 2001. Available from: <http://www.oasrn.org/upload/apoio/legislacao/pdf/rgeu2.pdf>.
- [3] International Organization for Standardization. ISO 668 - Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings [Consultado em 20 Abr 2017]. Reference number ISO. 2013;668(668). Available from: <https://www.iso.org/standard/59673.html>.
- [4] Bergdoll B, Christensen P, Broadhurst R, Y N. Home delivery : fabricating the modern dwelling. Museum of Modern Art; 2008.
- [5] Charlie Lazor. FlatPak House [Online]. USA [Consultado em 15 Abr. 2017];. Available from: <http://www.prefabs.com/PrefabHomes/Flatpak/FlatPakHouse.htm>.
- [6] KITUR. Catálogo KITUR [Online] Portugal [Consultado em 1 Abr. 2017]; 2015. Available from: <http://www.kitur.pt/u-docs/1463648394.pdf>.
- [7] John Terninko. Step-by-Step QFD: Customer-Driven Product Design. 2nd ed. St Lucie Press, editor. Boca Raton, Florida; 1997.
- [8] Varela M. A casa modular vista na perspetiva do engenheiro mecânico [Dissertação], [Aveiro]: Universidade de Aveiro; 2015.
- [9] Van Loenen B, Mroczkowski M. QFD for the building and construction industry. International Journal of Design Sciences and Technology. 2010;17(2):91–105.
- [10] Eggen O. Modular product development. 2002;p. 1–12. Available from: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.196.7434&rep=rep1&type=pdf>.
- [11] Steinhardt DA, Manley K, Miller W. Profiling the nature and context of the Australian prefabricated housing industry [Online]. Austrália: Queensland University of Technology; [Consultado em 15 de Abr. 2017]; 2013. Available from: <http://eprints.qut.edu.au/81176/1/nature-and-context-australian-prefabricated-housing.pdf>.

- [12] Jaillon L, Poon CS. The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong: A review of the public and the private sector. *Automation in Construction* [Consultado em 23 de Abr de 2017]. 2009;18(3):239–248. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2008.09.002>.
- [13] Sparksman G, Groak S, Gibb A, Neale R. Standardisation and pre-assembly: Adding value to construction projects. CIRIA, editor. *Construction Industry Research and Information Association*; 1999.
- [14] Davis C. *Prefabricated Home*. London: Reaktion Books; 2005.
- [15] Gianino A. *The modular home*. USA: Storey Pub; 2005.
- [16] Arieff A. How to Play FlatPak [Online] USA [Consultado em 02 de Abr. 2017 ]. Dwell. 2009; Available from: <https://www.dwell.com/article/how-to-play-flatpak-dd73f653>.
- [17] FlatPak. FlatPak [Online] USA [Consultado em 20 Fev. 2017];. Available from: <http://flatpakhouse.com/>.
- [18] Diário da República Eletrónico. Decreto-Lei n.º 132/2017 : Diário da República n.º 196/2017, Série I de 2017-10-11 - DRE [Online] Portugal [Consultado em 30 de Abr. 2017]; 2015. Available from: <http://data.dre.pt/eli/dec-lei/132/2017/10/11/p/dre/pt/html>.
- [19] Schmitz Cargobull. S.CF Container Chassis [Online] Horstmar [Consultado em 5 Mai. 2017];. Available from: [https://www.cargobull.com/files/com/filemanager/\\_files/Neufahrzeuge/Wechselfahrgestelle/SCF-Broschuere-PC-GB.pdf](https://www.cargobull.com/files/com/filemanager/_files/Neufahrzeuge/Wechselfahrgestelle/SCF-Broschuere-PC-GB.pdf).
- [20] Hauser JR. How Puritan-Bennett used the house of quality. *Sloan Management Review* [Online] 1993 [Consultado em 12 Abr 2017];34(3):61–70. Available from: [http://web.mit.edu/~hauser/www/Papers/How{}\\_Puritan-Bennett.pdf](http://web.mit.edu/~hauser/www/Papers/How{}_Puritan-Bennett.pdf).
- [21] Kamara JM, Anumba CJ, Evbuomwan NFO. Client requirements processing in construction: a new approach using QFD. *Journal of Architectural Engineering*. 1999;5(1):8–15.
- [22] Pahl GG, Wallace K, Blessing L. *Engineering design : a systematic approach*. 3rd ed. Darmstadt, Germany: Springer; 2007.

## Apêndice A

### Lista de componentes

Tabela A.1: Lista de componentes

Tipo	Designação	Localização	Qtde	Peso un. [kg]	Dimensões [mm] (se normalizado)
Pilares	Compridos	Parede Longitudinal	14	52,9	120×60×3989
		Parede Transversal	9	52,9	120×60×3989
	Curtos	Parede Longitudinal	12	36,7	120×60×2767
		Canto	Cantos	4	34,3
	PUR-Canto	Cantos	4	3,1	-
	Supra-comprido	Aberturas, topo	2	20,3	120×60×1500
	supra-curto	Aberturas, topo	6	4,1	120×60×310
	Infra	Aberturas, base	6	15,3	120×60×1152
Vigas	C - 120×60	Chão	17	55,0	120×60×4146
	P - 60×60	Porta	2	7,6	60×60×880
	J - 60×60	Janela	2	16,1	60×60×1880
	T - 120×60	Teto	15	60,1	120×60×4530
	T - 60×60	Teto, extremidades	2	38,9	60×60×4530
	L - 120×60	Longitudinais	4	53,9	120×60×4065
Encaixes	Inferiores	Ligação viga-pilar inferior	34	4,2	-
	Superiores 120×60	Ligação viga-pilar superior	30	4,7	-
	Superiores 60×60	Ligação viga-pilar superior, extremidades	4	2,7	-
Tampas	Tipo 1	Ligação parede-teto, inferior,externa	16	5,2	-
	Tipo 2	Ligação parede-teto, inferior, interna	16	2,8	-
	Tipo 3	Ligação parede-teto, superior, externa	16	6,5	-
	Tipo 4	Ligação parede-teto, superior, interna	16	2,1	-
	Retangulares	Parede transversal, topo	12	2,1	-
	Triangulares	Parede transversal, Ligação com parede longitudinal	2	8,3	-
	Cantos	PUR-Canto	8		-
	Painéis	Chão 500×500	Chão - M1	128	10,8
Chão - M2			128		
Teto 500×500		Teto - M1	128	10,8	500×500×219
		Teto - M2	128		
Teto 500×250		Teto - M1	16	5,4	500×250×219
		Teto - M2	16		
Parede 500×500		Parede transversal	112	10,8	500×500×219
		Parede longitudinal baixa	56	10,8	500×500×219
		Parede longitudinal alta	92	10,8	500×500×219
Parede 500×250		Parede transversal	16	5,4	500×250×219
		Parede longitudinal baixa	4	5,4	500×250×219
		Parede longitudinal alta	20	5,4	500×250×219



## Apêndice B

# Lista de componentes no contentor

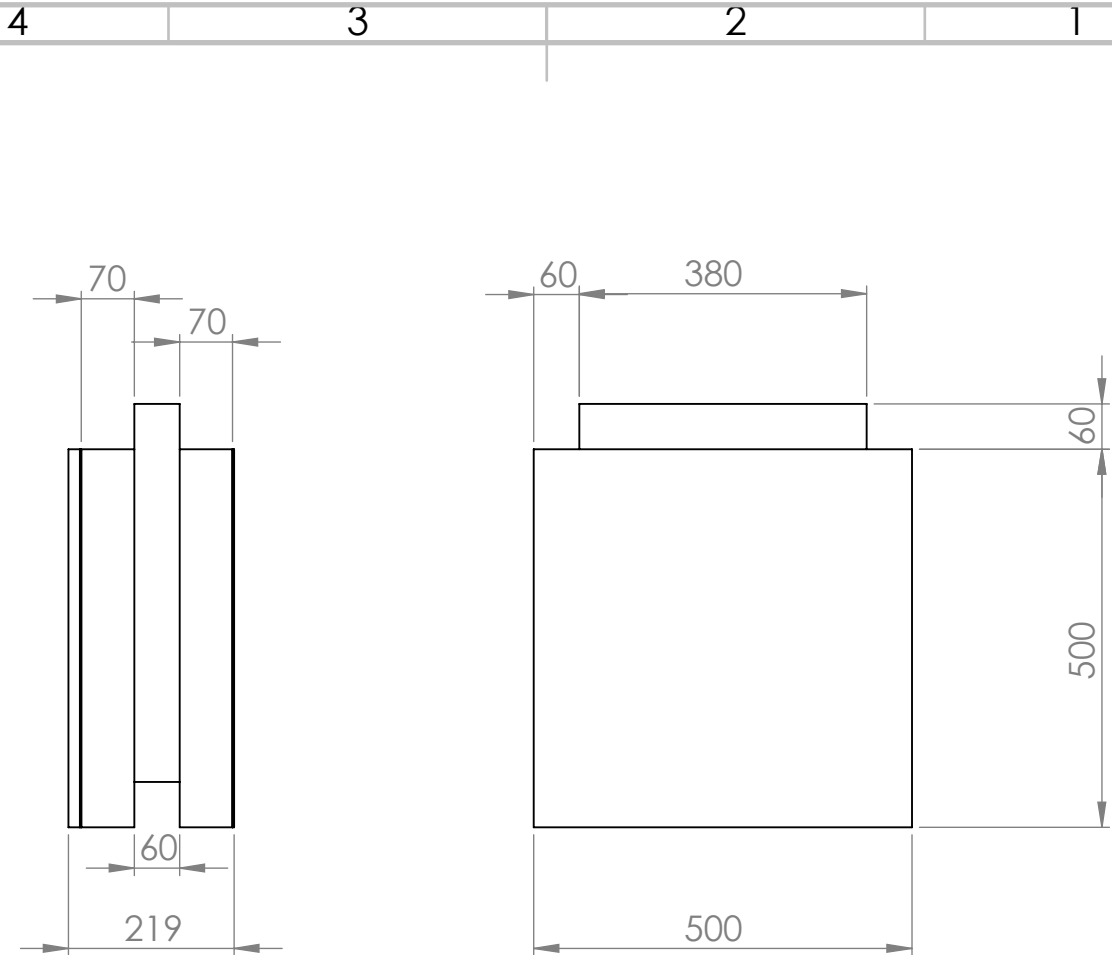
Tabela B.1: Lista de componentes no contentor

<b>Tipo</b>	<b>Designação</b>	<b>Qtde</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>Dimensões [mm]</b>	<b>Peso total [kg]</b>
Pilares	Compridos	25	52,9	120×60×3989	1322,5
	Supra-comprido	2	20,3	120×60×1500	40,6
	supra-curto	6	4,1	120×60×310	24,6
	PUR-Canto	6	3,1	198×198×3989	18,6
	Infra	6	15,3	120×60×1152	91,8
Vigas	C - 120×60	4	55,0	120×60×4146	220
	T - 120×60	15	60,1	120×60×4530	901,5
Painéis	Chão 500×500	128	10,8	500×500×219	1382,4
	Teto 500×500	128	10,8	500×500×219	1382,4
	Parede 500×500	132	10,8	500×500×219	1425,6
Total:					6810



## Apêndice C

# Desenhos técnicos



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:

MATERIAL:

WEIGHT:

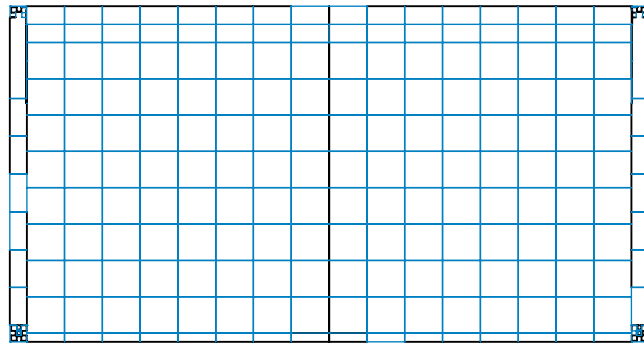
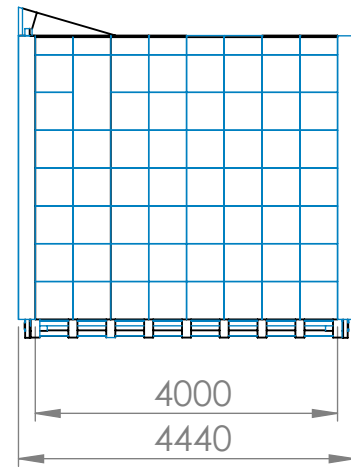
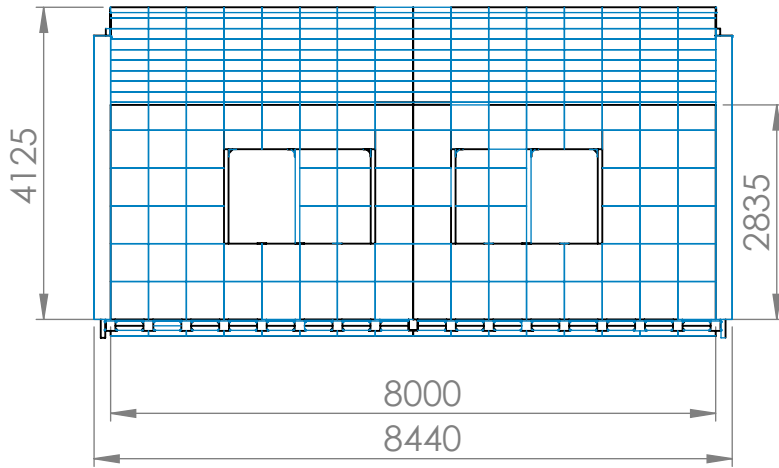
DWG NO.

**Painel Básico**

A4

SCALE:1:10

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APPV'D				
MFG				
Q.A				

TITLE:

MATERIAL:

WEIGHT:

DWG NO. **Módulo [8x4] [m]** A4

SCALE: 1:200

SHEET 1 OF 1