



**Luís Miguel Neves  
Gonçalves**

**Desenvolvimento estrutural de um componente  
habitável de construção modular**





**Luís Miguel Neves  
Gonçalves**

**Desenvolvimento estrutural de um componente  
habitável de construção 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 Ramos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Este trabalho teve o apoio financeiro dos projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020 - FCT - Fundação para Ciência e Tecnologia; e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), no âmbito do Acordo de Parceria Portugal 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.



## **O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor João Marciano Laredo dos Reis**

Professor Auxiliar C/ Agregação em Regime Laboral da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

**Prof. Doutor Pedro Miguel Soares Ferreira**

Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra



## **Agradecimentos / Acknowledgements**

Aproveito este espaço para agradecer o apoio, tutoria e toda a disponibilidade do orientador e co-orientador, Prof. Carlos Relvas e Prof. António Ramos, ao longo de todo este trabalho. Em seguida aproveito para agradecer à minha família e amigos pelo apoio incondicional.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos:

UID/EMS/00481/2019-FCT - FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional;

PT2020 - SI I & DT - I & D em Co-Promoção, N.º 33325 - BrickITsmart, cofinanciado por Compete 2020, Portugal 2020 e União Europeia, Fundos Europeus Estruturais e de Investimento.





**Palavras-chave**

Habitação; Modularidade; Ambiente; Reutilização; Economia circular

**Resumo**

Este trabalho surge do crescente desenvolvimento na construção habitacional do corrente século aliada à consciência ecológica nos produtos, onde impera a criação de soluções de habitação orientadas para a sua fácil e rápida implementação e que consigam dar respostas ambientalmente positiva. Assim, este trabalho focou-se na conceção de um módulo habitacional de interiores onde o elemento estrutural é obtido através do aproveitamento e acondicionamento de pás eólicas retiradas de geradores em final de vida, tentando desta forma encontrar novos propósitos para as mesmas. O documento inicia-se com uma revisão bibliográfica de conceitos inerentes à construção habitacional modular e de economia circular, bem como de produtos e projetos envolvidos nas mesmas temáticas, na perspetiva de recolher informação acerca das necessidades e ofertas de mercado. O desenvolvimento da solução apresentada iniciou-se com a identificação da respetiva legislação e regulamentação aplicável através de metodologias usuais no desenvolvimento de produto, abrindo portas para a elaboração de um conceito. Este passou pela definição do módulo idealizado bem como os restantes elementos de coesão, tendo igualmente sido realizada a respetiva validação do comportamento estrutural do módulo e efetuada a análise do modo de potenciais falhas do produto. Numa etapa final procedeu-se ao projeto de detalhe da solução desenvolvida, tendo sido selecionados os materiais e processos de fabrico adequados à concretização do projeto. O resultado final deste trabalho apresenta uma solução potencialmente viável em termos de proposta para a construção modular de um módulo habitacional de interiores com recurso à reutilização de materiais.



**Keywords**

Housing; Modularity; Environment; Reuse; Circular economy

**Abstract**

This work arises from the growing development in housing construction of the current century combined with an ecological awareness in products, where the creation of housing solutions oriented towards their easy and quick implementation and which manage to give environmentally positive responses reigns. Thus, this work focused on the design of an interior housing module where the structural element is obtained through the use and reconditioning of wind blades removed from generators at the end of life, thus trying to find new purposes for them. The document begins with a bibliographic review of concepts inherent to modular housing construction and circular economy, as well as products and projects involved in the same themes, with a view to collecting information about market needs and offers. The development of the presented solution started with the identification of the respective applicable legislation and regulation, having proceeded with the 'collection of the consumer's voice', through usual methodologies in product development, opening doors for the elaboration of a concept. This went through the definition of the idealized module as well as the other elements of cohesion, having also carried out the respective validation of the structural behavior of the module and carried out the analysis of the mode of potential product failures. In a final step, the detailed design of the developed solution was proceeded, having been selected the materials and manufacturing processes appropriate to the realization of the project. The final result of this work presents a potentially viable solution in terms of a proposal for the modular construction of an interior housing module using the reuse of materials.



# Índice

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Contexto . . . . .   | 1         |
| 1.2      | Objetivos . . . . .  | 2         |
| 1.3      | Organização do documento . . . . .                               | 2         |
| <b>2</b> | <b>Revisão do estado de arte</b>                                 | <b>3</b>  |
| 2.1      | Revisão bibliográfica . . . . .                                  | 3         |
| 2.1.1    | Contextualização histórica . . . . .                             | 3         |
| 2.1.2    | Conceitos gerais da modularidade . . . . .                       | 6         |
| 2.1.3    | Sistemas de montagem e aperto . . . . .                          | 9         |
| 2.1.4    | Sistemas de isolamento . . . . .                                 | 10        |
| 2.2      | Atualidade da construção modular . . . . .                       | 11        |
| 2.2.1    | Construção modular versus Construção tradicional . . . . .       | 11        |
| 2.2.2    | Novas aplicações na área da construção modular . . . . .         | 12        |
| 2.3      | Economia circular na construção modular . . . . .                | 15        |
| 2.3.1    | O modelo linear e as suas falhas . . . . .                       | 15        |
| 2.3.2    | O modelo circular . . . . .                                      | 16        |
| 2.4      | Novas possibilidades e materiais na construção modular . . . . . | 18        |
| 2.4.1    | Ciclo de vida das pás eólicas . . . . .                          | 18        |
| 2.4.2    | Crescimento dos parques eólicos . . . . .                        | 18        |
| 2.4.3    | Novas aplicações para as pás eólicas . . . . .                   | 19        |
| 2.5      | Contributo do estudo . . . . .                                   | 21        |
| <b>3</b> | <b>Projeto de conceito</b>                                       | <b>23</b> |
| 3.1      | Metodologia adotada . . . . .                                    | 23        |
| 3.2      | Normalização europeia . . . . .                                  | 24        |
| 3.2.1    | Revisão de normas europeias de habitabilidade . . . . .          | 24        |
| 3.2.2    | Revisão de normas europeias de conforto . . . . .                | 24        |
| 3.2.3    | Revisão de normas europeias de segurança . . . . .               | 24        |
| 3.3      | Especificações do projeto . . . . .                              | 25        |
| 3.3.1    | Pesquisa do mercado . . . . .                                    | 25        |
| 3.3.2    | QFD . . . . .  | 25        |
| 3.4      | Proposta inicial . . . . .                                       | 28        |
| 3.4.1    | Análise das pás das eólicas . . . . .                            | 29        |
| 3.4.2    | Estudo do módulo . . . . .                                       | 29        |
| 3.5      | Estudo e seleção do conceito . . . . .                           | 31        |
| 3.5.1    | Conceito proposto . . . . .                                      | 31        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.5.2    | FMEA do conceito . . . . .                                 | 34        |
| <b>4</b> | <b>Projeto de concretização</b>                            | <b>35</b> |
| 4.1      | Arquitetura do produto e design de sistemas . . . . .      | 35        |
| 4.1.1    | <i>Design for Assembly</i> . . . . .                       | 35        |
| 4.2      | Validação do conceito . . . . .                            | 43        |
| 4.2.1    | Análise estrutural do conceito . . . . .                   | 43        |
| 4.3      | FMEA de projeto . . . . .                                  | 51        |
| <b>5</b> | <b>Projeto de Detalhe</b>                                  | <b>53</b> |
| 5.1      | Seleção do conceito final . . . . .                        | 53        |
| 5.2      | Escolha das topologias e materiais constituintes . . . . . | 58        |
| 5.2.1    | Outros elementos . . . . .                                 | 61        |
| 5.3      | Definição dos processos de fabrico envolvidos . . . . .    | 62        |
| 5.4      | Renderização do conceito finalizado . . . . .              | 63        |
| <b>6</b> | <b>Conclusões e trabalhos futuros</b>                      | <b>67</b> |
| 6.1      | Conclusões . . . . .                                       | 67        |
| 6.2      | Trabalhos futuros . . . . .                                | 68        |
| <b>A</b> | <b>Lista de Componentes</b>                                | <b>75</b> |
| <b>B</b> | <b>Análise do QFD</b>                                      | <b>79</b> |
| <b>C</b> | <b>Desenhos técnicos</b>                                   | <b>83</b> |

# Lista de Tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.1 | Categorização da norma EN 13501-1 . . . . .  | 25 |
| 3.2 | Requisitos do produto . . . . .  | 26 |
| 3.3 | Materiais utilizados na composição da pá SNL-100-00, e as suas especificações. . . . . | 30 |
| 3.4 | Propriedades dos materiais adicionais. . . . .   | 30 |
| 3.5 | FMEA do conceito. . . . .  | 34 |
|     |  |    |
| 4.1 | Parametrização técnica envolvida na análise estrutural . . . . .                       | 44 |
| 4.2 | Valores obtidos da análise estrutural, referente aos módulos. . . . .                  | 48 |
| 4.3 | Resultados da análise estrutural dos elementos ligantes. . . . .                       | 51 |
| 4.4 | FMEA de projeto. . . . .   | 52 |





# Lista de Figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Evolução populacional, por [3]   | 4  |
| 2.2  | Alastramento populacional em Lisboa, por [6]   | 5  |
| 2.3  | Alastramento populacional em Los Angeles, final do século XX   | 5  |
| 2.4  | Respetivamente, pedra chave dos arcos romanos (a) e casa pré-fabricada do século XIX (b), por [12]         | 6  |
| 2.5  | Nissen Hut, visto do exterior (a) e do interior (b), por [1]   | 7  |
| 2.6  | Ganhos de tempo, em comparação entre os sistemas de construção, por [15]                                   | 7  |
| 2.7  | Maison <i>Dom-ino</i> , de <i>Le Corbusier</i> , por [14]  | 8  |
| 2.8  | Exemplo de uma construção convencional   | 10 |
| 2.9  | Ponte de da Vinci, das primeiras estruturas auto-portantes   | 10 |
| 2.10 | <i>Z-box</i> , vista do exterior e do interior   | 12 |
| 2.11 | Representação do sistema <i>EverPanel</i> , da empresa <i>EverBlock</i>                                    | 12 |
| 2.12 | <i>WallForms</i> , detalhe das ligações  | 13 |
| 2.13 | Elemento construtivo <i>Fibs Building System</i>   | 13 |
| 2.14 | <i>Fibs Modular Systems</i> , na criação de divisórias   | 14 |
| 2.15 | <i>Fibs Modular Systems</i> , no revestimento de divisórias  | 14 |
| 2.16 | <i>WallForms</i> , detalhe das ligações  | 14 |
| 2.17 | Representação do sistema <i>SlimWall</i> , da empresa <i>ModularWalls</i>                                  | 14 |
| 2.18 | Economia linear <i>versus</i> Economia circular, por [33]  | 15 |
| 2.19 | Despejo de resíduos industriais  | 16 |
| 2.20 | Enquadramento dos 9 R's, por [? ]  | 17 |
| 2.21 | Expansão dos parques eólicos, por [44]   | 19 |
| 2.22 | Metas de produção energética, por [44]   | 19 |
| 2.23 | Sistema Root Foundation  | 20 |
| 2.24 | Sistema Door/Window  | 20 |
| 2.25 | Sistema Roof Frames da parte lateral da pá   | 21 |
| 2.26 | Sistema Roof Frames da parte de ataque da pá   | 21 |
| 3.1  | As quatro Matrizes da Qualidade, por [53]  | 26 |
| 3.2  | Priorização dos requisitos do cliente  | 27 |
| 3.3  | Priorização das especificações técnicas do produto   | 27 |
| 3.4  | Priorização dos componentes  | 28 |
| 3.5  | Representação de um segmento de pá eólica  | 28 |
| 3.6  | Esquema do perfil de uma pá eólica, presente em [54]   | 29 |
| 3.7  | Gráfico exemplo da curva Tensão-Deformação da fibra de vidro, onde $Vf$ é a percentagem de fibra, por [57] | 30 |
| 3.8  | Esboço da chapa ligante  | 31 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.9  | Sistema de ligação inter-placas, visto de frente e em vista lateral de corte.  | 31 |
| 3.10 | Esquema exemplo do empilhamento em altura (a) e respetiva solução para entrada (b).  | 32 |
| 3.11 | Ligação das chapas de canto, com as respetivas peças representadas.  | 32 |
| 3.12 | Ligação entre paredes perpendiculares (a) e com o teto (b).  | 32 |
| 3.13 | Conceito das janelas.  | 33 |
| 3.14 | Conceito da porta.   | 33 |
| 4.1  | Representação da porca de bucha e do casquilho-bucha, respetivamente.  | 36 |
| 4.2  | Representação das chapas ligadas, através das ligações roscadas.   | 36 |
| 4.3  | Representação dos módulos ligados, através das chapas.   | 36 |
| 4.5  | Representação da montagem do chão.   | 37 |
| 4.10 | Montagem das paredes.  | 39 |
| 4.12 | Representação da montagem do teto.   | 40 |
| 4.16 | Montagem das janelas.  | 42 |
| 4.20 | Montagem da porta.   | 43 |
| 4.21 | Análise da representação do chão, com as tensões e os deslocamentos representadas.   | 45 |
| 4.22 | Análise da representação da 1/6 de parede suscetível ao próprio peso e ao peso do teto, com as tensões e os deslocamentos representados. | 46 |
| 4.23 | Análise da representação da parede com entrada, com as tensões e os deslocamentos representados.   | 46 |
| 4.24 | Análise da representação da parede com janela, com as tensões e os deslocamentos representados.  | 47 |
| 4.25 | Análise da representação do teto, com as tensões e os deslocamentos representados.   | 47 |
| 4.26 | Análise da representação do conjunto referente ao chão, com as tensões e os deslocamentos representados.                                 | 49 |
| 4.27 | Análise da representação do conjunto referente à parede, com as tensões e os deslocamentos representados.                                | 49 |
| 4.28 | Análise da representação do conjunto referente à parede com porta, com as tensões e os deslocamentos representados.                      | 50 |
| 4.29 | Análise da representação do conjunto referente à parede com janela, com as tensões e os deslocamentos representados.                     | 50 |
| 4.30 | Análise da representação do conjunto referente ao teto, com as tensões e os deslocamentos representados.                                 | 50 |
| 5.1  | Novos elementos roscados.  | 54 |
| 5.2  | Representação das chapas ligadas com os novos elementos roscados.  | 54 |
| 5.5  | Montagem do candeeiro.   | 55 |
| 5.7  | Montagem da janela, com a nova calha.  | 56 |
| 5.9  | Representação dos elementos de vedação exterior.   | 57 |
| 5.11 | Montagem dos elementos de vedação exterior.  | 57 |
| 5.12 | Representação do elemento de cobertura do chão.  | 58 |
| 5.13 | Tipos de chapas constituintes.   | 58 |
| 5.14 | Casquilhos constituintes.  | 59 |
| 5.16 | Calhas constituintes.  | 59 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.17 | Janela simples e perfurada, respetivamente. . . . .                  | 60 |
| 5.19 | Conjunto porta. . . . .  | 60 |
| 5.20 | Elementos roscados constituintes. . . . .                            | 61 |
| 5.21 | Pinos constituintes. . . . .   | 61 |
| 5.22 | Respetivamente puxador, cobertura do chão, caixilho e vidro. . . . . | 61 |
| 5.23 | Diferentes cores associadas aos módulos. . . . .                     | 66 |
| B.1  | Matriz da Qualidade. . . . .   | 80 |
| B.2  | Matriz do Produto. . . . .   | 81 |





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contexto

O desenvolvimento e aplicação de elementos de cariz modular tem sofrido um crescente interesse por parte dos mercados como forma de responder a problemas provenientes do atual paradigma de construção. Atualmente a construção de habitações assenta numa edificação, quer da envolvente quer das divisões, que se limita pelas condicionantes que o terreno impõe bem como na personalização por parte do cliente. Estas limitações tornam as construções como sendo de cariz único pelo que não conseguem responder com sucesso mediante prazos de construção e de investimento limitantes.

A ideia de standardização de elementos que serão posteriormente introduzidos no conjunto final completando o todo já é relativamente antiga. Veja-se o caso de sucesso que foi criação de linhas de montagem de automóveis recorrendo a elementos pré-definidos, levando a altas cadências de produção e posteriormente satisfação das necessidades do mercado. Isto pressupõe que os elementos sejam produzidos em chão de fábrica, sob normalização das configurações adotadas, e posteriormente levados para o local final, já como um só.

A utilização destes elementos modulares na edificação ainda é visto com alguma reticência por parte do consumidor. Assim é pois parte de princípio com o pensamento na construção tradicional sob a qual descredibilizam a uniformidade presente no pensamento modular. Por muitas vezes não possuem o entendimento das ferramentas e métodos do Desenvolvimento do Produto, que neste caso visa atribuir liberdade construtiva sem sacrificar o conforto e a segurança, ou por nem sequer terem o conhecimento necessário para atribuir vantagens ao uso modular. É uma realidade que está a entrar numa fase de mudança pois surge uma sensibilidade para com a salvaguarda dos recursos disponíveis e uma especial atenção à reciclagem de materiais usados, pelo que se começa a ter um cuidado adicional quanto à incorporação de ideologias ditas "verdes" no paradigma da construção de edificações. É neste ramo onde se deverá focalizar o pensamento modular, onde a taxa de sucesso na implementação de produtos em fim de vida bem como reciclados poderá ser maximizada oferecendo soluções que a construção convencional não consegue.

Este projeto inicia todo um estudo para o posterior objetivo de validar uma solução que permita a elaboração de uma divisória interna para habitação temporária, tendo este documento especial foco de estudo na conceção de elementos de construção modular para o efeito.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de um compartimento habitável, de construção modular, cuja montagem e instalação seja efetuada no interior de uma construção mãe (conceito de *furnitecture*). Em segundo plano mas não menos importante, pretendeu-se que na composição deste compartimento fossem incluídos materiais reutilizados, provenientes de outras aplicações, e pela sua incorporação no compartimento habitacional. Foi igualmente definido que todo o conjunto fosse passível de ser adquirido e posteriormente montado pelo utilizador, sem ser necessário recorrer a terceiros para o efeito.

Todo o projeto focou-se no desenvolvimento de diversas propostas de elementos estruturais que consigam assegurar a funcionalidade de todo o conjunto passando pela validação da solução.

## 1.3 Organização do documento

Esta dissertação apresenta-se dividida em seis capítulos principais e anexos. Segue uma organização comum aos documentos usados nesta área sendo que é de todo o interesse, pois facilita toda uma análise do processo de idealização do mesmo bem como das respetivas decisões tomadas.

O primeiro verdadeiro capítulo desta dissertação é dado como o segundo, sendo que o primeiro é de caráter introdutório. É explorado o contexto histórico que levou ao desenvolvimento e aplicação de filosofias de construção modular e apresentados os denominadores gerais associados a esta, bem como outros adjacentes. De seguida são abordados conceitos modulares de construção interna, já produzidos, com o intuito de extrair os requisitos associados a este tipo de construção. Numa fase final é explorada a ideologia associada à economia circular, os seus argumentos e direções na vertente da construção modular. Aqui encontra-se a vocação da elaboração deste documento.

No terceiro capítulo é iniciado o desenvolvimento do produto através de esboços do conceito a idealizar, vedados pela legislação associada. São definidos os requisitos para o sucesso do conceito, através de ferramentas inerentes ao desenvolvimento do produto.

No capítulo 4 surge o projeto de concretização onde aborda a arquitetura do produto. Neste capítulo são definidas as formas dos componentes previstos na composição do produto com a posterior validação estrutural mínima dos mesmos. Mediante esta última torna-se possível estabelecer um limite topológico mínimo para as disposições, sendo que é procedida a definição dos elementos para composição do produto. Mais uma vez dá-se uma reavaliação do projeto onde visa o destaque de incongruências despercebidas aquando a elaboração do conceito.

No quinto e penúltimo capítulo surge a seleção do conceito final que responderá ao projeto. Mediante uma análise das ferramentas implementadas no projeto procede-se à adoção da disposição final do mesmo, selecionando as topologias, materiais constituintes e processos de fabrico dos elementos escolhidos para incorporação do produto final.

No sexto capítulo são retiradas conclusões acerca do produto e dos processos utilizados, através de uma análise crítica aos mesmos onde se indicam os pontos fortes e fracos. São sugeridos tópicos que foram respondidos de maneira inferior trilhando caminho para a continuidade do projeto.

## Capítulo 2

# Revisão do estado de arte

### 2.1 Revisão bibliográfica

Este novo século representa o apogeu de um século passado, tendo este sido caracterizado pelo salto tecnológico e científico que moldou toda uma sociedade a nível global. A constante inovação permitiu que o ser humano outrora condicionado por fatores externos à sua existência, como controlo de saúde e de meios de alimentação, conseguisse adaptar a natureza para seu proveito. Isto manifestou-se na adequação dos fenómenos e existentes naturais para a promoção de conforto e conseqüente melhoria de qualidade de vida.

#### 2.1.1 Contextualização histórica

##### População versus crescimento Económico

Ao longo da história da Humanidade, períodos de abundância trazem problemas inerentes. Com o aumento do bem-estar pessoal e social é natural que o número populacional sofra um aumento. Esta temática já tinha sido estudado por Thomas Malthus, no final do século XVIII [2]. Neste estudo, Malthus defende que a falta de mão-de-obra para uma determinada função leva a que a sua execução seja mais dispendiosa para o cliente. De forma direta, leva a que o grupo desses executantes sofra um aumento da rentabilidade do trabalho com o conseqüente aumento de capital. Naturalmente, e mediante a previsão de prosperidade contínua, a população irá aumentar. Entra então a revolução industrial e com isso o aumento exponencial de postos de trabalho, do êxodo rural com destino às cidades, da rentabilização da mão-de-obra associada e posterior crescimento demográfico. Segundo Malthus, se a produção de alimentos não conseguir acompanhar o crescimento demográfico os salários decrescem, diminuindo as posses populacionais com o inevitável decréscimo populacional. Tal tem acontecido no decorrer da história sendo que o crescimento populacional não passava de flutuações que rapidamente eram revertidas.

Como outrora nunca houve tamanha melhoria nas condições de vida do ser humano, e devido ao desenvolvimento dos serviços de saúde e na exploração em massa de produtos alimentares, esta é uma era caracterizada pela explosão demográfica mundial. Em 1960, a população mundial situava-se nos 3 mil milhões de habitantes. Em 1974, 14 anos depois, encontrava-se em 4 mil milhões. Em 1987, 5 mil milhões, 6 mil milhões em 1999 e 7 mil milhões em 2011. Prevê-se que, em 2025, a população mundial alcançará os 8 mil milhões e os 9 mil milhões em 2045 [3].



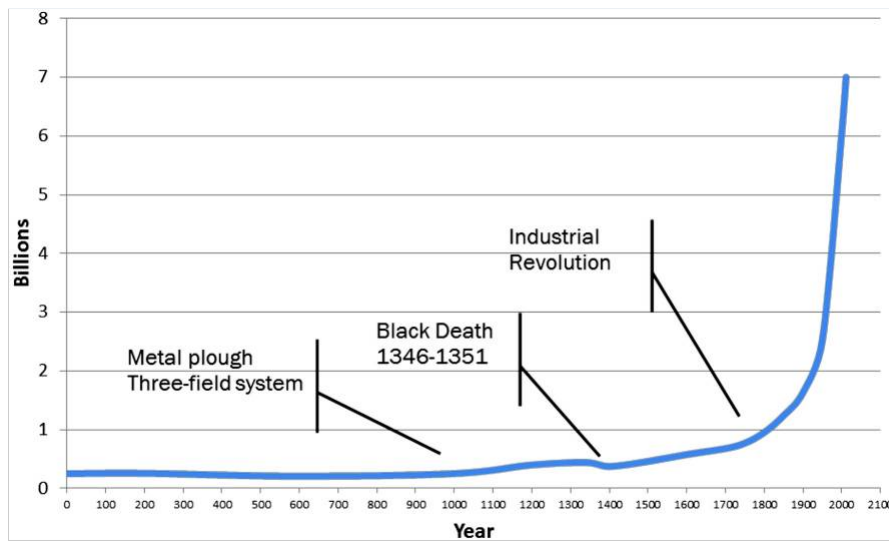


Figura 2.1: Evolução populacional, por [3]

## Habitação no séc. XX

Segundo Wallerstein [4] houve 3 ciclos no mundo moderno, aos quais chama de "estados hegemônicos", onde se verificaram mudanças radicais no sistema do mundo contemporâneo. Estes ciclos de superpotências foram o ciclo Holandês (séc. XVII), o ciclo Britânico (séc. XVIII e XIX) e o ciclo Americano (séc. XX). Estes acontecimentos são caracterizados por levarem a coligações internacionais para derrotar ameaças militares de grande escala (Guerra dos 30 anos, Guerras Napoleónicas e Guerras Alemãs, respetivamente) e por serem pontos de extrema importância onde reconfigurações económicas foram tomadas nas reinvenções da economia global (mercantilismo, industrialização e consumo em massa). Jacob's [5] complementa o trabalho de Wallerstein dizendo que as cidades são os motores de expansão económica e isto resulta numa atração de população.

Faria sentido que, mediante os estudos apresentados, a cada ciclo hegemónico houvesse um aumento da concentração populacional nas cidades. E de facto houve. Até meados do século XX, houve um aumento populacional no coração das cidades e ao mesmo tempo começaram a ser criadas zonas habitacionais na periferia das mesmas. Isto pois a evolução tecnológica dos meios de transporte o permitiu e alguns grupos populacionais preferiam residir nas periferias das cidades de forma a habitar em zonas menos movimentadas. Como se pode ver na figura 2.2, e representado a tinta escura, vê-mos Lisboa no século XIX com o seu crescimento associado, a tinta vermelha, até 1911 [6].

Com o rápido crescimento citadino da segunda metade do mesmo século com a continuidade no século XXI, e mediante uma cada vez maior procura de habitação nos centros urbanos, os preços médios por residência dispararam levando a que grupos populacionais economicamente desfavorecidos tivessem de encontrar solução nas periferias das cidades, alastrando assim o raio habitacional. "Se não conseguem pagar para viver na nossa cidade, vão ter de sair!", disse em 1970 Bill Haines, Mayor de Mount Laurel, New Jersey. A este fenómeno deu-se o nome de alastramento urbano [7].



Figura 2.2: Alastramento populacional em Lisboa, por [6].



Figura 2.3: Alastramento populacional em Los Angeles, final do século XX

### Habitação no séc. XXI

O alastramento urbano é interessante do ponto de vista económico pois oferece soluções habitacionais de baixo custo. No entanto a proliferação populacional externa às zonas metropolitanas leva a que se tenha de investir em infraestruturas, muitas das vezes inexistentes. Em adjacência a este problema vem o facto de que estas populações fiquem dependentes do uso de automóveis para locomoção o que se traduz num aumento de emissão de gases com a respetiva degradação do ar e aumento de doenças associadas. Outro fator é a degradação de solo fértil bem como a decadência da qualidade das águas à medida que este desenvolvimento acontece, levando à poluição de rios, lagos e lençóis de água. A reversão e contenção dos efeitos nocivos causados pelo Homem é um dos principais objetivos deste século [8]. A crescente preocupação com a reciclagem e a promoção de uma economia circular de bens é um progresso que visa a atingir essa meta, mas só não chega. A construção de novas urbanizações representa uma perda de 1,5 milhões de hectares de terreno por ano e a extração de materiais de construção convencional consegue um acréscimo adicional de 20% à perda total [9]. Cerca de 40% dos recursos usados no continente europeu, quer materiais como energia, são aplicados na indústria

da construção [10] onde se prevê-se que globalmente, para 2050, sejam usados cerca de 120 milhões de toneladas de materiais de construção. Um dos principais compostos utilizados é o cimento Portland, onde o seu uso representa 7% das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera. Traduzido para contextos mais perceptíveis, cada tonelada de cimento requer 4 GJ de energia e liberta 1 tonelada de dióxido de carbono [11]. Tendo em conta os efeitos nocivos da construção convencional e pela sociedade estar cada vez mais elucidada e envolvida em questões de caráter ambiental, têm-se como possível resposta o combate ao alastramento populacional, reutilizando terrenos e infraestrutura já existente e concentrando o desenvolvimento comercial e residencial em localizações centrais às populações ou ao longo de artérias de trânsito de bens [7]. Para isso, é necessário repensar o paradigma de construção com foco num desenvolvimento de soluções de habitação que visam tornar a sua conceção amiga do ambiente, sem que para isso se tornem produtos de elite não acessíveis à população em geral.

### 2.1.2 Conceitos gerais da modularidade

O uso de elementos modulares na construção é uma prática relativamente corrente mas que já perdura há bastantes anos. Desde a antiguidade clássica que diversos elementos padrão de construção têm sido incorporados como isso mesmo, elementos padronizados para o efeito. Este padrão é o módulo. Veja-se, por exemplo, a pedra-chave presente nas construções romanas [2.4]. Esta permitiu a edificação de estruturas monumentais, sendo um dos principais desenvolvimentos tecnológicos desenvolvido pelos romanos e com a consequente vantagem arquitetónica entre os seus homólogos.

Passados séculos de banalização, ou simplesmente de desnecessidade, voltou-se a tomar especial atenção às possíveis vantagens de definir elementos estandardizados para a construção. Já no século XIX sentiu-se a necessidade de pensar numa forma de conseguir construir habitações em países desenvolvidos, que teriam as tecnologias necessárias para o fazer, com o consequente transporte e montagem em zonas remotas ao longo do globo. Londres foi essencial visto que de lá saíam edifícios pré-fabricados, que permitiam que rapidamente os colonos das zonas subdesenvolvidas do globo conseguissem ter o conforto e a qualidade de vida idêntica à dos países de origem [12].



Figura 2.4: Respetivamente, pedra chave dos arcos romanos (a) e casa pré-fabricada do século XIX (b), por [12].

É então que no início do século XX se tornou um dos principais focos de estudo o desenvolvimento de soluções de construção modulares, impostas pela crescente e desafiante necessidade de construção de abrigos de forma rápida em zonas estratégicas associada

ao esforço de guerra. Surgem os primeiros conceitos de construção modular correntes, caracterizados pela presença de um elemento estruturante (normalmente de aço e madeira) onde seriam anexadas chapas metálicas com o objetivo de servirem de cobertura. Paralelamente ao esforço militar, e com o objetivo no mercado civil, arquitetos tentavam desenvolver soluções de construção semelhantes vocacionadas para o mercado imobiliário, este que requeria de alojamentos em grande escala para alojar os soldados retornados.



Figura 2.5: Nissen Hut, visto do exterior (a) e do interior (b), por [1].

O conceito de construção recorrendo a pré-fabricados consiste num processo de fabrico e de pré-montagem que ocorre geralmente numa instalação especializada e em que vários materiais são unidos para formar um componente para instalação final. O processo de fabrico em si pode ser realizado num ambiente de fábrica ou sob céu aberto no próprio local [13]. De referir que a fabricação fora do local é usada quando ambas, pré-fabricação e pré-montagem, são integradas. O recurso a estes métodos construtivos é aliciente pois os tradicionais tornam o setor da construção civil pouco interessante do ponto de vista produtivo uma vez que, dependendo da obra em questão, verificam-se disparidades nos índices de produtividade como nos de desperdícios, resultando num desinteressante aumento dos custos finais de construção [14][2.6]. Tal acontece pois em ambiente de fábrica é mais fácil controlar o processo produtivo e, como consequente, consegue-se estipular e atender aos prazos requeridos pois o trabalho não fica condicionado por questões como a meteorologia presente ou até mesmo às disparidades de horas de luz, consequência das diferentes estações do ano.



Figura 2.6: Ganhos de tempo, em comparação entre os sistemas de construção, por [15].

Estes sistemas pré-fabricados podem ser classificados em 4 categorias, sendo estas estruturas modulares, estruturas painel, componentes pré-fabricados e materiais processados [16]

- Estruturas modulares: Estruturas que estão na sua forma integral e que conseguem formar parte de um edifício concluído, ou até mesmo o edifício completo;
- Estruturas painel: Elementos de montagem, pré-fabricados, que não conseguem formar um espaço fechado. Tratam-se então de um elemento responsável pelo invólucro do edifício;
- Componentes pré-fabricados: Conjunto de elementos, produzidos em fábrica pois geralmente não podem ser construídos no local, ou que simplesmente possa ser interessante do ponto de vista da velocidade de construção associada;
- Materiais processados: São elementos de construção fabricados exteriormente ao local de construção que posteriormente serão enviados. Trata-se de materiais de construção correntes, onde a sua utilização permite outro tipo de atributos estéticos à construção associada.

Do vasto leque de arquitetos, é de destacar o trabalho de Le Corbusier em estudar a aplicação de dimensões normalizadas para a padronização de elementos de construção moderna. Le Corbusier afirma que a pré-fabricação de habitações como substituição das casas tradicionais é uma mais-valia, pois se tratariam de habitações que se tornariam flexíveis e adaptáveis às necessidades do Homem [17]. Considera também que era preciso que as casas fossem produzidas em série, em fábricas com linhas de montagem tal como a Ford montava os seus automóveis, de forma a suprimir as necessidades do mercado [14].

Surgem então os primeiros conceitos de construções modulares, entre os mais marcantes, a *Maison Dom-ino*.

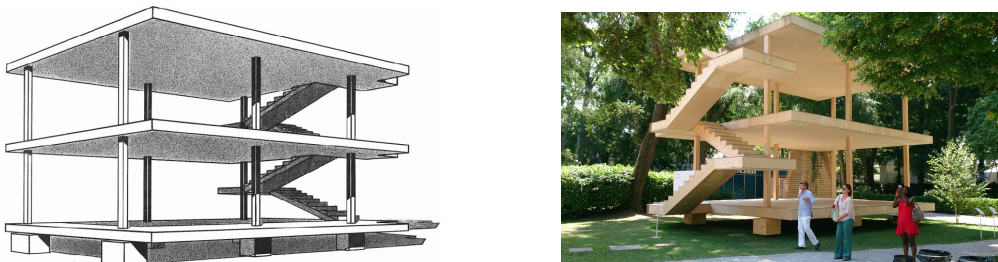


Figura 2.7: *Maison Dom-ino*, de *Le Corbusier*, por [14].

## O módulo

Segundo Gibb [18], é possível identificar três categorias de fabrico fora do local e em grande escala, tais com não-volumétrica, volumétrica e construção modular, sendo que a linha que divide cada tipo é flexível.

A categoria não-volumétrica representa elementos que não encobrem espaço útil. Exemplos disto são as divisórias internas a um edifício. A volumétrica já consegue representar coberturas, mas que sozinhas não conseguem constituir um edifício completo.

É comum que associada a esta categoria surja a necessidade de trabalho complementar, mas pouco extenso.

A categoria modular representa uma unidade funcional, com diferentes graus de complexidade, que juntamente com os restantes elementos modulares contribui para o funcionamento de uma estrutura singular. As interfaces especificam em detalhe as interações entre os módulos, a sua ligação e comunicação. Assim, podemos dizer que um sistema modular é composto por unidades ou módulos que são projetados independentemente para cumprir um ou um reduzido número de funções que, quando interligados, executam as funções principais. Este tipo de arquitetura torna-se interessante pois consegue atribuir flexibilidade e variedade no uso dos componentes, podendo ser fulcral na arquitetura de produto. Contudo um sistema deve ser composto por componentes que garantam a montagem em diferentes configurações, como por exemplo, ligações bidirecionais, para não ser visto como um elemento exclusivo, mas sim multi-funcional [19]. Para além disto é necessário garantir que as partes tenham dimensões relativamente reduzidas para que consigam ser transportadas por meios de transporte comuns, de forma a minimizar os custos associados ao uso destes componentes [20].

A Maison Dom-ino é um caso interessante pois parte do princípio de um sistema construtivo constituído por pilares, lajes planas e fundações em betão armado, onde está prevista a empregabilidade de uma ordem racional na conjugação dos elementos através da aplicação de subsistemas de organização [21].

Mas a dúvida persiste. Já foram referidas noções de diferentes tipos de modularidade, pelo que se torna necessário conseguir mensurar os diferentes tipos existentes bem como as diferentes definições de cada um. Existem 2 níveis globais de modularidade [20]: Elevado e baixo. A nível elevado tem-se a modularidade:

- Completa, onde são comuns elementos caixa, volumes e edifícios completos entregues no local de destino;
- Modular, onde estão presentes elementos de cariz estrutural e potencialmente preparados, que serão enviados e montados no local designado para a construção;
- Pods, que se tratam de estruturas completamente montadas que são ligadas a uma estrutura, criada previamente no local de montagem;
- Painéis, que se tratam de elementos estruturais não-volumétricos, e que são utilizados na criação de espaços divididos;

A nível de baixa modularidade, pode-se apresentar:

- Materiais, onde trata-se apenas de materiais de construção normalizados, utilizados no local de construção

Consegue-se perceber, desde logo, que é interessante a aplicação de materiais com um elevado nível de modularidade pois efetivamente consegue-se reduzir o número de operações de construção no local com a consequente poupança associada.

### 2.1.3 Sistemas de montagem e aperto

No paradigma estrutural da construção civil pode-se dizer que existem 2 tipos estruturais: Estruturas convencionais e estruturas auto portantes [22].

Uma estrutura convencional é aquela que de facto é a mais utilizada nas construções atuais. Resulta da elevação de um elemento estrutural em gaiola, caracterizado por ser o esqueleto da edificação, onde este vai incorporar elementos ligantes, chamadas de paredes, para cumprir as funções de isolamento quer de divisões internas quer de vedação exterior aos elementos. Esta estrutura é pensada de forma a aguentar o peso da edificação, pelo que as paredes normalmente não têm qualquer funcionalidade estrutural.

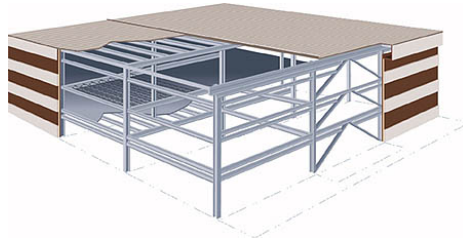


Figura 2.8: Exemplo de uma construção convencional

Uma estrutura auto-portante é caracterizada pela ausência de um elemento estrutural específico, pelo que o elemento de revestimento também responde às funções estruturais. São proeminentes na arquitetura devido às propriedades estruturais vantajosas (tornam-se mais leves) e ao uso eficiente do material.

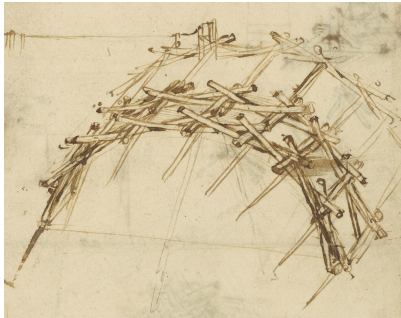


Figura 2.9: Ponte de da Vinci, das primeiras estruturas auto-portantes

Recentemente a pesquisa em computação gráfica, e com recorrência a métodos de elementos finitos, contribuiu com novas ferramentas de design que permitem criar e explorar de forma interativa os projetos autónomos de formas livres. No entanto a construção física dessas estruturas de forma livre permanece desafiadora, mesmo em pequenas escalas. Os processos de construção atuais exigem um extenso trabalho de conformação durante a montagem, o que rapidamente leva a custos de construção proibitivamente altos para replicações em escala de construção. Isto limita bastante o impacto prático das ferramentas de design de forma livre existentes.

#### 2.1.4 Sistemas de isolamento

O isolamento corresponde à componente estrutural que prevê a impermeabilidade e os sistemas que a garantam numa interação entre volumes. Esta impermeabilidade pode não se tratar apenas da resistência mecânica contra a passagem de humidades, mas também contra a passagem de ruído entre outros elementos.

O isolamento térmico resume-se à utilização de um material, ou conjunto destes, que retardam o fluxo de calor por condução, convecção e radiação [23].

O isolamento acústico é expresso pela redução ponderada do som [24]. O índice de redução de som define a capacidade de uma estrutura impedir a passagem de vibrações sonoras por si mesma e é expresso em decibéis (dB). Quanto maior o índice de redução de som, maior a anulação de som da estrutura.

No contexto do desenvolvimento deste projeto, torna-se interessante abordar o isolamento de um ponto de vista acústico. Isto pois o módulo a idealizar está previsto a funcionar dentro de uma envolvente já previamente isolada a nível térmico, pelo que será de total interesse o foco no estudo da garantia do conforto acústico no interior da componente modular. Não quer isto dizer que seja menos importante a garantia do conforto térmico no interior da mesma.

## 2.2 Atualidade da construção modular

A modularidade e a pré-fabricação como resposta à construção estão a tornar-se uma escolha natural, como soluções de redução de custo e de aumento da economia energética, apesar da tendência persistente da adesão a materiais e técnicas tradicionais [20]. Posto isto, torna-se necessário perceber quais as vantagens efetivas para a escolha de um paradigma invés do outro.

### 2.2.1 Construção modular versus Construção tradicional

- Maior variedade de produtos - o facto de ser possível combinar diferentes módulos permite criar novos produtos que, aos olhos do consumidor, são diferentes mas onde 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 um alto volume de produção;
- Redução de custos de investimento em novos produtos semelhantes - aproveitamento dos custos 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 [25].

Dá-se como foco de estudo neste documento a abordagem não à construção modular por inteiro, mas sim a uma perspetiva de criação de soluções de divisão do espaço útil de cariz modular.



## 2.2.2 Novas aplicações na área da construção modular

### Dan Hisel's "Z-box"

O conceito *Z-Box*, proposto pelo arquiteto Dan Hisel [26], resulta do aproveitamento de espaço vazio, interno a apartamentos, que por muitas das vezes estão para aluguer sem sequer estarem completamente mobilados. Das suas características mais atrativas é a facilidade com que se monta uma divisão pronto a habitar, pelo que os componentes são grandes o suficiente para minimizar o número dos mesmos e ao mesmo tempo pequenos para que se consigam transportar pelos acessos normalmente desenhados para as dimensões humanas (escadas, portas e elevadores).

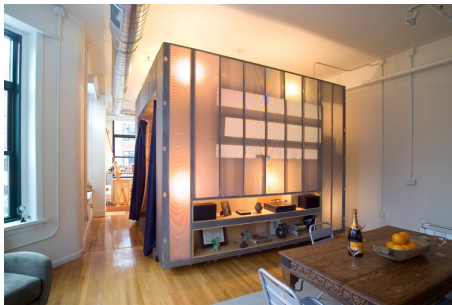


Figura 2.10: *Z-box*, vista do exterior e do interior.

Esta ideia foi concebida para funcionar como uma solução de acomodação temporária, pelo que o seu interior peca na falta de diversas funcionalidades.

### EverBlock's "EverPanel"

A tecnologia *Ever Panels* [28] é baseada na montagem tipo LEGO<sup>TM</sup>. As placas são desenhadas de forma a que sejam montadas através de guilhões universais presentes nas extremidades verticais. Uma vez colocadas as placas no sítio onde se deseja efetuar a montagem, basta conecta-las através de um elemento ligante.



Figura 2.11: Representação do sistema *EverPanel*, da empresa *EverBlock*.

Os painéis são fabricados com recurso a fibra de vidro, com a incorporação de retardantes ao fogo, pelo que não se torna um elemento ambientalmente ecológico devido à incapacidade de sofrer processos de reciclagem e reaproveitamento convencionais [29].

### Walls Forms

A *WallForms* [30] baseou o seu sistema de acoplamento em sistemas já existentes e utilizados na indústria de escritórios modulares. Consiste em painéis com dimensão estandardizada onde nos seus rebordos existem encaixes e que, perante os outros semelhantes, é efetuado a ligação através de *snap-fits* presentes nas colunas ligantes. A empresa oferece diversas soluções angulares, isto é, para cada ângulo pretendido existe uma coluna ligante distinta.

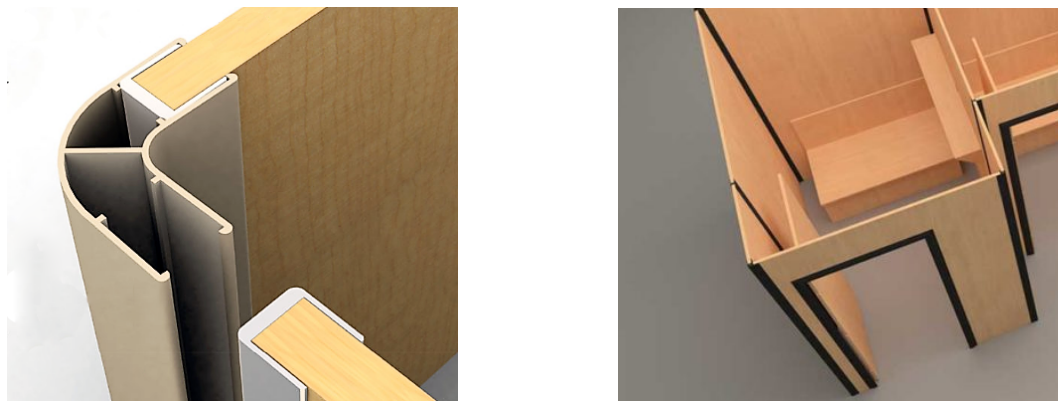


Figura 2.12: *WallForms*, detalhe das ligações.

Esta solução fica incompleta pois não consegue responder à vedação superior.

### Fibs Building Systems

A *Fibs Building Systems* [31] é uma empresa que se dedica ao fabrico de soluções de arquitetura de paredes e divisórias. Para responder a isto desenvolveu um sistema modular de placas, como determinadas topologias, que visam a serem interligadas para a criação da divisória completa.

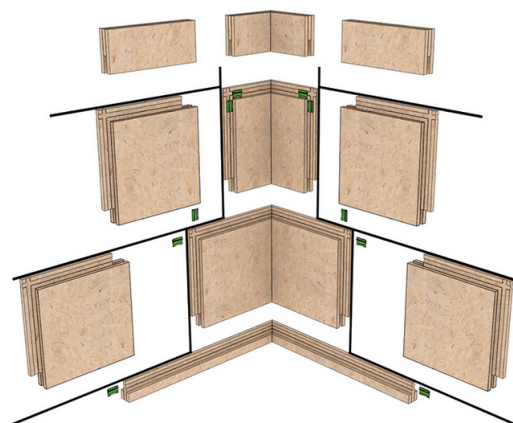


Figura 2.13: Elemento construtivo *Fibs Building System*.

Com as diferentes conjugações dos elementos modulares, conseguem responder a di-

versas solicitações de construção de divisórias.



Figura 2.14: *Fibs Modular Systems*, na criação de divisórias.



Figura 2.15: *Fibs Modular Systems*, no revestimento de divisórias.

### Modular Walls' SlimWall

As divisórias *Slim Walls*, da empresa *Modular Walls* [27], são uma solução construtiva que consegue combinar a funcionalidade ao design. Feitas de painéis e postes de compósito leve, a associando a uma rápida e fácil instalação, oferecem uma flexibilidade de utilização e de manutenção ímpares no mercado.

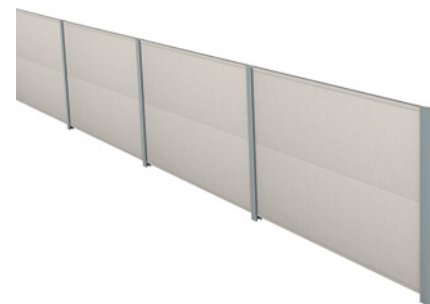
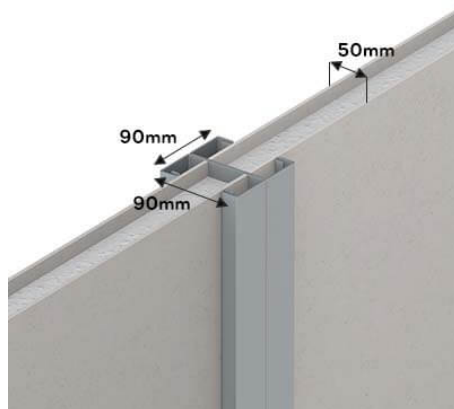


Figura 2.16: *WallForms*, detalhe das ligações

Figura 2.17: Representação do sistema *Slim Wall*, da empresa *Modular Walls*.

## 2.3 Economia circular na construção modular

A emergente preocupação do ser-humano pela conservação do estado da natureza torna-se num aspeto imperativo para a elite que se dedica na desenvoltura de novos produtos. Esta última deve intervir com a uma resposta de peso no que respeita à criação de métodos de adaptação de produtos já existentes em novos produtos funcionais. Esta linha de pensamento torna-se numa das bases da filosofia de uma economia de cariz circular.

A economia circular trata-se de um modelo económico onde o fluxo de materiais é realizado através de ciclos. Defende uma aproximação ao crescimento económico apoiando na sustentabilidade ambiental. Tal baseia-se no conceito de fechar o ciclo de vida dos materiais na medida de preservar produtos, partes e materiais num sistema industrial de forma a extrair a sua utilidade máxima [32]. Esta ideologia de produção é exatamente oposta à corrente tradicional de produção, onde esta defendia um modelo linear de extração-produção-uso-descartar onde se torna insustentável.

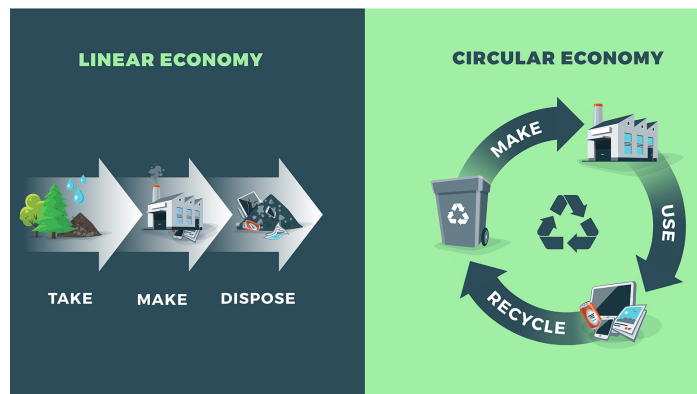


Figura 2.18: Economia linear *versus* Economia circular, por [33].

A economia circular é, de facto, o atual paradigma económico em expansão a nível mundial. Aliás, é promovido pelas principais potências económicas mundiais (União Europeia, China, Reino Unido, Canadá, Japão) que, só na União Europeia, está previsto que os ganhos económicos associados a este tipo de economia representem cerca de 600 mil milhões de euros anualmente [34]. O conceito já não é recente, pelo que vem sendo falado desde os princípios da industrialização. De facto o conceito tem sido associado à crescente preocupação ambiental que visa lidar com os desperdícios da indústria, quer de manufatura como de fim de vida, atribuindo sistematicamente valor aos recursos bem como no estímulo de novas oportunidades de negócio.

### 2.3.1 O modelo linear e as suas falhas

O modelo económico linear tem origem na distribuição desigual de recursos de cada região. Como os recursos consumíveis têm estado concentrados nas regiões mais desenvolvidas, as nações mais industriais têm vivido uma abundância destes, quer materiais quer energéticos. Assim, o custo efetivo dos materiais tem sido inferior comparando com o custo de mão de obra. Isto resultou na motivação em adotar modelos de negócio que assentassem no uso extensivo de materiais, economizando na mão de obra. Aliás de forma

a se tornarem mais competitivos perante o restante mercado, era normal o investimento num maior uso energético e de materiais de forma a economizar no capital humano. Ora tal reflete-se em consequências, nomeadamente na falha da introdução de previsão de sistemas de reciclagem e de reutilização no produto, enfatizando no descarte dos mesmos [35].

Baseando em dados empíricos e em modelos económicos [35], é possível quantificar os custos do sistema linear produtivo. Por questões de noção de grandezas associadas, só na vertente produtiva cerca de 21 mil milhões de toneladas de material usados na produção global não chegam a ser incorporados no produto final (casos como ineficiência do processo de fabrico associado, ou até mesmo produtos de transição de etapas nos processo de fabrico). Estes são considerados lixo e terminam o seu ciclo de vida em aterros sanitários, com um contributo negativo quer para a poluição ambiental como para o ciclo económico.



Figura 2.19: Despejo de resíduos industriais

### 2.3.2 O modelo circular

O modelo circular defende que quanto mais uma indústria reutilize e recicle os seus desperdícios, mais próxima fica da ideologia circular bem como de um maior lucro e ainda menor impacto ambiental. Pode ser complementado com a redução do uso de matéria virgem e com a adoção de tecnologias de carácter ambiental [36]. Na vertente de produto, a economia circular promove uma metodologia de produção dos componentes de forma a atingir a neutralidade ecológica. Estas recaem numa abordagem de enquadramento dos 9 R's. Esta abordagem defende que a produção dos elementos deve ser o mais estandarizada possível, de forma a poderem ser facilmente substituídos caso entrem em falha funcional, prolongando o tempo de vida útil do produto e promovendo a sua extensão de vida. Além disso prevê a reutilização do mesmo produto por parte de outro cliente, prolongando assim a presença do produto no mercado, e caso entre numa etapa de fim de funcionalidade possa ser aproveitado para outras funções noutros produtos [37]. A sua hierarquia de abordagem está desenhada de forma a maximizar a circularidade económica do produto, com os ganhos económicos e ambientais proporcionalmente associados (2.20).

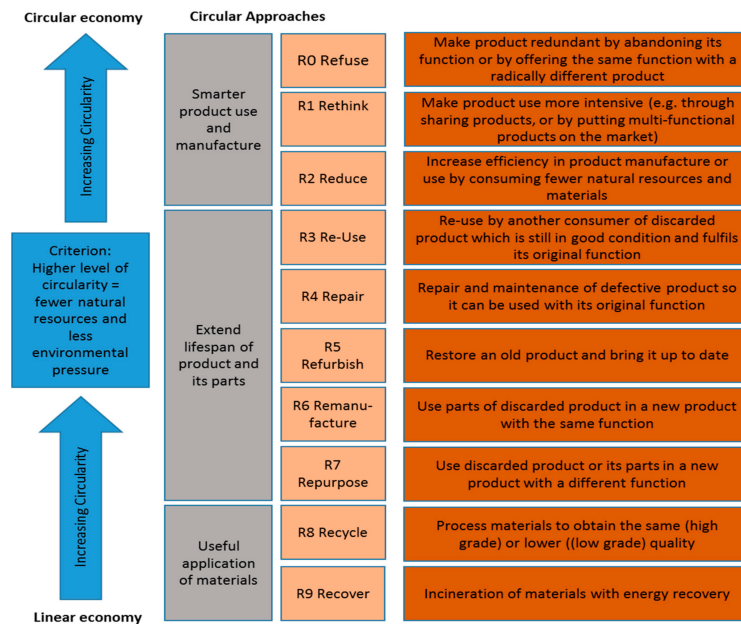


Figura 2.20: Enquadramento dos 9 R's, por [? ]

### Limitações do modelo circular

O modelo circular é um modelo que consegue responder às necessidades atuais da indústria mas como qualquer modelo sofre as suas falhas, que por vezes não estão apenas inerentes ao conceito formulado mas sim aos territórios onde serão aplicados. Por exemplo, há problemas que já foram identificados, dos quais:

- Limites termodinâmicos, pois estes ciclos consomem recursos resultando em desperdícios e emissões;
- Limites das fronteiras dos sistemas, onde problemas são prolongados ao longo do ciclo de vida do produto e por vezes pela utilização de recursos não renováveis para a produção de infraestrutura renovável e duradoura;
- Limites impostos pela escala física da economia levando a repercussões como o Paradoxo de Jevon [38], que defende que quando há um progresso tecnológico que aumenta a eficiência de um recurso leva ao aumento do seu consumo em vez da expectável redução.
- Limites impostos pelos produtos já consolidados no mercado, que impedem a proliferação de novos produtos;
- Limites associados às definições culturais e sociais, que contribuem para a descredibilização de produtos associadas a este tipo de economias;

A aplicação prática do modelo de economia circular ainda está numa fase embrionária pelo que muitas questões importantes ainda estão em aberto. Por exemplo a descoberta de novas aplicações de certos elementos pode canalizar recursos para outras vertentes interrompendo o ciclo da economia circular de um produto, sendo necessário implementar

novos recursos para a satisfação e a exequibilidade do mesmo. Até mesmo no caso de produtos que foram criados e estão baseados no aproveitamento de recursos desperdiçados, se a sua procura aumentar de forma a ultrapassar a capacidade de reaproveitamento de tais materiais pode levar a que se considere matéria virgem para o efeito, agravando assim o impacto ambiental [39].

## 2.4 Novas possibilidades e materiais na construção modular

Apesar de grande parte dos esforços já tomados na construção de edificações modulares apontarem para a minimização da sua pegada ecológica, estes acabam sempre por terem na sua composição elementos que necessitam de ser fabricados para as respetivas funções. Tornar-se-ia interessante, do ponto de vista de engenharia bem como de ecologia, pensar em elementos que se encontram em abundância e adapta-los para uma nova vida, vida esta que passaria pela sua implementação em construção com a mesma filosofia ecológica.

As pás eólicas tratam-se de sistemas mecânicos que visam transformar a energia eólica em energia elétrica. Normalmente, compósitos de polímero reforçados com fibra de vidro são utilizados neste tipo de construções devido ao seu reduzido peso, elevados valores relacionais entre a resistência e a rigidez com o peso associado, bem como na durabilidade associada [40].

### 2.4.1 Ciclo de vida das pás eólicas

Este tipo de construção requer formas geométricas complexas, que sejam leves e resistentes à fadiga. Devido à imprevisibilidade da meteorologia ao longo do seu tempo de vida útil, é estimado que o tempo de serviço das pás das turbinas eólicas seja limitado a 20 anos [41].

Existem vários estudos acerca do fim de vida das pás eólicas. Normalmente estas acabam em processos de incineração ou em aterros, ao qual contribui num impacto ambiental relevante com muito pouco retorno. A reciclagem dos mesmos pode ser feito através de processamento mecânico, térmico ou químico, onde os materiais extraídos podem ser utilizados como alternativas a materiais virgens na constituição de novos compósitos ou até mesmo na incorporação de betão ou asfalto [42].

No entanto, a extração de material reciclado para a posterior incorporação em novas pás eólicas não se torna economicamente viável. O compósito de polímero com fibras de vidro, quando reciclados, perde as suas características originais, o que se pode tornar problemático aquando ao dimensionamento dos elementos em questão [43].

### 2.4.2 Crescimento dos parques eólicos

Atualmente, começa-se a ter uma diferente sensibilidade aos desperdícios industriais devido à alerta global da sobre-exploração dos recursos naturais bem como a crescente demanda energética. No caso das pás eólicas em *offshore*, estas começaram a ser implementadas em massa nos anos 90 do século passado e continuam em crescente expansão [45]. Veja-se, presente na figura 2.21, a expansão dos parques eólicos europeus entre 2001 e 2016 [46]. É possível verificar que foi uma constante crescente, e continua a ser, de forma a tentar cumprir as metas energéticas delineadas pela União Europeia na medida de suficiência energética (figura 2.22). De facto, só a implementação de parques eólicos,

quer *onshore* quer *offshore*, não chega mas consegue colmatar uma grande parte das necessidades inerentes, pelo menos para a meta atual de 2020.

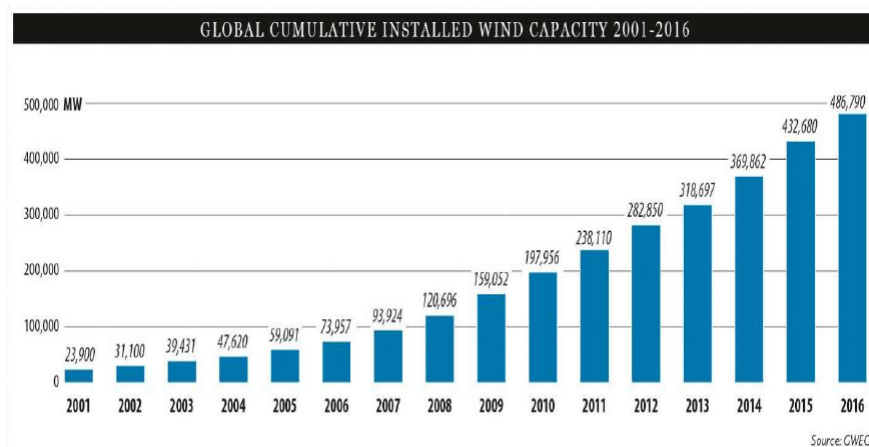


Figura 2.21: Expansão dos parques eólicos, por [44].

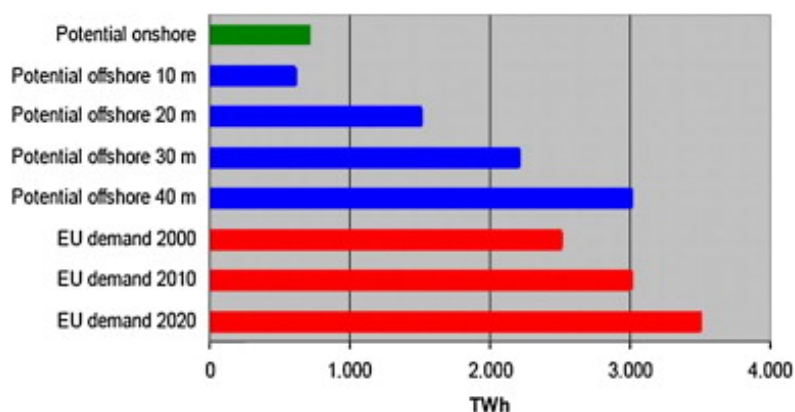


Figura 2.22: Metas de produção energética, por [44].

### 2.4.3 Novas aplicações para as pás eólicas

Visto que o crescimento desta tecnologia está em expansão, e que o seu tempo de vida útil é deveras reduzido, faz todo o sentido debruçar sobre possíveis soluções para acomodar os resíduos provenientes desta indústria. Diversos estudos foram feitos de forma a tentar responder a esta realidade, reutilizando as pás eólicas como elemento constituinte de novas construções.

#### Root-Foundation System

O sistema Root Foundation prevê o uso da raiz das pás eólicas, circular, como base para futuras habitações. A espessura de material associado a este segmento é de cerca de 110 mm de fibra de vidro com um diâmetro entre 3 a 4 metros, numa pá do tipo SNL-100-0 [46]. Segundo o autor, as cheias são o segundo fator ambiental mais destrutivo



em casas informais em países menos afortunados. Ao utilizar este método para elevar as habitações, não só era evitada a destruição de bens habitacionais como era oferecido outro propósito aos desperdícios resultantes da indústria.

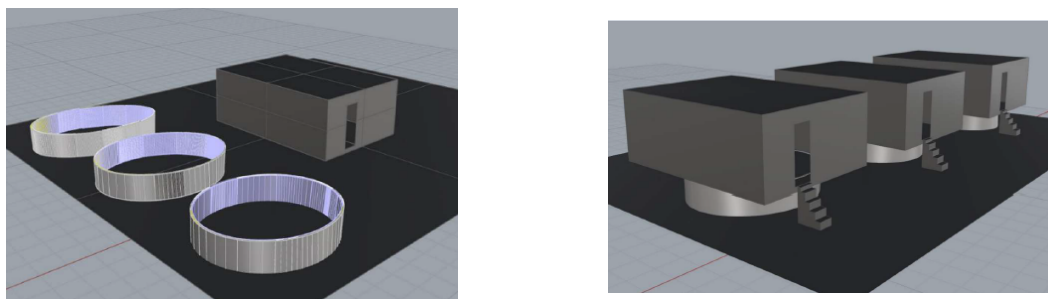


Figura 2.23: Sistema Root Foundation.

### Aplicações Door/Window

Outra possível aplicação sugerida [46] trata-se da utilização das partes mais planas das pás como elementos estruturais. Estas fazem parte do recheio das pás, que se estendem ao longo de toda a sua envergadura. Tratam-se de elementos do tipo *sandwich* com cerca de 80mm de espuma, em espessura, com 3mm de fibras em ambos os lados, quer de fibra de vidro ou de fibra de carbono. Como incluem um elemento estruturante e um elemento isolante, podem ser reutilizadas como portas, paredes ou até mesmo placas isolantes auto-portantes.



Figura 2.24: Sistema Door/Window.

### Roof Frames

Ainda outra aplicação possível com o refugo desta indústria é a criação de soluções de coberturas habitacionais. Estas consistem no aproveitamento de secções das pás eólicas com o objetivo de as tornar em telhados para habitações menos providas.

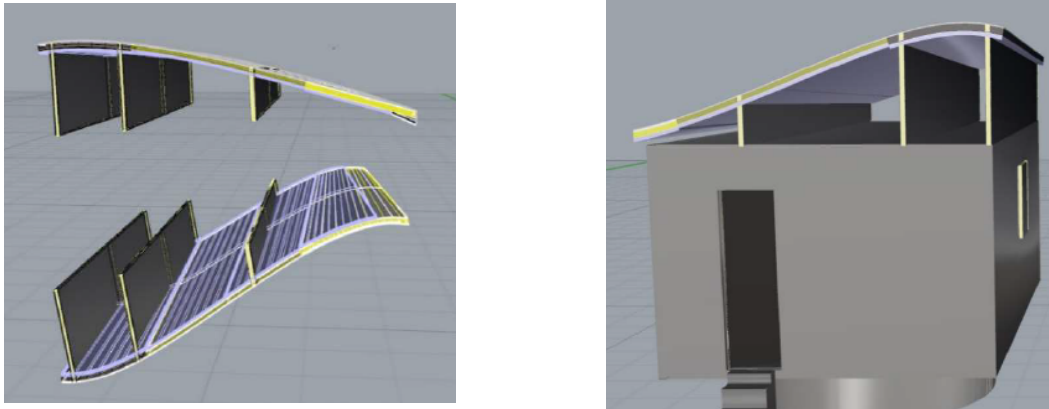


Figura 2.25: Sistema Roof Frames da parte lateral da pá.

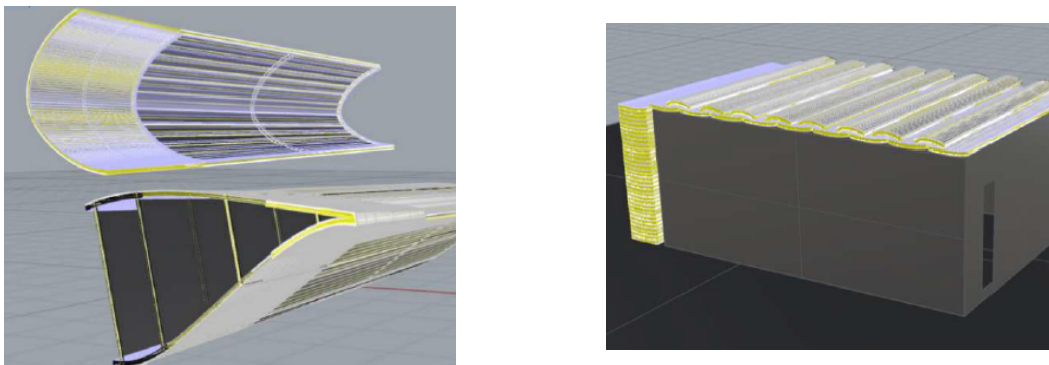


Figura 2.26: Sistema Roof Frames da parte de ataque da pá.

## 2.5 Contributo do estudo

Tendo em conta o objetivo desta dissertação, com a prévia revisão bibliográfica explorada, estabeleceu-se como principal foco deste trabalho o desenvolvimento de um conjunto de elementos funcionais que consigam estabelecer a arquitetura de um módulo habitacional que será incorporado numa habitação-mãe. Além disso torna-se também como objetivo a desenvoltura da capacidade destes mesmos elementos conseguirem ser transportados facilmente, sem recurso a meios de transporte excepcionais, bem como a fácil execução de montagem por parte do consumidor, diminuindo a necessidade de mão-de-obra externa com o associado acréscimo de custos. Para complementar esta conceção os elementos serão definidos de um ponto de vista ecológico não só afim de contribuir para a atração deste mesmo por parte do cliente mas também pela salvaguarda de recursos, sendo que a questão ambiental tomará um peso considerável na ponderação dos elementos e métodos a incorporar por parte das soluções apresentadas.



## Capítulo 3

# Projeto de conceito

### 3.1 Metodologia adotada

Nesta fase do projeto torna-se necessário estabelecer a forma como vão ser abordados todos os aspetos do mesmo desde o seu desenvolvimento até à sua execução. Torna-se lógico começar por fazer um levantamento dos requisitos impostos pelo paradigma no qual o projeto se encontra inserido, sendo este o europeu, com a posterior adaptação das funcionalidades do produto a condizer.

Seguintemente e com os dados já extraídos do estado de arte do presente documento será feita uma análise de mercado associado à proposta que se visa desenvolver. Com estes, o principal objetivo passa por extrair os requisitos dos clientes normalmente associados a este tipo de soluções.

Mediante os resultados obtidos, estes serão importados para a elaboração das matrizes relativas ao QFD onde estes serão relacionados e ordenados por priorização sendo feita a comparação entre o produto a desenvolver com a sua eventual concorrência. Resultando da matriz em questão, serão cruzados os requisitos do cliente com as especificações do produto e ainda com os componentes do produto. É aqui que se define o que o cliente realmente espera deste.

Posteriormente decorrerá uma discussão e organização das ideias apresentadas, com recorrência ao esboço daqueles que seriam os possíveis componentes e suas disposições no projeto de modo a abordar diferentes formas de construção dos principais constituintes.

Na sequência será elaborado um conceito primordial, onde se prevê a incorporação da painéis de fibra de vidro reutilizados incluindo, ou não, outras soluções de revestimento.

De seguida proceder-se-á uma análise de falha do conceito (FMEA), onde serão dadas as diretrizes de melhoria do conceito de modo a este tornar-se viável ao projeto de concretização.

Sem mais demora, iniciar-se-á o projeto de concretização que visa a definição das especificações gerais da proposta tomada bem como na idealização de sistemas inerentes à arquitetura do produto.

Com isto, e finalizando esta etapa, volta-se novamente à elaboração da análise de falha mas desta vez do projeto, onde já se encontra concebido. Uma vez que o produto cumpra todos os aspetos requeridos, este pode avançar na linha de conceção. Caso não consiga cumprir aspetos desejados, é aqui onde se tomam as ações necessárias para a resolução do mesmo mexendo na sua arquitetura até que se consiga cumprir com a função em falha.

Estando todos os pontos importantes e necessários cumpridos, procede-se então ao

projeto de detalhe. Este incluirá pormenores de ligações entre os elementos definidos bem como abordará aspetos que em etapas transatas não se conseguira prever, como a análise das sensações que o produto completo transmitem ao cliente bem como uma apresentação detalhada dos elementos constituintes. Esta etapa torna-se uma das mais importantes pois aqui será apresentado o produto final, sendo este aprovado para futuros estudos e/ou prototipagem caso seja esse o intuito.

## 3.2 Normalização europeia

Na conceção ou adaptação de produtos a certas funcionalidades é requerido aos designers e criadores que se revejam nos ambientes de utilização dos mesmos, de forma a tomarem decisões que serão aceites pela legislação em vigor.

### 3.2.1 Revisão de normas europeias de habitabilidade

Em primeiro lugar, o objetivo proposto assenta na elaboração de um conjunto de elementos estruturantes com vista à conceção de uma divisão modular habitacional. Esta será um módulo-quarto, que será incorporado numa habitação já existente e que visa ao acomodamento de um sujeito por um determinado tempo. Servindo isto como condicionante é importante consultar a legislação associada às normas construtivas, onde estão previstas dimensões normalizadas para o tipo de divisão [47]. Segundo o ponto 2 do Artigo 65º, altura mínima, piso a piso, em edificações destinadas à habitação é de 2,50m. Excepcionalmente, em vestíbulos, corredores, instalações sanitárias, dispensas e arrecadações será admissível que o pé-direito se reduza ao mínimo de 2,20m. Sendo esta divisão compreendida como uma edificação destinada à habitação, a altura deve-se situar nos 2,50m.

Relativamente à área total admissível, segundo o ponto 1 do Artigo 66º, como se trata de uma divisão habitacional está previsto que se tome uma área de um quarto simples, onde a área mínima é de 6,5m<sup>2</sup>

### 3.2.2 Revisão de normas europeias de conforto

Relativamente à legislação acerca do conforto dos ocupantes, e segundo a mesma em vigor, passa pela garantia de um determinado isolamento sonoro e térmico.

Em termos de isolamento sonoro está legislado que a redução de ruído para o interior do cómodo, via aérea, deve ser superior ou de valor igual a 50 dB [49]. Também estão previstos na legislação limites acerca da transmissão de ruído via impacto, como objetos a caírem ao chão ou até mesmo passos nos pisos superiores. Esta não se adequa ao caso em estudo pois não está prevista a situação de múltiplos pisos.

Em relação à regulamentação térmica, esta não prevê qualquer exigência no que corresponde a requisitos térmicos entre divisões internas. De facto o único efeito que as paredes internas a uma edificação trazem para a performance térmica é apenas a sua inércia na condução de calor, proveniente da sua massa térmica.

### 3.2.3 Revisão de normas europeias de segurança

Tratando-se este de um produto de utilização interior e de contacto com o ser humano, de acordo com a legislação associada, torna-se obrigatório que este garanta a função de

compartimentação resistente ao fogo. Estão previstas diferentes classificações relativas à reação do fogo com os materiais constituintes [48].

Tabela 3.1: Categorização da norma EN 13501-1

| Definição   | Classificação de acordo com a Norma Europeia EN 13501-1 |            |            | Pavimentos            |                       |
|---|---|------------|------------|-----------------------|-----------------------|
|   | Produtos de construção                                  |            |            | A1 <sub>fl</sub>      |                       |
| Materiais não combustíveis                              | A1  |            |            | A1 <sub>fl</sub>      |                       |
|   | A2 - s1 d0  | A2 - s1 d1 | A2 - s1 d2 | A2 <sub>fl</sub> - s1 | A2 <sub>fl</sub> - s2 |
|   | A2 - s2 d0  | A2 - s2 d1 | A2 - s2 d2 |                       |                       |
|   | A2 - s3 d0  | A2 - s3 d1 | A2 - s3 d2 |                       |                       |
| Materiais combustíveis - pouco contributo para chama    | B - s1 d0   | B - s1 d1  | B - s1 d3  | B <sub>fl</sub> - s1  | B <sub>fl</sub> - s2  |
|   | B - s2 d0   | B - s2 d1  | B - s2 d3  |                       |                       |
|   | B - s3 d0   | B - s3 d1  | B - s3 d3  |                       |                       |
| Materiais combustíveis - contributo limitado para chama | C - s1 d0   | C - s1 d1  | C - s1 d2  | C <sub>fl</sub> - s1  | C <sub>fl</sub> - s2  |
|   | C - s2 d0   | C - s2 d1  | C - s2 d2  |                       |                       |
|   | C - s3 d0   | C - s3 d1  | C - s3 d2  |                       |                       |
| Materiais combustíveis - contributo médio para chama    | D - s1 d0   | D - s1 d1  | D - s1 d2  | D <sub>fl</sub> - s1  | D <sub>fl</sub> - s2  |
|   | D - s2 d0   | D - s2 d1  | D - s2 d2  |                       |                       |
|   | D - s3 d0   | D - s3 d1  | D - s3 d2  |                       |                       |
| Materiais combustíveis - contributo alto para chama     | E   |            |            | E <sub>fl</sub>       |                       |
| Materiais combustíveis - facilmente inflamáveis         | F   |            |            | F <sub>fl</sub>       |                       |

Por observação da tabela 3.1, até à categoria D tomam-se materiais que se podem incorporar na estrutura da parede visto traduzirem num entrave aceitável para com o fogo.

### 3.3 Especificações do projeto

#### 3.3.1 Pesquisa do mercado

A pesquisa das principais ideias e produtos que respondem à função objetivada da solução a desenvolver já foi abordada no estado de arte associado a este documento. Destas, é possível extrair as funções e topologias que os elementos presumivelmente devem ter de forma a serem viáveis de se introduzir no mercado com sucesso. As características principais, que todas as diferentes soluções contêm, são descritas na tabela 3.2.

De facto, um dos principais objetivos desta dissertação passa pela resposta à inserção de elementos em fim de vida (pás dos geradores eólicos), o que aponta a solução idealizada num sentido de resposta ecológica positiva. Normalmente este fator é exposto como sendo o mais atrativo para o cliente, sendo que está inserido no paradigma do século XXI que defende a produção sustentável com a adequação do fim de vida dos materiais [50].

#### 3.3.2 QFD

A ferramenta normalmente utilizada, e a que servirá também de guia para esta dissertação, é a chamada Matriz de Desdobramento da Função Qualidade (*Quality Function Deployment - QFD*). Esta consegue relacionar as etapas inerentes ao produto desde o

Tabela 3.2: Requisitos do produto

| Requisitos     |  |
|----------------|--|
| Segurança      | Estrutural                             |
|                | Estabilidade                           |
| Funcionalidade | Ergonomia                              |
|                | Escolha da Topologia                   |
|                | Transmissão da ideia de robustez       |
| Isolamento     | Térmico                                |
|                | Acústico                               |
|                | Privacidade                            |
| Modulares      | Facilidade de Transporte               |
|                | Facilidade de Produção                 |
|                | Facilidade de Montagem                 |
| Flexibilidade  | Personalização do Módulo               |
|                | Adaptação pós-montagem                 |
|                | Mudança de sítio                       |
| Design         | Apelo Estético                         |
|                | Qualidade dos acabamentos              |
| Manutenção     | Fácil                                  |
|                | Mínima                                 |
| Fabrico        | Menor número de componentes diferentes |
|                | Baixo custo p/construtor               |
|                | Baixo custo de implementação final     |
|                | Capacidade de reutilização             |

seu desenvolvimento, produção até à venda, cruzando com a avaliação dos requisitos obtidos através do *feedback* proveniente do consumidor (*Voice of the Customer - VOC*) permitindo que sejam efetuadas alterações necessárias ao projeto [52]. Estas alterações permitem que na fase de produção todos os componentes e as suas funções associadas tenham sido analisadas, pois conseguiram cumprir com as especificações requeridas nas quatro Matrizes da Qualidade [53].

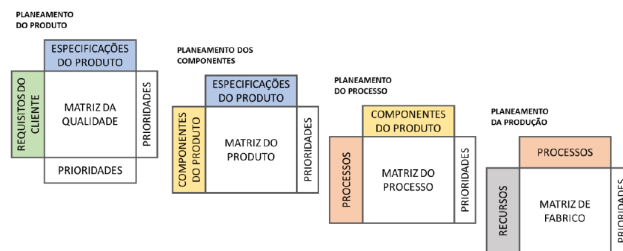


Figura 3.1: As quatro Matrizes da Qualidade, por [53].

Mediante o conceito apresentado nesta dissertação, irá ser dada a atenção necessária ao desenvolvimento da Matriz da Qualidade e à Matriz do Produto mas também serão especulados aspetos acerca da Matriz de Processo e da Matriz de Fabrico. Assim sendo, procedeu-se à elaboração da matriz de qualidade e de produto para o presente desenvolvi-

mento de produto. Iniciou-se com uma hierarquização dos requisitos do cliente, presente em 3.2. De seguida deu-se atenção às especificações do produto com o intuito de analisar a sua resposta mediante os componentes do produto (figura 3.3). Por fim, foram cruzadas e priorizadas as especificações do produto com os seus componentes, obtendo assim uma listagem da priorização dos componentes a implementar no produto (figura 3.4).



Figura 3.2: Priorização dos requisitos do cliente.

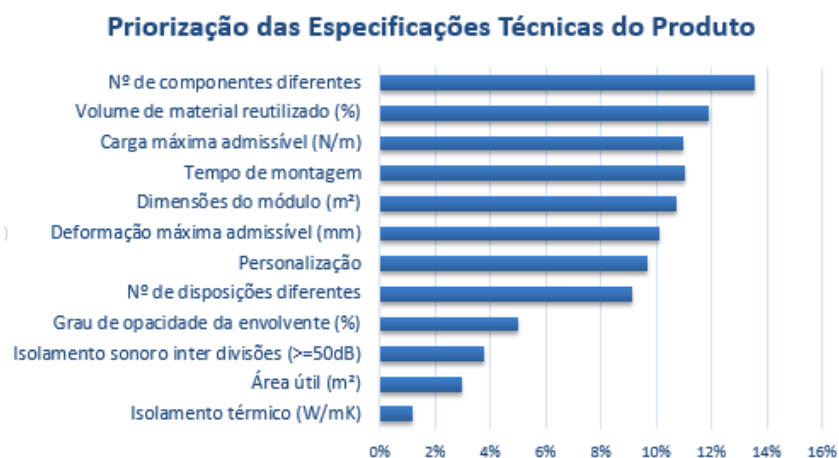


Figura 3.3: Priorização das especificações técnicas do produto.



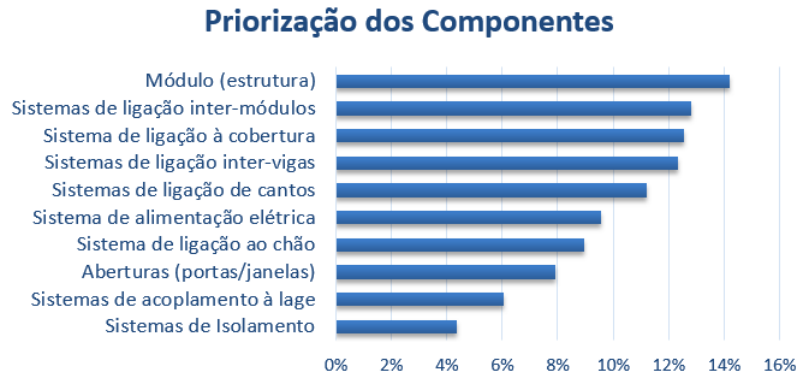


Figura 3.4: Priorização dos componentes.

### 3.4 Proposta inicial

Mediante a clarificação proveniente dos subcapítulos anteriores, torna-se necessário definir em que consiste a idealização do decorrente projeto.

A direção a tomar na concretização do projeto baseia-se na implementação de materiais provenientes de outros setores e aplicações, em fim de vida para a transata função, com vista na redução do impacto ambiental associado. A concretização desta dissertação assenta na tentativa da adaptação funcional das pás eólicas em fim de vida com o objetivo de as incorporar em placas estruturantes para a concretização de módulos, dos quais em reunião vão criar a estrutura completa do cómodo idealizado.

Começa-se pela definição do elemento base. Este trata-se então de uma placa *sandwich* de fibra de vidro e espuma proveniente do recorte das pás eólicas do tipo SNL-100-00 [54], com uma espessura total exterior de 86mm (2 placas de 3mm de fibra de vidro recheadas com 80mm de espuma), como representado na figura 3.5. Estes têm uma medida de  $1 \times 0.5 \text{ m}^2$ . Esta medida é assim definida pois com a conjugação destas dimensões é possível responder às imposições construtivas legisladas ([1] e [47]).

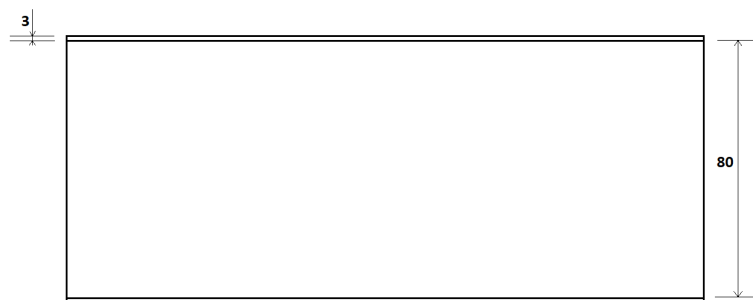


Figura 3.5: Representação de um segmento de pá eólica

Para responder de forma positiva à priorização dos requisitos dos clientes, torna-se interessante que a estrutura completa consiga ser auto-portante. Isto permite reduzir o número de componentes diferentes e tende a tornar toda a estrutura mais leve, conseguindo assim responder a questões como a facilidade de montagem com a associada redução do custo de implementação. Assim, torna-se necessário desenvolver sistemas de

suporte que se consigam associar às placas modulares pré-definidas e que no seu conjunto consigam assegurar a coesão da envergadura necessária.

### 3.4.1 Análise das pás das eólicas

Como já fora referido a composição das pás eólicas passa pela incorporação de fibras, normalmente de vidro com determinados casos onde se usam fibras de carbono, com um reforço de cariz espumoso (figura 3.6).

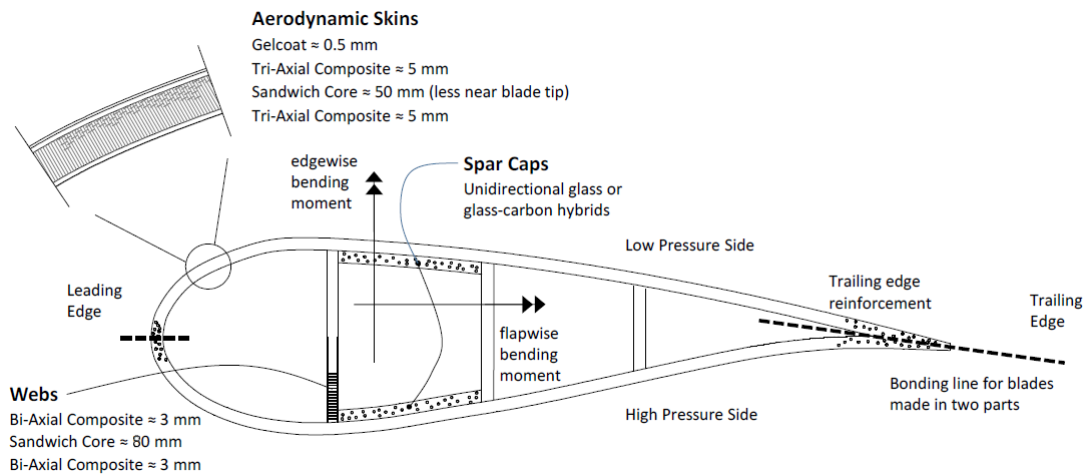


Figura 3.6: Esquema do perfil de uma pá eólica, presente em [54]

O reforço interno, apresentado como *Webbs* (membranas) na figura 3.6, trata-se normalmente de uma chapa plana que se estende ao longo de todo o comprimento da pá. No sentido funcional do estudo em questão, tal topologia torna-se ótima pois a simples implementação de chapas recortadas deste componente conseguem garantir a uniformização dos elementos a utilizar. Falta pois garantir, através de estudos que serão prostrados posteriormente, que conseguem efetivamente suprir as necessidades requeridas aos módulos em questão.

### 3.4.2 Estudo do módulo

Para a validação do material proposto é necessário conhecer as propriedades mecânicas inerentes ao mesmo. De forma a focalizar o estudo a uma abordagem sintética torna-se importante estudar apenas um tipo de pá eólica e as suas características, pois existe uma panóplia extensa de soluções pelo que iria extrapolar o intuito desta dissertação bem como os seus objetivos. Como já previamente referido, o tipo de pá em estudo trata-se do SNL - 100 - 00. Esta é uma pá de 100m de comprimento, desenvolvida e produzida pela *Sandia National Laboratories* [55], empresa americana. Desta consegue-se aproveitar então o reforço interno tal como se encontra, pois contém uma espessura constante de 86mm (80mm de espuma interior e 3mm de chapas de Saertex/EP-3 em ambos os lados) [56].

No entanto, para um total uso do material com a minimização de desperdícios, seria de pleno interesse conseguir adequar as restantes partes da pá (partes laterais, dispostas à superfície) a elementos com uma funcionalidade estrutural semelhante.

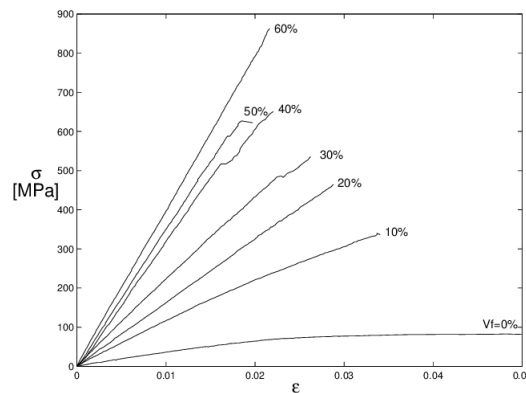
Tabela 3.3: Materiais utilizados na composição da pá SNL-100-00, e as suas especificações.

| Definição do laminado |                       |         | Direção longitudinal |           |            |              |             |                       |             |                       | Densidade           | Corte           |
|-----------------------|-----------------------|---------|----------------------|-----------|------------|--------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
|                       |                       |         | Constante elástica   |           |            |              | Tensão      |                       | Compressão  |                       |                     |                 |
| VARTM Tecido /resina  | Deposição             | $V_f$ % | $E_L$ GPa            | $E_T$ GPa | $\nu_{LT}$ | $G_{LT}$ GPa | $UTS_L$ MPa | $\varepsilon_{max}$ % | $UCS_L$ MPa | $\varepsilon_{min}$ % | $\rho$ ( $m^3/kg$ ) | $\tau_{TU}$ MPa |
| E-LT-5500 /EP-3       | $[0]_2$               | 54      | 41.8                 | 14.0      | 0.28       | 2.63         | 972         | 2.44                  | -702        | -1.53                 | 1920                | 30              |
| Saertex /EP-3         | $[+-45]_4$            | 44      | 13.6                 | 13.3      | 0.51       | 11.8         | 144         | 2.16                  | -213        | -1.80                 | 1780                | —               |
| SNL Triax             | $[+-45]_2$<br>$[0]_2$ | —       | 27.7                 | 13.65     | 0.39       | 7.2          | —           | —                     | —           | —                     | 1850                | —               |

Tabela 3.4: Propriedades dos materiais adicionais.

| Material | $E_L$ GPa | $E_T$ GPa | $G_{LT}$ GPa | $\nu_{LT}$ | Densidade ( $kg/m^3$ ) |
|----------|-----------|-----------|--------------|------------|------------------------|
| GelCoat  | 3.44      | 3.44      | 1.38         | 0.3        | 1235                   |
| Resina   | 3.5       | 3.5       | 1.4          | 0.3        | 1100                   |
| Espuma   | 0.256     | 0.256     | 0.022        | 0.3        | 200                    |

O comportamento mecânico desta fibra de vidro é semelhante aos restantes materiais compósitos. Estes são normalmente compostos por fibras, com determinados alinhamentos, onde o gráfico de tensão-deformação tem duas regiões lineares: Zona elástica e logo após o dito "joelho" a zona destrutiva. Neste tipo de materiais, perto do ponto de quebra, existe uma zona pseudo-plástica onde as fibras presentes começam a quebrar em pequenas partes. Quer isto dizer que a tensão de rutura é idêntica ao limite elástico do material [60].

Figura 3.7: Gráfico exemplo da curva Tensão-Deformação da fibra de vidro, onde  $V_f$  é a percentagem de fibra, por [57].

### 3.5 Estudo e seleção do conceito

Neste capítulo terá lugar a validação do conceito proposto e/ou possíveis adaptações do mesmo, face ao cumprimento das funções a este requeridas. Para tal, e como já fora referido na metodologia a adotar para este projeto, passará pela análise perante um processo de catalogação de possíveis falhas dos sistemas presentes bem como os efeitos que tais poderão causar. Isto traduz-se na essência da metodologia apresentada pelo FMEA.

#### 3.5.1 Conceito proposto

Idealizou-se então um sistema de chapas que, ao fazer um furo prévio em fábrica em determinadas zonas do módulo e com a posterior passagem de um elemento de ligação (por exemplo, um parafuso ou ligação *snap-fit*), conseguisse segurar um módulo em relação a outro. A envolver este elemento passante prevê-se também o uso de casquilhos, fixados nos furos dos módulos. Estes servem para assegurar a coesão da fibra de vidro nas zonas de furação de forma a evitar a sua fissuração, o que se trata de uma prática comum em casos semelhantes.



Figura 3.8: Esboço da chapa ligante.

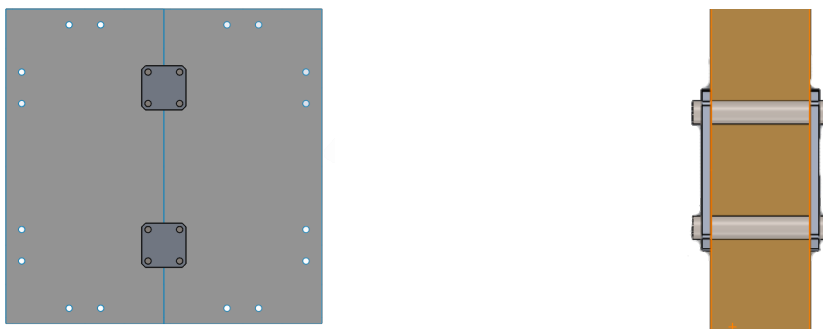


Figura 3.9: Sistema de ligação inter-placas, visto de frente e em vista lateral de corte.

Com este tipo de ligação é possível, assim, a ligação entre placas (representada na figura 3.9), cujo objetivo posterior é de constituir paredes inteiras (figura 3.10). Estas, como fora descrito, terão uma altura de 2,5m pelo que se consegue obter essa dimensão com o empilhamento de 5 módulos na disposição horizontal. Esta ainda deve prever a inserção de elementos de acesso, como portas e janelas.

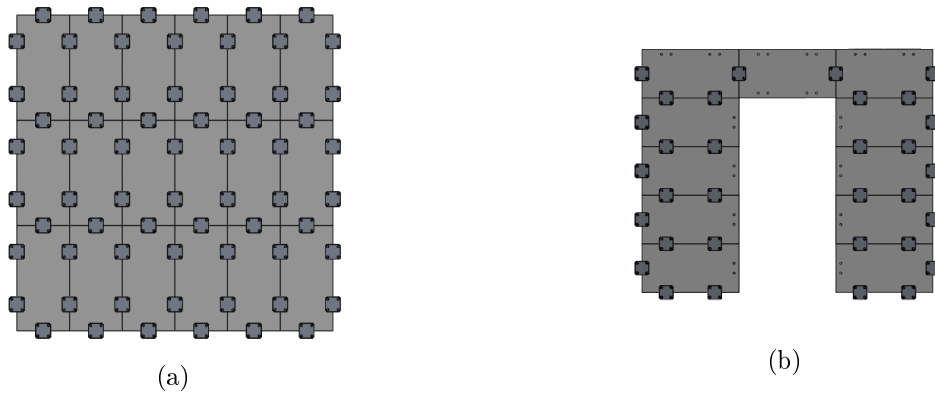


Figura 3.10: Esquema exemplo do empilhamento em altura (a) e respetiva solução para entrada (b).

Este elemento possibilita a ligação de placas paralelas, mas não consegue ligar placas em disposições perpendiculares. Para tal teve de se criar outro elemento que conseguisse ligar as placas de interação parede-teto, parede-chão e inter-paredes. Todas estas situações poderiam ser respondidas com o conjunto de elementos de ligação perpendicular apresentado na figura 3.11.

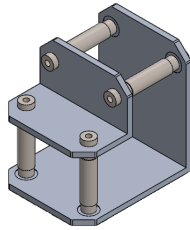


Figura 3.11: Ligação das chapas de canto, com as respetivas peças representadas.



Figura 3.12: Ligação entre paredes perpendiculares (a) e com o teto (b).

Em relação às janelas, propõe-se dois elementos standardizados de 1x0.5m. O primeiro trata-se de uma simples placa de acrílico transparente que é presa à estrutura por umas calhas de madeira através de atrito. O segundo trata-se de uma mesma chapa de

acrílico, mas com furos em duas extremidades para futuro acoplamento a uma dobradiça presente em calhas também de madeira mas com a previsão da incorporação da tal dobradiça. Tais elementos standard permitem a composição de diferentes dimensões de janelas, desde a simples incorporação de um só elemento (1x0.5m) até aos que forem necessários.

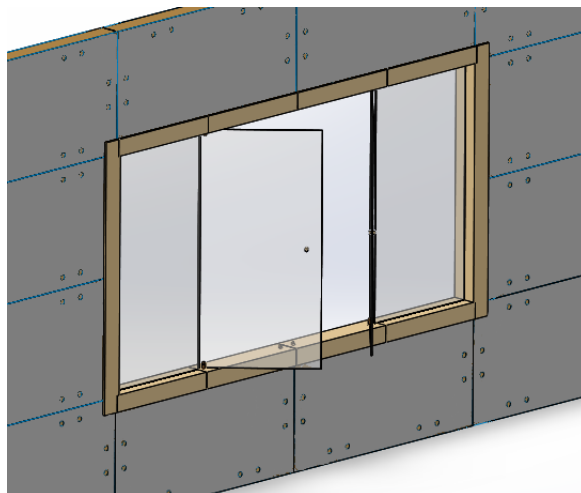


Figura 3.13: Conceito das janelas.

O elemento porta trata-se de uma chapa em composto de madeira, o que é normalmente utilizado na construção de portas interiores, com um caixilho de alojamento. É um elemento de dimensões standard (2x1m) que será incorporado no conjunto utilizando os furos passantes dos módulos como encaixes.

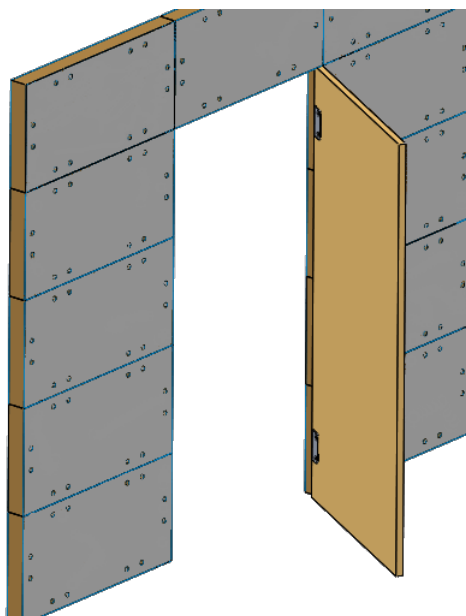


Figura 3.14: Conceito da porta.

De forma a tentar responder aos requisitos de impermeabilidade térmica e sonora,

perspetiva-se a possível implementação de elementos para esse fim, pelo que possivelmente terão de ser acoplados ao elemento de cariz estrutural. Estes poderão responder mantendo o perfil plano ao longo das placas, evitando saliências provenientes dos elementos ligantes.

Torna-se lógico fazer um estudo completo dos elementos acima descritos de forma a sustentar a sua possível utilização no elemento em desenvolvimento.

### 3.5.2 FMEA do conceito

Esta metodologia deve ser aplicada numa das primeiras fases do desenvolvimento do conceito, onde se deve ter em conta e fazer o esforço para identificar se o mesmo consegue cumprir as funções requeridas bem como numa perceção intuitiva das imperfeições no *design* do mesmo.

Este método de despistagem é de tal forma interessante pois permite identificar aspetos que vão resultar menos bem ou até mesmo de todo, pelo que permite poupar tempo e recursos e onde a solução passa pela alteração do *design* dos componentes.

Tabela 3.5: FMEA do conceito.

| Item/Função                         | Tipo de Falha Potencial                        | Causa Potencial de Falha                           | Possíveis Efeitos das Falhas               | Termos Críticos da Falha | Ação Preventiva Recomendada         |
|-------------------------------------|--|--|--|--------------------------|-------------------------------------|
| Ligação dos componentes estruturais | Resistência mecânica dos elementos de ligação  | Possível concentração de tensões                   | Deformação/rutura dos elementos de ligação | Falha maior              | Simulação e verificação do conceito |
|                                     | Resistência mecânica do módulo                 | Possível concentração de tensões                   | Colapso da estrutura                       | Falha crítica            | Simulação e verificação do conceito |
| Sistemas de vedação global          | Impermeabilidade termico/acústica comprometida | Falha de garantia de contacto efetivo entre placas | Desconforto por parte do utilizador        | Falha menor              | Garantia de vedação entre placas    |

Como é possível observar na tabela 3.5, grande parte da incerteza acerca do conceito presente reside na questão estrutural dos componentes. Um conceito deste tipo foi esboçado com base apenas no bom senso ponderado de um ponto de vista de engenharia pelo que, obviamente, torna-se necessário a confirmação dos mesmos perante a sua função.

Mediante os futuros resultados obtidos da simulação e na sua relação direta com o FMEA do conceito, torna-se absolutamente fulcral que todas as questões levantadas, com especial atenção na resistência mecânica do módulo, sejam abordadas de forma a trazerem uma sensação de segurança ao seu utilizador. Para tal, têm de cumprir com o requerido.

Resta então garantir a vedação entre módulos. Virtualmente, esta é garantida apenas com a topologia do módulo mas é sabido que no mundo real existem protuberâncias na forma em como estes são obtidos pelo que podem pôr em causa o contacto perfeito entre os mesmos. Visto isto, torna-se relevante a anexação de um elemento que consiga cobrir eventuais irregularidades entre os módulos que trariam descontinuidades no isolamento.

## Capítulo 4

# Projeto de concretização

### 4.1 Arquitetura do produto e design de sistemas

A arquitetura do produto define a disposição dos elementos do produto em vários blocos, de acordo com a sua funcionalidade. O objetivo da arquitetura do produto é definir as características de cada um desses blocos na relação de como estes interagem com os outros. Para tal, procura-se um design de sistemas cujo desenvolva os sistemas funcionais dos produtos para permitir essas ligações aos diferentes blocos de forma a atingir um produto final.

De referir que em capítulos transatos já foram apresentadas disposições referentes à situação em causa, pelo que apenas tomaram cariz representativo da funcionalidade da solução idealizada. É neste capítulo que se aprofunda a disposição e respetivas interações dos elementos em causa.

Semelhante para com todas as envergaduras a construir, é necessário definir como interagem os módulos entre si. Como já referido, cada módulo dispõe de furos passantes ao que se prevê um elemento que ligue cada chapa envolvida bem como a presença de casquilhos. Este elemento passante pode passar pela simples incorporação de uma parafuso com a respetiva porca bem como uma outra tipologia, nomeadamente ligação por *snap-fit*. Em qualquer das formas, os fatores a ter em conta na escolha ponderada de tal elemento passam pela revisão da tabela de priorização de requisitos do cliente proveniente da elaboração do QFD. Nesta é possível observar que dos fatores de maior relevância encontra-se o apelo estético, um número reduzido de peças envolvidas e a facilidade de montagem. A utilização de parafusos é uma prática comum em casos semelhantes ao presente pois garantem a coesão estrutural dos elementos, mas acarta inconvenientes associados como a saliência da cabeça do parafuso e da porca bem como a necessidade de utilização de ferramentas para a montagem e ainda a limitação dimensional do parafuso mediante a espessura do módulo. Tais limitações pedem que se criem situações que facilitem a utilização destes de forma a melhorar o desempenho deste elemento indo ao encontro da satisfação do utilizador, cujo se torna o objetivo fulcral deste trabalho.

#### 4.1.1 *Design for Assembly*

O *Design for Assembly* (DFA) traduz-se no pensamento, na fase de idealização do produto, que visa em definir uma ordem pertinente de montagem dos diferente blocos funcionais num produto final. De certa forma, e citando [1], trata-se de um documento



ilustrativo adjacente ao conjunto entregue ao cliente, que exerce a função de manual de instruções onde explica a montagem passo-a-passo.

De forma a responder às ditas ligações entre os módulos tendo em conta o DFA, tomaram-se esforços no desenvolvimento de um elemento que conseguisse responder ao problema de forma positiva. Este elemento tem de permitir que o parafuso e a respetiva porca sejam alojados evitando assim que a sua saliência se traduza num incómodo, e ainda que consiga garantir que o aperto entre as chapas. Surge então um elemento a que se pode chamar de casquilho-bucha, e este consegue alojar a cabeça do parafuso. Substituindo a porca convencional por um outro elemento adequado, é escolhida uma porca de bucha que permite a redução do comprimento do parafuso a roscar.



Figura 4.1: Representação da porca de bucha e do casquilho-bucha, respetivamente.



Figura 4.2: Representação das chapas ligadas, através das ligações roscadas.

Para sequenciar o processo de montagem, inicia-se pela definição das ligações transversais a todos as envergaduras associadas. Começa-se então introduzindo os casquilhos-bucha nos furos das chapas. De seguida, são introduzidos estes conjuntos nos módulos com o posterior aparafusamento dos parafusos nas porcas de bucha. A presença do casquilho-bucha consegue garantir que, apesar do diâmetro reduzido dos parafusos relativamente aos furos dos módulos, as chapas mantenham a sua localização idealizada.

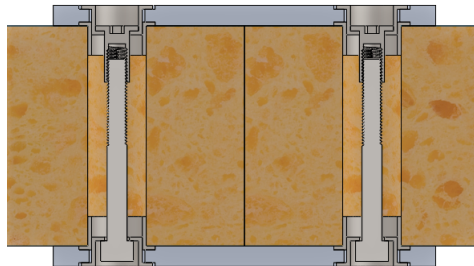


Figura 4.3: Representação dos módulos ligados, através das chapas.

### Primeira etapa de montagem

De uma maneira lógica, a primeira etapa consiste na elaboração do chão do cômodo. Para tal, dispõem-se as chapas de ligação com os casquilhos-bucha já montados ao longo da laje para o posterior encaixe dos módulos. Assim sendo, os furos dos módulos são colocados nos respetivos casquilhos-bucha de forma a criar um assoalhado com o posterior aparafusamento do parafuso na porca, através do uso de chave em cada elemento roscado.

Só com o elemento chão completo é que se torna possível a edificação da restante divisão pelo que, e não apenas neste elemento, deve ser garantido que todos os parafusos estão apertados corretamente.

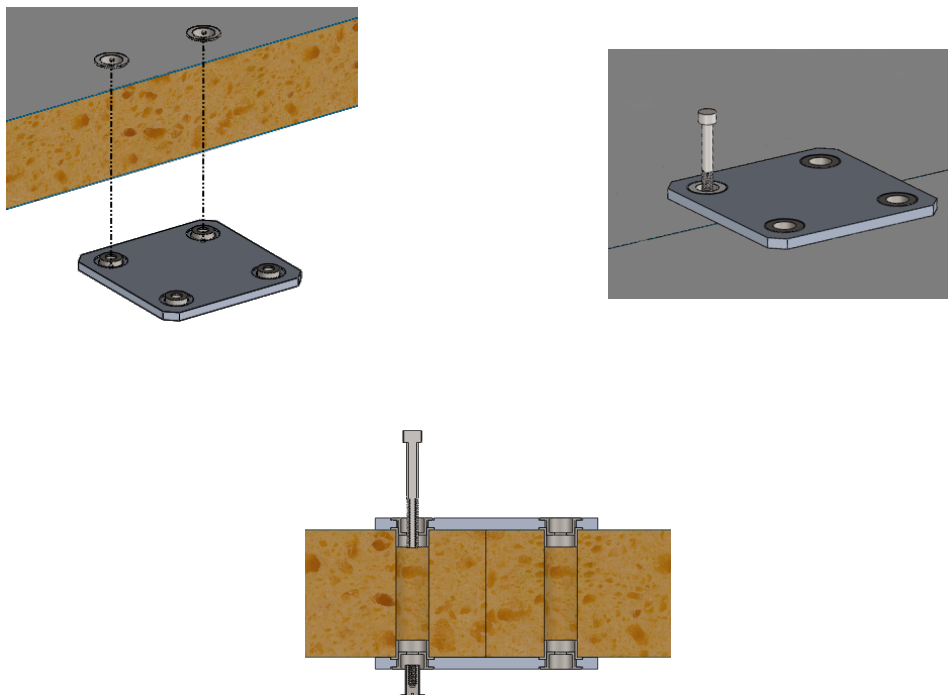


Figura 4.5: Representação da montagem do chão.

### Segunda etapa de montagem

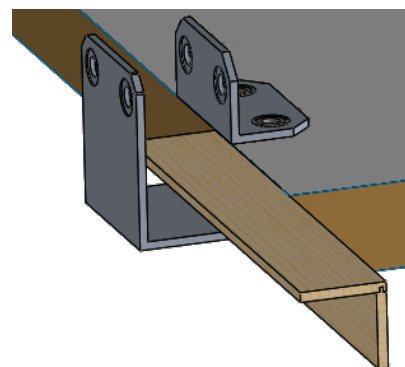
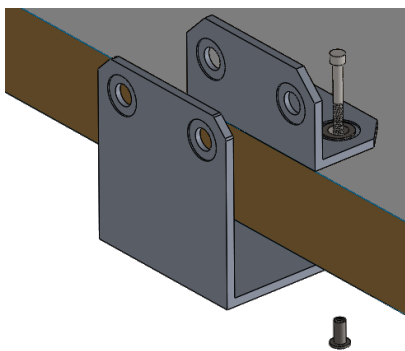
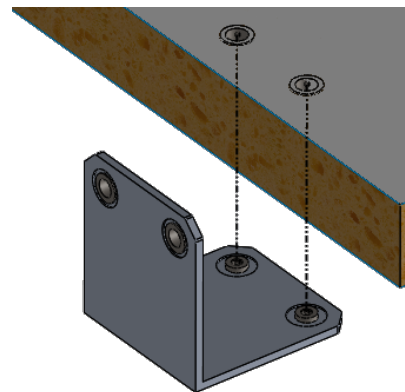
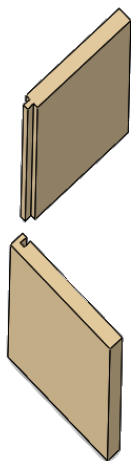
Estando toda a área de chão pretendida encaixada, ligam-se então as chapas de canto para posterior encaixe dos elementos parede. Mais uma vez, após o encaixe dos casquilhos-bucha nas chapas, posicionam-se as chapas de canto longas e curtas nos respetivos furos do módulo pertencente ao chão. Dá-se a passagem da calha de vedação, posicionando-se no sítio previsto. Finalmente, insere-se o módulo constituinte da parede com uma mesma roscagem entre o parafuso-porca.

Por questões de facilidade de montagem, prevê-se que a montagem da parede se dê por camadas. Estas camadas consistem em filas de 1 módulo de altura em todo o perímetro do chão. A interação entre paredes perpendiculares dá-se da mesma forma que a interação entre o chão e a parede. Após esta camada estar totalmente composta é que se procede para a seguinte camada de módulos. A montagem é desta forma disposta para

se tornar mais fácil, ao invés do empilhamento em altura que traria problemas como a capacidade de ser edificada por uma pessoa só ou até mesmo por questões de poupança de tempo em mobilidade excessiva.

De lembrar que é nesta fase da montagem que se deve ter em conta onde estará disposta, se pretendido, a janela e a porta da divisão. Tal é deixando no seu lugar um espaço vazio, de dimensões ao critério do utilizado, para a incorporação das mesmas.

Em relação a todas as ligações perpendiculares, está prevista a incorporação de um elemento não-estruturante para a vedação das mesmas. Este trata-se de duas tábuas de madeira, com a mesma espessura, que juntas criam um elemento em "L" com o posterior acoplamento nas extremidades das envergaduras. A sua inserção é dada sempre que se pretenda formar uma ligação perpendicular entre envergaduras pelo que é inserido no instante onde se incorporam as chapas perpendiculares. A sua coesão com os módulos é respondida com o atrito entre este elemento e pela pressão exercida pelas chapas perpendiculares na direção das extremidades dos módulos, visto que tal elemento tem um peso relativamente baixo (250g por conjunto).



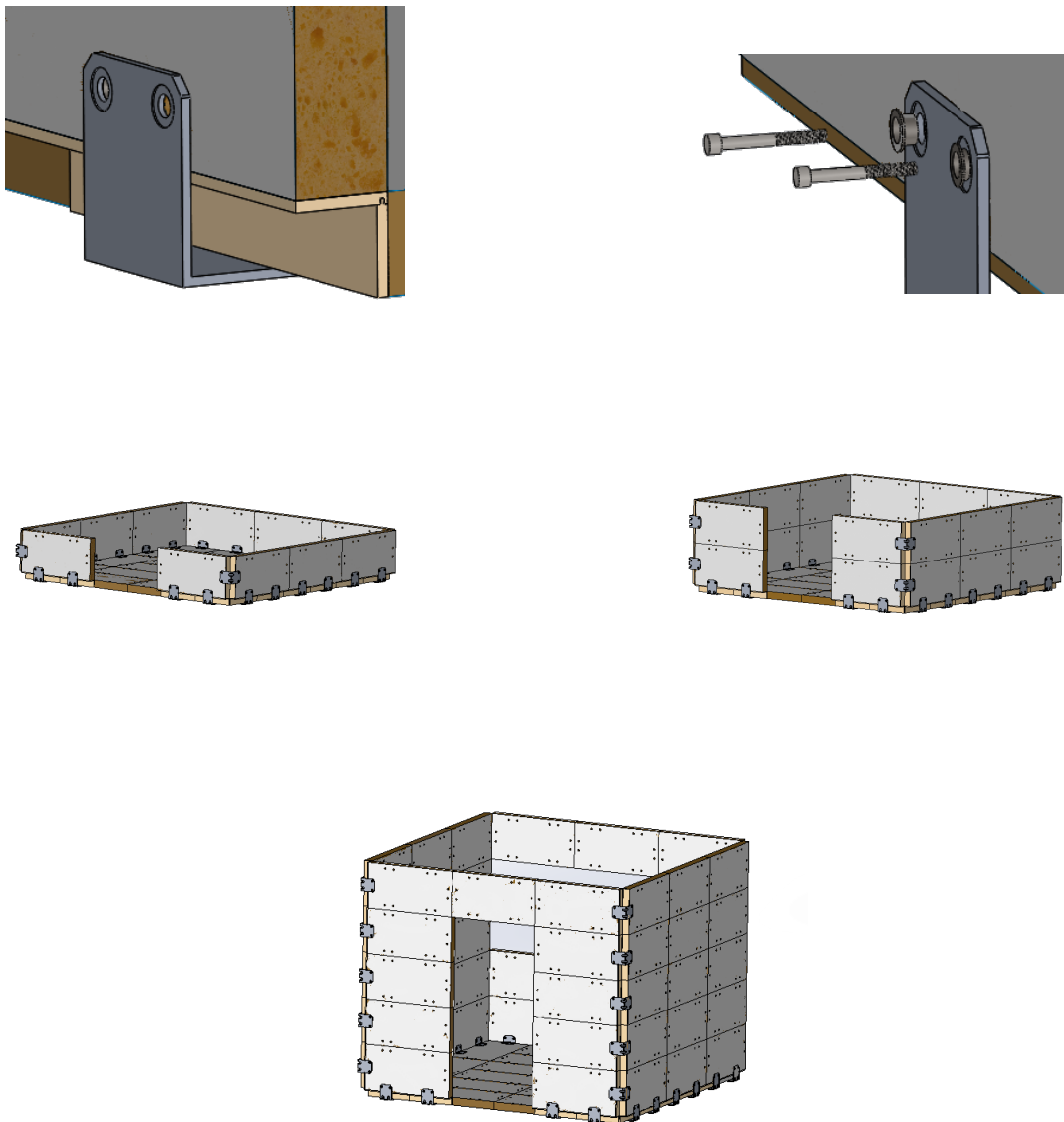


Figura 4.10: Montagem das paredes.

### Terceira etapa de montagem

A terceira e última sequência de montagem consiste na incorporação do teto na estrutura final. Esta só será possível com a prévia montagem das chapas de canto nas extremidades superiores de todas as paredes já montadas.

Começa-se pela colocação das calhas de vedação nos respetivos lugares. De seguida, colocam-se os módulos nos cantos onde cada um destes tem 3 chapas em contacto. Fazem-se passar os parafusos, roscando-os nas respetivas porcas. Objetiva-se que esta etapa acabe quando existir 2 filas completas dispostas em lados opostos.

De seguida, procede-se a montagem de módulos nos lados que não foram compostos na etapa anterior. Trata-se de uma montagem igualmente individual de módulos que resulta da ligação destes com as chapas de canto e com a posterior associação do conjunto de chapas planas, que servirá para coesão entre os módulos que compõe o teto.

Estando constituído o arco exterior, dá-se então o enchimento do interior do teto. É montado de forma idêntica à etapa anterior, discernindo da fase de ligação com as chapas de canto.

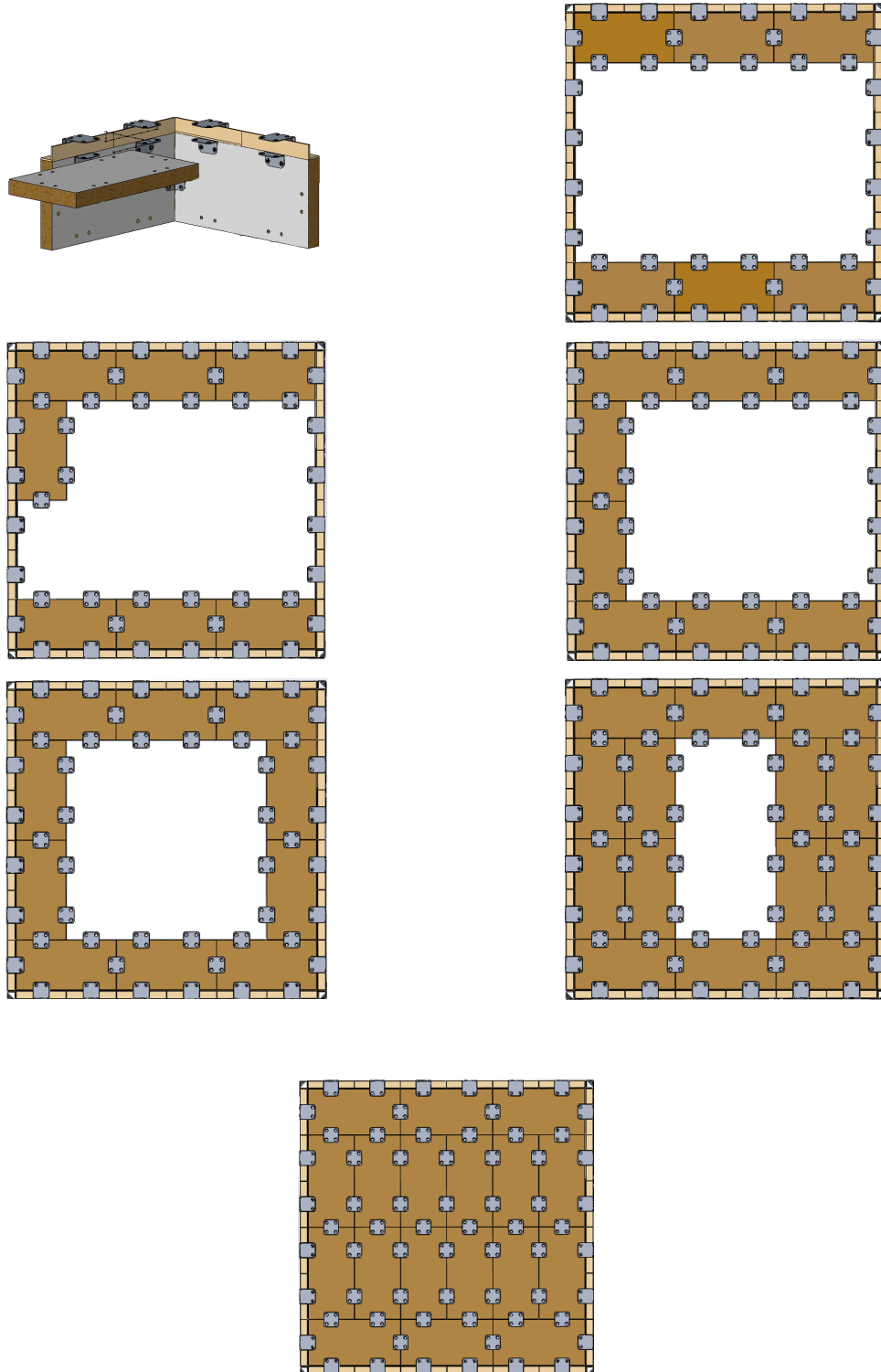
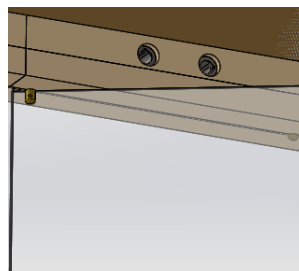
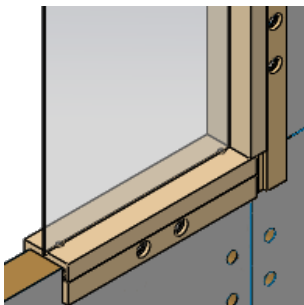
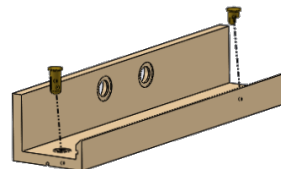
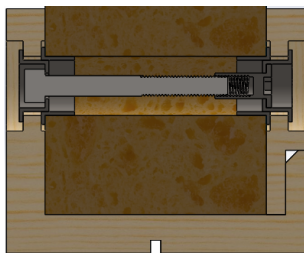
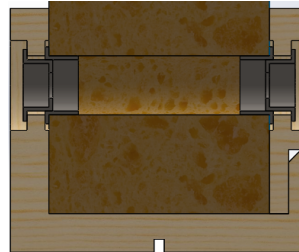
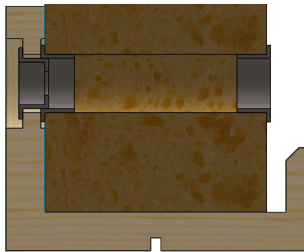


Figura 4.12: Representação da montagem do teto.

### Montagem de janelas e portas

A montagem das janelas segue uma filosofia igualmente sequencial. Primeiro devem ser montadas as calhas de suporte dos elementos fixos (janelas que não abrem) com a posterior montagem das calhas para os elementos móveis (janelas que abrem). A montagem das calhas dá-se com a passagem de casquilhos-bucha nas mesmas, com a posterior inserção dos elementos roscados. Em relação às calhas do elemento fixo é finalizada a sua montagem com a passagem das chapas de acrílico, deslizando pelas suas ranhuras. As calhas que suportam os elementos móveis apenas diferem na inserção dos pinos-dobradiças que permitem montar posteriormente as janelas que abrem, através da inserção de um pino pelos furos presentes para o efeito. Por final é montado o puxador através da passagem de um parafuso.



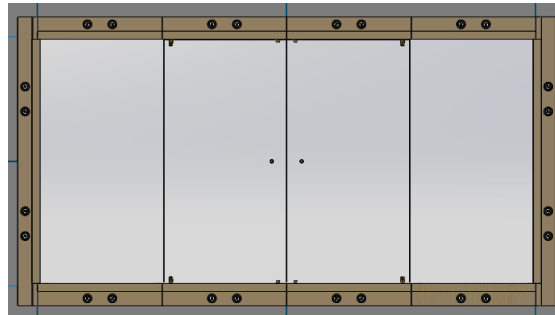
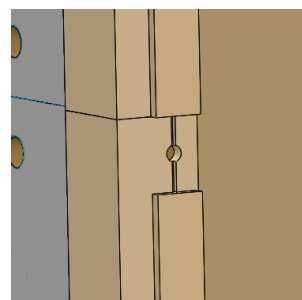
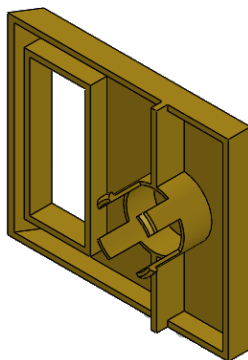
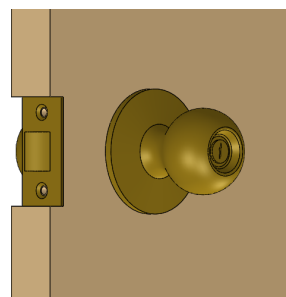


Figura 4.16: Montagem das janelas.

A porta já vem completa, com os entalhes necessários para a sua colocação bem como para a colocação da respetiva fechadura e puxador. É procedida a montagem das calhas de aro, igualmente presentes na composição da janela, que servem para unir a porta à restante estrutura através de dobradiças. Esta tem uma peculiaridade pois duas das calhas possuem entalhes e furos para a colocação das dobradiças. Posteriormente são colocadas as calhas que servem de batente nas ranhuras das calhas de suporte, ranhuras estas que serviam para a passagem dos vidros na janela. É dado espaço para a inserção da chapa de fechadura nas calhas da parede deslizando as calhas-batente para a acomodação. Esta é montada por inserção da *snap-fit*, presente na fechadura, no mesmo orifício que servia para a passagem do pino-dobradiça das janelas.



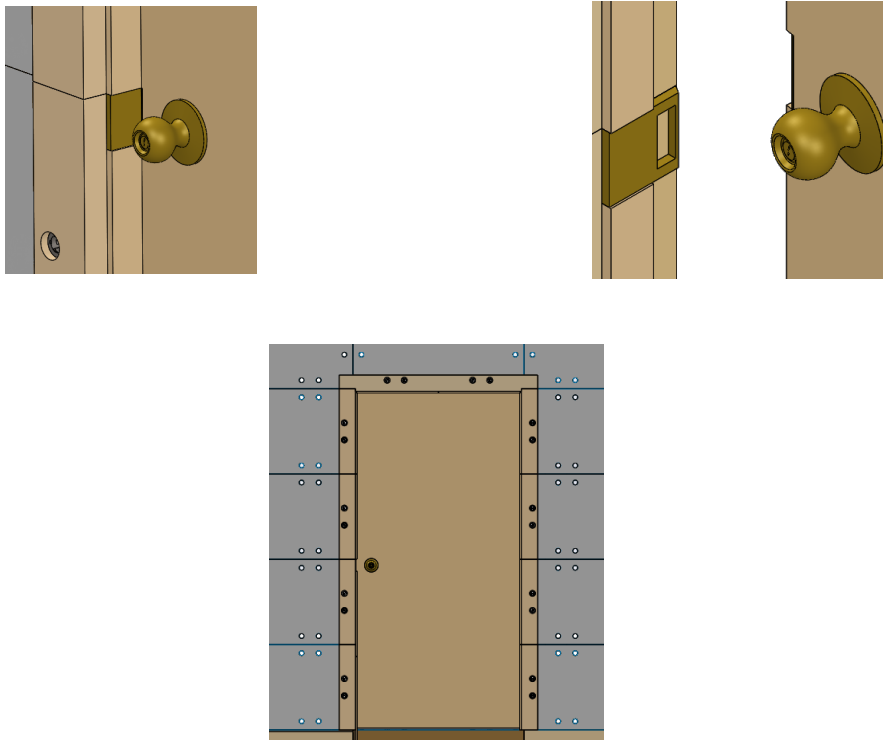


Figura 4.20: Montagem da porta.

## 4.2 Validação do conceito

### 4.2.1 Análise estrutural do conceito

De forma a validar a presente solução proposta torna-se necessária uma ratificação do conceito com recorrência a ferramentas de simulação. Para tal começa-se pela modelação das peças constituintes do atual conceito, através do software de CAD *Solid Works*.

É importante conhecer as situações às quais os componentes e as suas respetivas disposições vão estar sujeitos de forma a estabelecer os limites iterativos. Quer isto dizer que nesta fase pretende-se dividir as simulações em 4 categorias: Categoria de chão, paredes, teto e elementos de ligação. Cada uma destas terá solicitações características pelo que serão feitos ensaios distintos. De denotar que, por motivos de salvaguarda quer de tempo quer de capacidade de processamento, as simulações apresentam-se de forma simplificada sendo que foi atribuído um regime de contacto por colagem (*Bounded*) às interações entre os elementos. Contudo, tal simplificação pretende não apresentar discrepâncias estruturais com a topologia idealizada. Um outro pressuposto a ter em conta foi a utilização da aceleração gravítica o seu valor arredondado de  $10 \text{ m/s}^2$ , que pouco faz diferença nos resultados finais.

Todas as simulações presentes neste capítulo servem para representação das grandezas das tensões associadas, pois é muito complicado simular materiais compósitos devido às suas características complexas. Uma outra condicionante destes resultados assenta na falta de informação da disposição das camadas de compósito pelo que, para efeitos de simulação, foram arbitrados. Tal definição agrava ainda mais a incerteza dos valores obtidos.



Para início de simulação recorreu-se a um estudo *Static* para todos os elementos a analisar. Esses elementos foram divididos em 3 categorias na análise: Elementos sólidos (caso das chapas de ligação), elementos rígidos (caso dos pinos) e elementos casca (caso da fibra de vidro nos módulos). As chapas são simuladas recorrendo a elementos sólidos pois a sua configuração o permite e ainda é de interesse a validação do seu comportamento enquanto sólido. Os pinos nestas simulações servem apenas como elemento de coesão entre as chapas e os módulos pelo que o seu comportamento mecânico não interessa, daí a serem tratados como elementos rígidos. Os módulos são reduzidos ao seu elemento estrutural (placas de fibra de vidro) pelo que são analisados recorrendo a uma configuração do tipo casca (*Shell*) que é uma configuração usual na análise de compósitos.

Tabela 4.1: Parametrização técnica envolvida na análise estrutural

| Elemento | Tipos de elemento em estudo | Propriedades     |                       |                          |
|----------|-----------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|
|          |                             | Material         | Módulo de Young (GPa) | Tensão de cedência (MPa) |
| Chapas   | Sólido                      | Alumínio 6063 T5 | 69                    | 145                      |
| Pernos   | Rígido                      | -                | -                     | -                        |
| Módulos  | Casca                       | Saertex/EP-3     | 13.6                  | 144                      |

De modo transversal a todas as disposições é considerado para início de análise estrutural que os furos passantes dos módulos têm 20mm de diâmetro. Toma-se este valor pois, além de ser uma medida normalizada relativamente à furação, impõe-se que o comprimento máximo da broca seja de 5 vezes o seu diâmetro. Tendo os módulos espessuras de 86mm, consegue-se garantir que uma broca de 20mm de diâmetro consiga resolver o assunto.

### Elemento chão

O elemento chão é de facto o mais problemático. Assim o é pois além de ter em conta peso dos componentes pertencentes, também deve ser dimensionado para suportar cargas exteriores aos mesmos. Estas são provenientes do utilizador como de potencial mobília incorporada. Por pesquisa da legislação em vigor, e citando [61], deve ser tomada em consideração uma carga vertical de  $150 \text{ kg/m}^2$  além do próprio peso dos constituintes. Esta é a carga referente ao dimensionamento de lajes interiores.

É possível prever que todas as chapas do chão estão em contacto com a laje-mãe, o que pode traduzir numa simplificação das simulações. Estas reduzem-se ao ponto de bastar simular um módulo com as chapas a este associadas pelo que esta mesma configuração, e posteriores resultados, serão idênticos para os restantes módulos que compõe o chão.

A carga a utilizar na simulação é de  $1800 \text{ N/m}^2$ . Esta surge dos cerca de  $300 \text{ N/m}^2$  ( $30 \text{ kg/m}^2$  que se trata do peso dos módulos) somados aos  $1500 \text{ N}$  proveniente da legislação.

As condições de fronteira resumem-se a apoios móveis nos planos em **X** e **Y** sendo que são aplicados nas faces das chapas em contacto com a laje.

Feita a análise, é possível ver na figura 4.21 as concentrações de tensão nas placas de fibra de vidro e respetivas deformações.

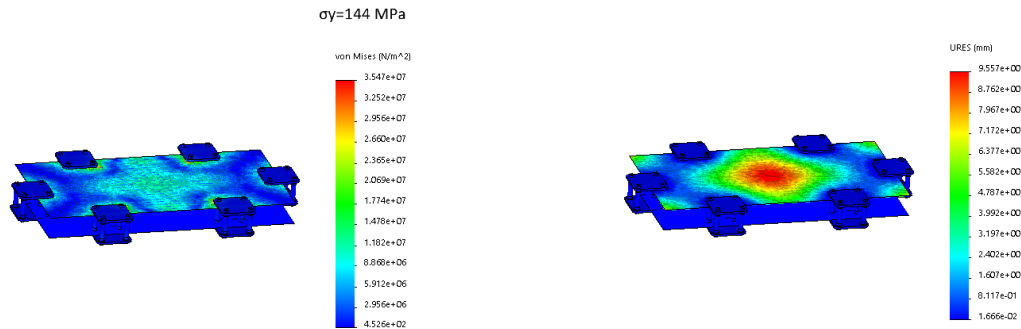


Figura 4.21: Análise da representação do chão, com as tensões e os deslocamentos representadas.

### Elemento parede

O elemento parede torna-se mais simples do ponto de vista de análise pois pode ser dividida em 3 conjuntos com 1 m de largura. No entanto está sujeita a dois esforços: Ao próprio peso dos elementos constituintes da parede e ao peso do teto. O peso da envergadura faz-se sentir paralelamente à mesma e os elementos mais inferiores são os que sofrem com a maior carga. Esta perfaz um total do peso de 5 módulos (cerca de 750 N).

O peso do teto cria momento em toda a parede. Nesta análise foi considerado que o teto está apoiado em 12 elementos simplificados de parede (3 colunas de elementos por cada uma das 4 paredes) resultando na divisão do peso total do teto (270 kg) em 12 partes, o que totaliza em 225 N que o teto exerce por cada simplificação de parede a analisar (112.5 N por cada chapa).

Para motivos de simplificação do processamento na análise estrutural, cada simplificação de parede (2.5x1m) foi dividida a metade da largura com respetiva simetria ditada nas configurações do estudo em questão. As condições de fronteira aplicadas presumem encastres nas chapas perpendiculares, adjacentes ao chão, pois tal pode ser justificado com a anexação dos restantes componentes da divisória e consequente fixação dos descritos elementos.

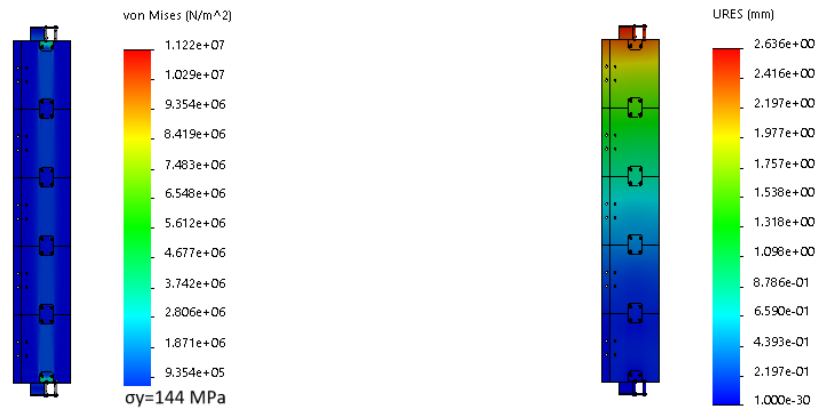


Figura 4.22: Análise da representação da 1/6 de parede suscetível ao próprio peso e ao peso do teto, com as tensões e os deslocamentos representados.

A situação imediatamente apresentada não corresponde à verdade total. Está previsto que nas paredes possa ser incorporado um elemento que sirva como porta para o habitáculo bem como uma janela. Mediante isto, torna-se necessário proceder à corroboração de tal previsão através da análise estrutural de tal situação. Mais uma vez nas bases são atribuídas condições de fronteira e nos elementos superiores à parede, onde está prevista a sua ligação com o teto, as cargas associadas. Estas últimas tomam o valor de 112.5 N por chapa, o que resulta em 225 N por cada terço de parede. Este valor surge mais uma vez do peso total de 1/12 de teto. Falta então adicionar o peso da própria envergadura pelo que toma valores próprios consoante a zona de análise em questão, pois a carga resulta do volume dos módulos presentes. Sendo assim onde a parede está completa aplica-se uma carga de 750 N (375 N por chapa), e onde tem apenas um módulo anexado ao teto aplica-se uma carga de 150 N (75 N por chapa).

O caso da janela é um caso especial. Esta não tem uma dimensão definida pelo que foi arbitrada uma dimensão de  $1 \times 2m$ . De igual forma ao caso da parede com porta, onde a parede é completa, foi aplicada uma carga de 375 N (provenientes do empilhamento de 2.5 módulos) e uma carga de 150 N onde existe apenas um módulo anexado ao teto (75 N por chapa).

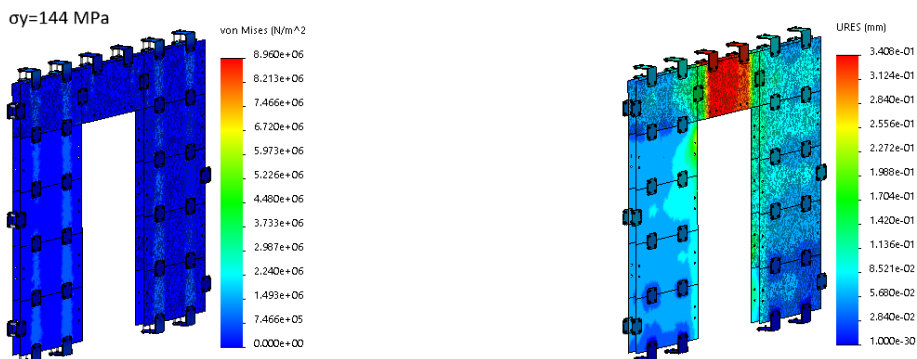


Figura 4.23: Análise da representação da parede com entrada, com as tensões e os deslocamentos representados.



Figura 4.24: Análise da representação da parede com janela, com as tensões e os deslocamentos representados.

### Elemento teto

O teto é retratado como sendo um vão suportado pelas paredes adjacentes. Como fora verificado na análise das paredes, estas aguentam com o teto. Isto é importante na definição dos apoios para a simulação do teto. Por parametrização da análise em vista, estes foram encastrados nas paredes através dos elementos de ligação passantes.

O teto está apenas solicitado ao seu próprio peso, ou seja cerca de  $300 \text{ N/m}^2$ .

Por motivos de salvaguarda na capacidade de processamento de tal vão, este foi reduzido a 1/4 com as posteriores simetrias de forma a completar o elemento para uma correta simulação.

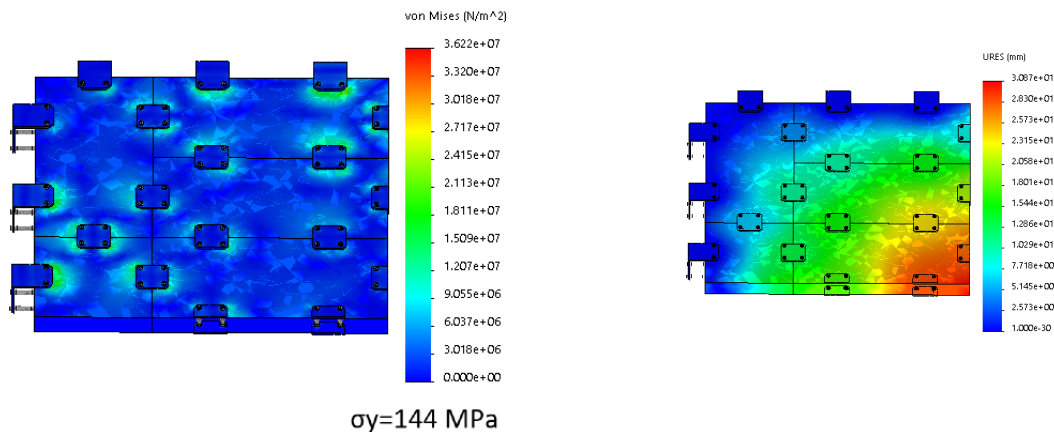


Figura 4.25: Análise da representação do teto, com as tensões e os deslocamentos representados.

Finalizadas as análises estruturais, torna-se necessário proceder à sua análise. Esta presenteia-se na tabela 4.2, onde é possível observar que a tensão de Von Misses exercida no módulo distancia-se da sua tensão de cedência. É também possível denotar que a tensão sofrida pelas chapas presentes fica muito abaixo da sua tensão de cedência, ao que leva a especular futuros *re-designs* da mesma de forma a tornar-la mais simples.

Existe, no entanto, um resultado que carece de uma diferente observação. A deformação máxima do elemento chão exprime, como flecha máxima, uma deformação de 9.57 mm. Relacionando esta deformação com a menor distância presente (500mm de largura do módulo), a deformação presente no módulo de chão é de cerca de 2%. Esta não trará desconforto ao utilizador uma vez que não se trata de um grande deslocamento da posição inicial. De referir que a simulação não previa que estes estariam montados entre si, numa espécie de malha, que poderá reduzir os deslocamentos das chapas e a respetiva deformação máxima. Uma outra observação apresenta que a distância entre a face do módulo e o chão é de 8mm pelo que esse será o maior deslocamento. A tudo isto insere-se que a carga imposta na análise refere-se à mesma definida pela lei sendo que esta é tomada em conta presumindo o pior caso possível, caso este que numa normal utilização não é expectável de acontecer. No caso do teto a flecha máxima fica-se pelos 1%, algo que não se traduz num grande incómodo.

No que diz respeito ao diâmetro de furo atribuído (20mm), este não se reflete num problema estrutural. Normalmente ao trabalhar com placas de fibra de vidro é usual aumentar o diâmetro do furo de forma a reduzir a concentração de tensões em redor do mesmo, evitando assim fissuração do elemento com a consequente invalidez estrutural.

Tabela 4.2: Valores obtidos da análise estrutural, referente aos módulos.

| Tipo de elemento                       | Pressão ( $N/m^2$ ) | Carga (N)        | Tensão de Cedência (MPa) | Tensão de Von Mises (MPa) | Deformação Máxima (mm) | Strain (mm/mm) |
|--|---------------------|------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|----------------|
| Chão                                   | 1800                | -                | 144                      | 35.4                      | 9.57                   | 1.44E-02       |
| Parede (Peso do teto com próprio peso) | -                   | 112.5 + 375      | 144                      | 11.2                      | 2.64                   | 1.32E-03       |
| Parede c/porta                         | -                   | 112.5 + 375 + 75 | 144                      | 8.9                       | 0.34                   | 1.3E-03        |
| Parede c/janela                        | -                   | 112.5 + 375 + 75 | 144                      | 13.1                      | 1.32                   | 2.48E-03       |
| Teto                                   | 300                 | -                | 144                      | 36.2                      | 31                     | 7.86E-03       |

### Elementos de ligação

Como exposto no capítulo 4.1.1, foi proposto um elemento de ligação do tipo parafuso-porca de bucha. De forma a obter um limite base para a formulação das dimensões dos elementos a tomar, foram utilizados diâmetros reduzidos obtidos por iteração dos mesmos. Quer isto dizer que os diâmetros foram reduzidos ao ponto de se conseguirem validar, sendo que a posterior utilização de diâmetros superiores dá-se por validada. Tratam-se então de um parafuso de cabeça cilíndrica de oco hexagonal ISO 4762-M6x60-8.8 e de uma porca de bucha RVS303 M6, com ambas tensões de cedência de 230 MPa e tensões de cedência ao corte de 122.25 MPa. Estes, englobados no conjunto das chapas com 4mm de espessura, estarão dispostos novamente a 3 tipos de esforços: Esforços provenientes da sua incorporação no conjunto teto, chão e no conjunto da parede.

De forma a validar este conjunto de elementos foram repetidas as análises respetivas às disposições previamente apresentadas, mas com ligeiras alterações. Nos casos anteriores os pinos apresentavam-se como elementos rígidos pois o objetivo das simulações era verificar se as placas de fibra de vidro presentes nos módulos aguentavam com as solicita-

ções. Nestas novas análises estruturais, e com o objetivo de testar a viabilidade da ligação idealizada, foram as placas que tomaram cariz de elemento rígido. Além disto, em algumas das envergaduras procedeu-se à subdivisão dos elementos completos em unidades representativas com as respetivas simetrias. Apresentam-se abaixo as figuras resultantes dos respetivos ensaios.

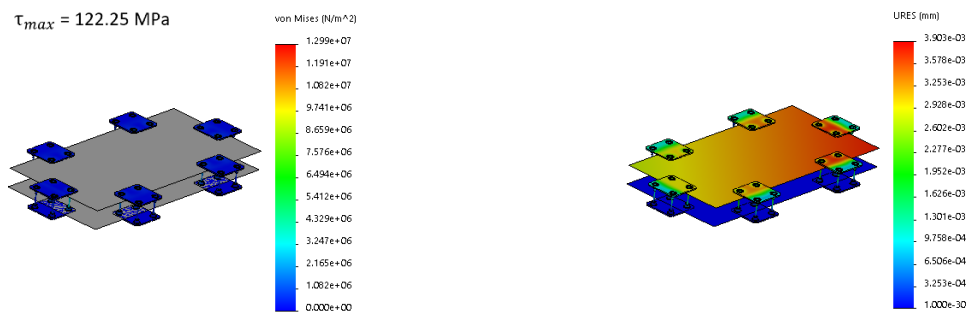


Figura 4.26: Análise da representação do conjunto referente ao chão, com as tensões e os deslocamentos representados.

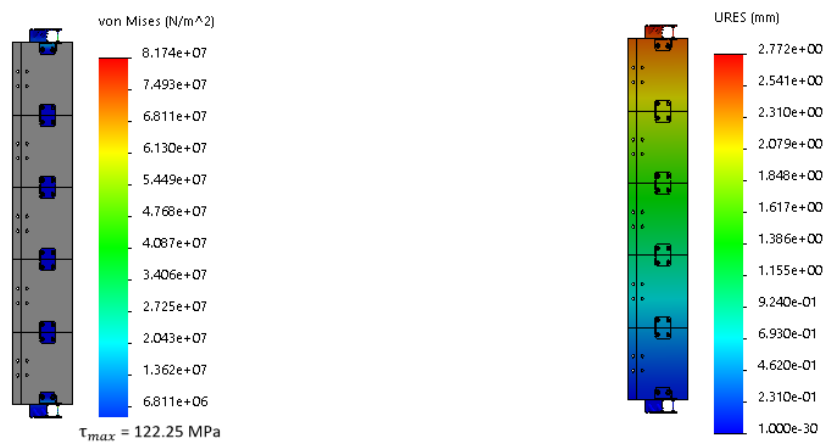


Figura 4.27: Análise da representação do conjunto referente à parede, com as tensões e os deslocamentos representados.

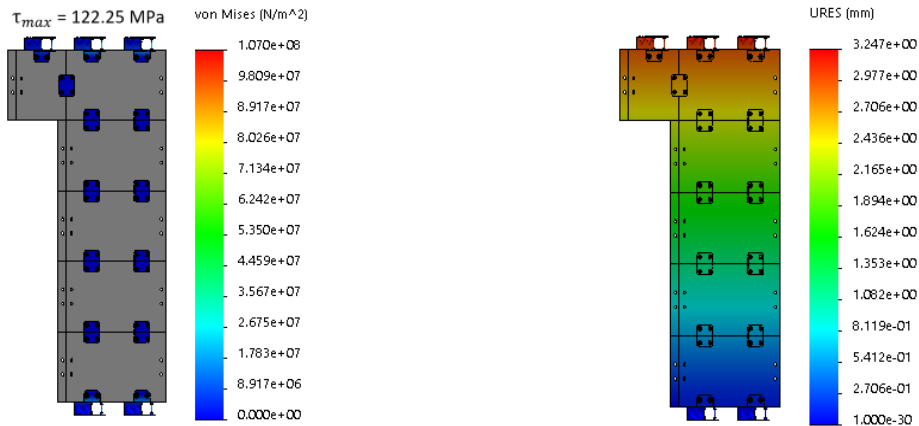


Figura 4.28: Análise da representação do conjunto referente à parede com porta, com as tensões e os deslocamentos representados.

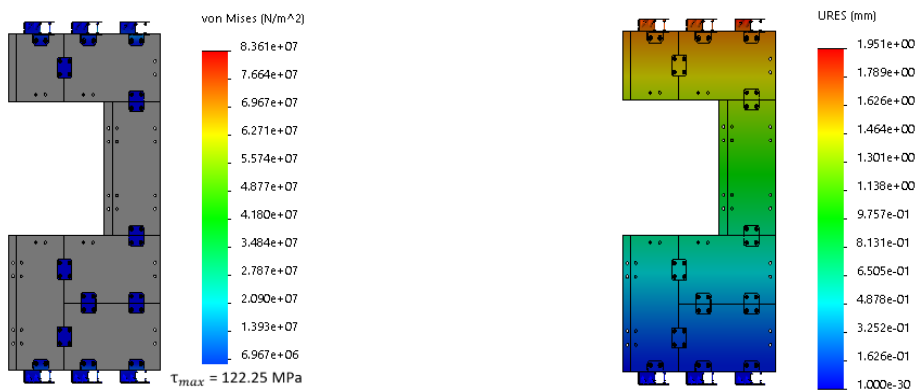


Figura 4.29: Análise da representação do conjunto referente à parede com janela, com as tensões e os deslocamentos representados.

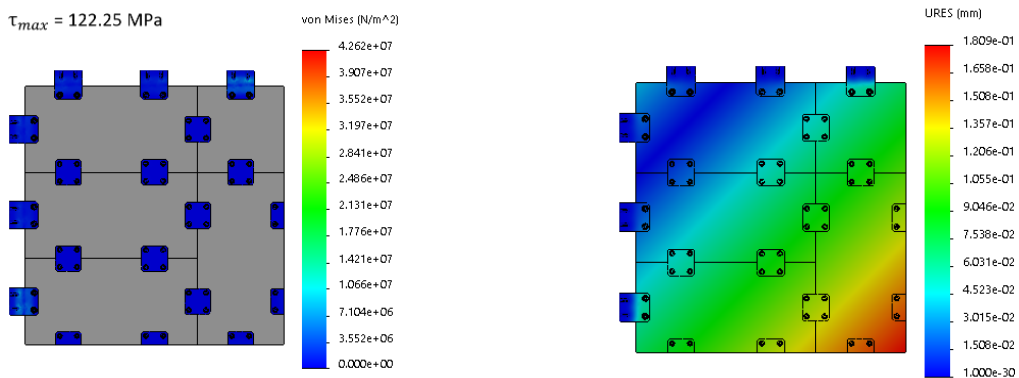


Figura 4.30: Análise da representação do conjunto referente ao teto, com as tensões e os deslocamentos representados.

Tabela 4.3: Resultados da análise estrutural dos elementos ligantes.

| Tipo de elemento | Pressão ( $N/m^2$ ) | Carga (N)    | Tensão de Cedência (MPa) | Tensão de Von Misses (MPa) | Tensão de Cedência ao Corte (MPa) | Tensão de Corte (MPa) | Deformação Máxima (mm) | Strain (mm/mm) |
|------------------|---------------------|--------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| Chão             | 1800                | -            | 230                      | 12.9                       | 122.25                            | 4.65                  | 3.9E-03                | 3.64E-05       |
| Parede           | -                   | 112.5+375    | 230                      | 81.7                       | 122.25                            | 17.68                 | 2.77                   | 3.47E-04       |
| Parede c/porta   | -                   | 112.5+375+75 | 230                      | 107                        | 122.25                            | 25.51                 | 3.24                   | 4.02E-04       |
| Parede c/janela  | -                   | 112.5+375+75 | 230                      | 83.6                       | 122.25                            | 25.72                 | 1.95                   | 2.29E-04       |
| Teto             | 300                 | -            | 230                      | 42.6                       | 122.25                            | 15.62                 | 0.18                   | 1.56E-04       |

Por análise da tabela 4.3 é possível observar que os elementos de ligação conseguem responder de forma positiva às solicitações a eles impostos. As tensões de corte estão associadas aos parafusos, uma vez que a carga resulta neste tipo de solicitação. Seria possível reduzir o diâmetro dos parafusos presentes devido à margem de manobra entre os valores obtidos com as respetivas tensões de cedência. No entanto, a redução dos mesmos diâmetros traria inconvenientes na montagem dos conjuntos pelo que é então estabelecido um diâmetro de 6mm como o menor diâmetro possível.

### 4.3 FMEA de projeto

O FMEA de projeto está relacionado com as falhas do produto finalizado, referindo as suas causas e consequências bem como apontando para as sua correções. O *timing* desta análise é importante pois é com a ajuda dos resultados aqui obtidos que se conseguem corrigir os problemas do projeto antes de partir para as etapas de produção ou posteriores desenvolvimentos, onde os custos associados à correção são superiores.

Por observação da tabela do FMEA de projeto é possível verificar algumas falhas que surgiram bem como a persistência de falhas que já se previam no FMEA de conceito. A solução proposta para o problema defendia o uso de um casquilho-bucha personalizado para funcionalidade do mesmo onde passaria, pelo mesmo, um parafuso com a posterior roscagem numa porca de bucha. Esta operação torna-se difícil pois, em primeira instância, o parafuso é alojado na cavidade do casquilho-bucha antes do seu aperto, e devido ao comprimento que este tem de atravessar torna-se difícil garantir o seu posicionamento para aperto na porca. Um outro problema não identificado foi a falta de sistemas de iluminação da divisória. Visto tratar-se de uma divisão fechada, faz todo o sentido que esta tenha elementos de iluminação próprios.

Uma falha já presente era respondida pela incorporação de calhas em L para garantir o fecho dos módulos. De facto essa solução garantia o fecho dos módulos que fossem ligeiramente curvos, uma vez que se torna difícil garantir que estes sejam completamente planos pois tratam-se de material reaproveitado. No entanto essa solução não conseguia garantir o contacto efetivo caso o corte dos módulos não fosse completamente reto.



Tabela 4.4: FMEA de projeto.

| <b>Item/Função</b>                                   | <b>Tipo de Falha Potencial</b>                          | <b>Causa Potencial de Falha</b>       | <b>Possíveis Efeitos das Falhas</b>            | <b>Termos Críticos da Falha</b> | <b>Ação Preventiva Recomendada</b>               |
|--|---|---------------------------------------|--|---------------------------------|--|
| Casquilho-bucha/<br>Suporte e alojamento do parafuso | Falta de garantia na concentricidade do parafuso        | Sistema de ligação mal idealizado     | Dificuldade na montagem                        | Falha Maior                     | Adaptação/<br>criação de novo sistema de ligação |
| Porca de bucha/<br>Aperto do parafuso                | Rotação em torno de si próprio aquando o aparafusamento | Sistema de ligação mal idealizado     | Dificuldade na montagem                        | Falha Maior                     | Adaptação/<br>criação de novo sistema de ligação |
| Janelas/<br>Passagem das chapas de acrílico          | Dificuldade na colocação das chapas de acrílico         | Ângulos de entrada muito apertados    | Impossibilidade de montagem do elemento janela | Falha Maior                     | Adaptação dos elementos calhas para o efeito     |
| Calhas/<br>Vedação                                   | Falta de garantia de isolamento                         | Distorção no corte dos módulos        | Conforto reduzido                              | Falha Menor                     | Adaptação/<br>criação de elementos para o efeito |
| Chão/<br>Suporte do utilizador                       | Falha na continuidade plana do chão                     | Desnível entre as chapas e os módulos | Instabilidade do utilizador                    | Falha Crítica                   | Adaptação/<br>criação de cobertura para o chão   |
| Lâmpada/<br>Iluminação do espaço                     | Falta de luz no interior da divisória                   | Falha na previsão do elemento         | Visibilidade reduzida                          | Falha Crítica                   | Adaptação/<br>criação de sistemas de iluminação  |

## Capítulo 5

# Projeto de Detalhe

Neste capítulo é apresentado o Projeto de Detalhe, proveniente do Projeto de Concretização com as devidas retificações. É nesta secção que se expõe o projeto efetivamente concebido, com as devidas alterações necessárias para que o mesmo suceda. Para tal todo o projeto passa pela refinação das escolhas dos materiais utilizados bem como todos os processos de fabrico a estes inerentes. Numa etapa final, será disposto todo o projeto em foto-realismo, para uma melhor perceção do produto acabado.

### 5.1 Seleção do conceito final

As dimensões base que podem ser adotadas para o dimensionamento do conjunto foram obtidas através da análise estrutural, presente no capítulo anterior. Não se tratam das menores dimensões no domínio estrutural possível mas sim as menores consoante a sua capacidade de montagem. Assim, e de forma a tornar o conjunto de aperto inter-módulos mais eficiente, é tomada uma reavaliação dos elementos presentes bem como na sua topologia.

Numa primeira instância foi considerado um diâmetro de furo dos módulos de 20mm. Este foi analisado e tido em conta como um diâmetro mínimo para que a coesão das chapas de fibra de vidro não fosse comprometida. Assim e de maneira a garantir que a mesma não seja comprometida, os furos passam a ter um diâmetro de 25mm sendo que esta alteração aumenta a área de contacto dos mesmos com a conseqüente redução das tensões concentradas. Esta alteração leva a que os casquilhos associados também tenham de ser alterados, passando para um diâmetro exterior de 25mm e 1.5mm de espessura/altura. Esta mudança leva a que a espessura das chapas ligantes seja alterada para os incluir, algo que não trará nenhum inconveniente a nível estrutural.

Os elementos roscados presentes também foram alterados. A disposição previa a composição de um parafuso com a respetiva porca, sendo que estes eram alojados num casquilho-bucha que os rebatia para o interior do módulo e ao mesmo tempo permitia que mediante o diâmetro considerado (6mm) o comprimento do parafuso normalizado conseguisse cumprir a funcionalidade. De forma a utilizar um maior número de peças normalizadas, reformulou-se o pensamento da etapa de aperto. Eliminou-se a necessidade do uso do casquilho-bucha, da porca de bucha e do parafuso de cabeça cilíndrica de oco hexagonal - CHC com a introdução de dois parafusos de cabeça de embeber de oco hexagonal - FHC-M8 e de uma porca DIN 6334-M8. Este conjunto funciona com a

inserção de um parafuso através da chapa, roscando um pouco da porca. De seguida o conjunto é inserido no furo do módulo onde, no outro lado, vem ao seu encontro o outro parafuso já inserido na respetiva chapa. Para que esta nova solução resulte na totalidade em relação à anterior resposta, as chapas devem conter caixas troncónicas para cabeças de parafusos de embeber de forma a alojar corretamente os parafusos.

De facto a nova situação apresentada responde a um problema inerente à anterior. Este passava pela rotação da porca de bucha em torno de si própria, sendo que a anterior disposição não previa uma solução para esse problema. No entanto, esta nova disposição pode apresentar outros problemas nomeadamente na falta de garantia perante a concentricidade do parafuso para com a porca. Como resposta a esta situação é alterada a componente de furação do módulo. Em vez de um só furo com o diâmetro dos casquilhos a introduzir, será feito um furo passante com um diâmetro mediante a porca a inserir seguido da abertura de duas caixas para o alojamento dos casquilhos. Desta forma consegue-se otimizar o processo de montagem alojando a porca na espuma, garantindo uma certa coesão da mesma e resultando num fácil aparafusamento.

Falta endereçar a situação da garantia do posicionamento das chapas em relação aos furos dos módulos. Na prévia situação, este alinhamento era garantido pelo posicionamento do parafuso no casquilho-bucha que por sua vez se posicionava devido ao seu contacto com o casquilho. Nesta nova configuração o posicionamento das chapas relativamente aos furos dos módulos é dado pelo contacto das mesmas com os casquilhos. Este contacto, além de tornar concêntricos os parafusos com os furos dos módulos, serve para distribuir as cargas presentes nas placas de fibra de vidro. Com isto, prevê-se que a presença dos parafusos serve apenas para garantir o contacto das chapas ligantes com os casquilhos.

As calhas apresentadas, que funcionavam da mesma forma que as chapas, seguem a mesma nova lógica onde se torna necessário alterar as caixas que alojam os parafusos.



Figura 5.1: Novos elementos roscados.

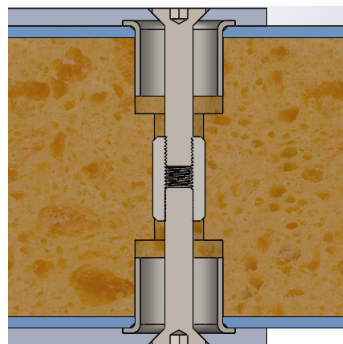


Figura 5.2: Representação das chapas ligadas com os novos elementos roscados.

No que diz respeito à falta de iluminação do sistema, faltou a previsão da incorporação

de elementos para o efeito. Assim são reaproveitados os furos passantes dos módulos de forma a evitar furações excepcionais para alojamento do candeeiro. Este é composto por uma chapa base que serve de suporte ao candeeiro, que será anexada ao teto através dos parafusos necessários para o aperto do conjunto ligante. Após a fixação do caixilho de suporte dá-se o encaixe do vidro protetor por linguetas presentes no seu perímetro através da rotação do mesmo.

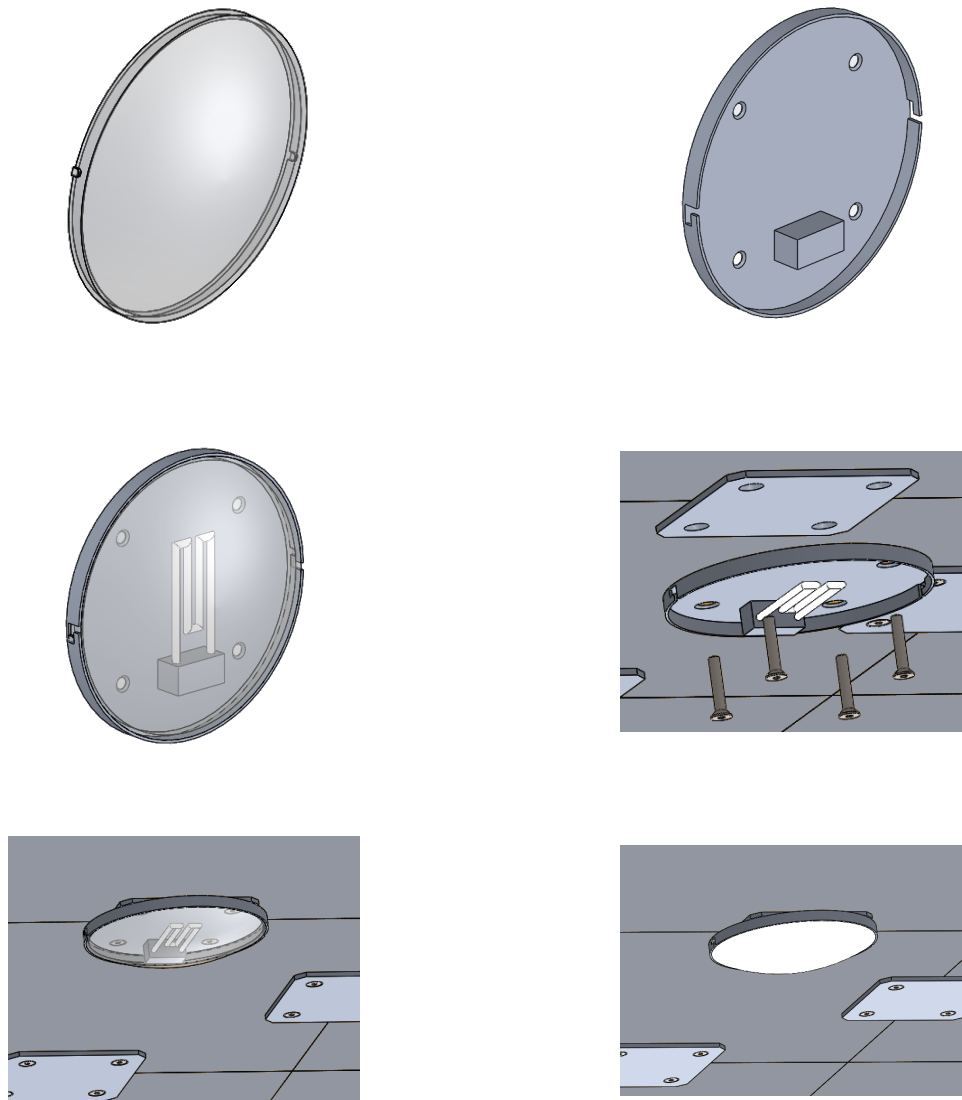


Figura 5.5: Montagem do candeeiro.

Na situação da entrada das chapas de acrílico constituintes do elemento janela foi tomada a ação de alterar o elemento calha para a tornar mais fácil. Uma vez montada a primeira calha é então inserida a chapa de acrílico com a posterior montagem da última calha que a fixará. Esta topologia será também adotada para a composição do aro da porta de forma a reduzir o número de peças diferentes, passando apenas pelo rebaixamento de duas das calhas na zona onde encaixa a dobradiça.

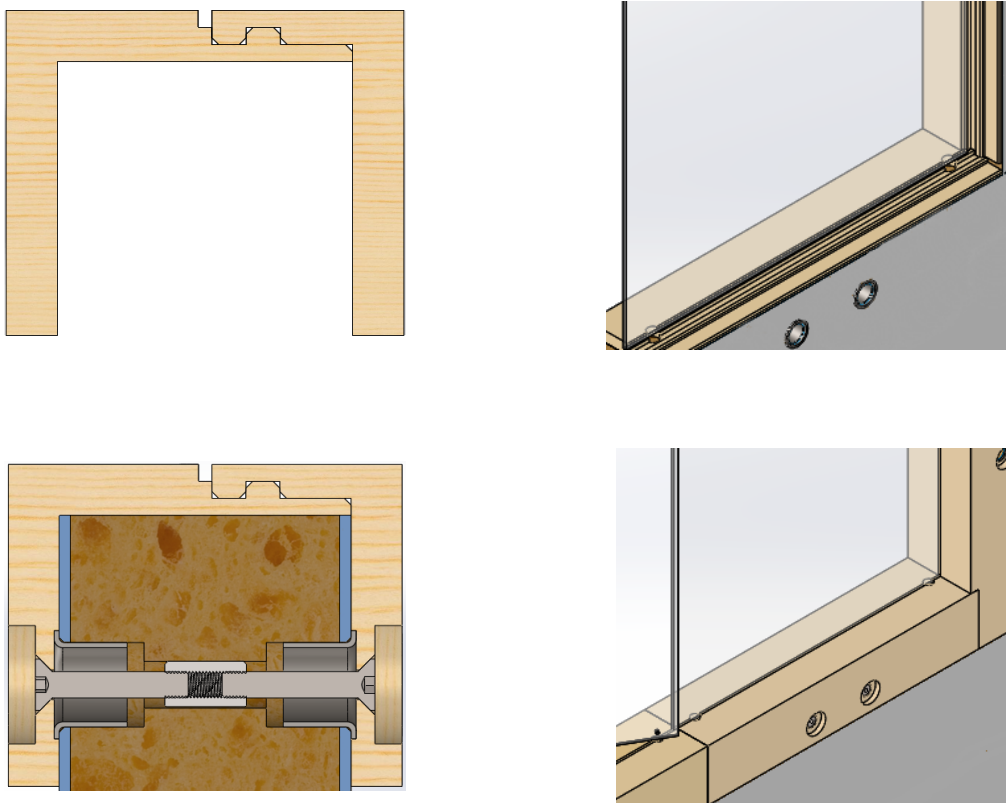


Figura 5.7: Montagem da janela, com a nova calha.

No que se trata à vedação global do sistema, e de forma a responder à impermeabilidade por estas assegurada, foi alterada a forma de pensamento. Em vez de garantir o isolamento somente por contacto lateral, através das já definidas calhas em L, foi pensado criar um outro elemento que consiga cobrir os fechos pelo exterior. Assim é na mesma forma utilizado um elemento em L mas que, em vez de passar dentro das chapas de canto, passa pelo seu exterior. Devido ao desnível entre a superfície do módulo e a calha (por causa da montagem ser superior às chapas de canto) e ainda de possíveis distorções presentes nas superfícies dos módulos, é inserida uma fita vedante com o objetivo de conseguir garantir a vedação.

Nos cantos (zonas onde intercetam três fechos), é implementado um semi-cubo, composto por três chapas planas, cujo objetivo é fechar o canto bem como agir como elemento que garanta a coesão do conjunto. Para garantia da coesão das calhas no sítio faz-se passar o parafuso pela mesma, previamente não ligado à porca, com o posterior aperto de maneira semelhante às calhas.





Figura 5.9: Representação dos elementos de vedação exterior.

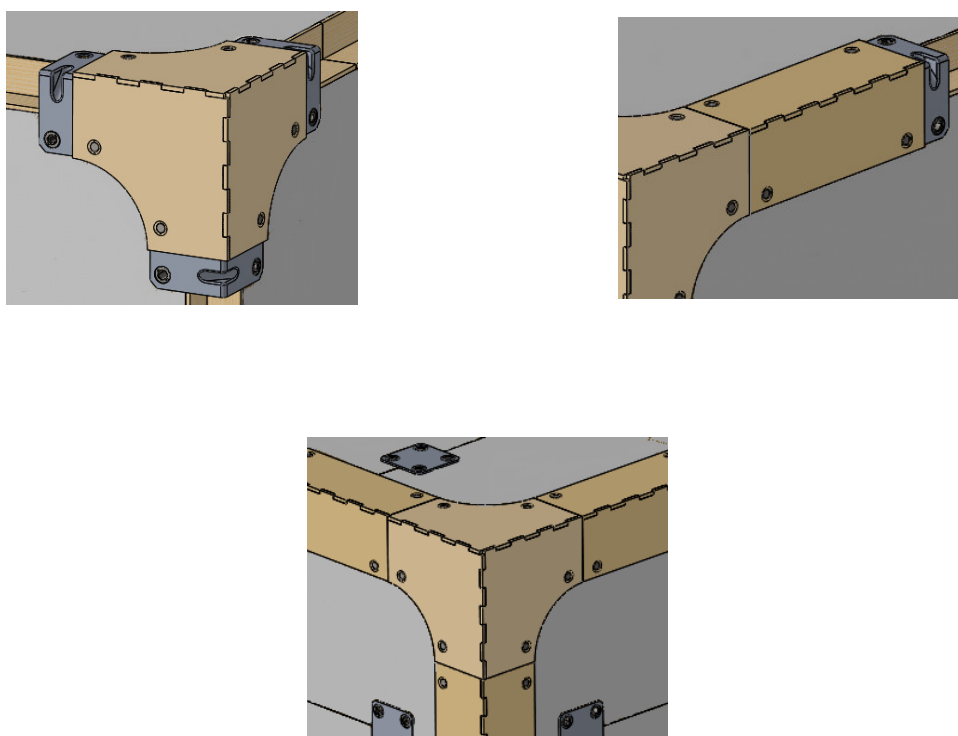


Figura 5.11: Montagem dos elementos de vedação exterior.

Finalmente é abordada a situação de instabilidade para com o utilizador. De forma a colmatar a falha da continuidade plana do chão devido ao desnível entre a face do módulo e as chapas anexadas, é então prevista uma colagem de uma cobertura para o efeito. Esta terá de ser adaptada à superfície em contacto, pois a presença das chapas obriga a que se tenham de prever recortes na cobertura para que esta assente de forma correta. Sendo assim apresentam-se placas de cortiça, com 5mm de espessura, com as dimensões normais do módulo mas com recortes nas zonas onde está prevista a inserção das chapas de ligação. Com esta solução prevê-se que o chão fique uniforme, traduzindo num maior conforto revelado pelo utilizador.

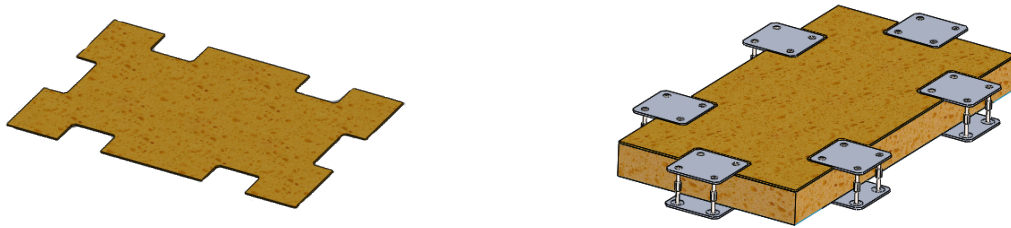


Figura 5.12: Representação do elemento de cobertura do chão.

Numa fase final, e não abordado no FMEA do projeto, fica pendente a questão de adequação do módulo para o seu sucesso mediante os requisitos estéticos envolvidos. Normalmente é aplicado um filme de *Gelcoat* sobre a superfície da fibra de vidro de forma a proteger a mesma e ao mesmo tempo atribuir uma cor. No entanto esse filme é altamente prejudicial para o meio ambiente pelo que não se enquadra no contexto desta dissertação. Assim a personalização quanto à cor dos módulos pode ser respondida atribuindo uma camada de tinta à base de água, sendo ambientalmente mais ecológica.

## 5.2 Escolha das topologias e materiais constituintes

Por observação da tabela 4.2, é possível denotar que alguns dos elementos utilizados estão sobre-dimensionados. No entanto, de maneira a otimizar o material utilizado bem como o processo de fabrico, foi procedida uma reavaliação das quantidades desse mesmo material e analisado estruturalmente. Tendo por base sucessivas análises iterativas, e recorrendo às possíveis diretrizes envolventes do processo de fabrico (nomeadamente o *Design for Manufacturing*), foi possível otimizar algumas das geometrias envolvidas no processo resultando então nas peças finais escolhidas.

### Módulos

O material associado ao módulo é já conhecido, dispondo-se nas especificações da respetiva pá eólica [56].

### Chapas

Nas chapas foi reduzida a espessura de 8mm para 5mm, mantendo a funcionalidade. Foi alterado o material constituinte para Alumínio 6063 T4, com 68.9 GPa de módulo de elasticidade e 89.6 MPa de tensão de cedência, conseguindo conservar a sua funcionalidade.

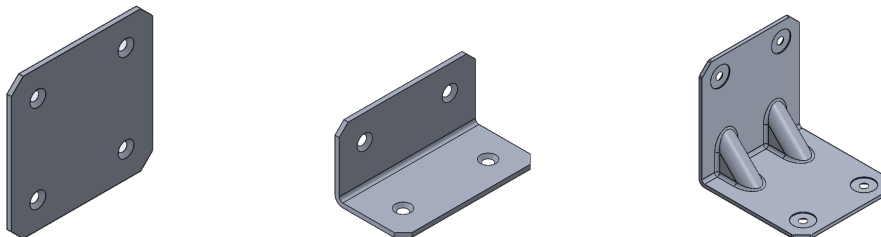


Figura 5.13: Tipos de chapas constituintes.

### Casquilhos

Os casquilhos idealizados para este projeto passam pelos normalizados Norelem 23731-02202521, com 25mm de diâmetro externo e espessura 1.5mm.



Figura 5.14: Casquilhos constituintes.

### Calhas

Passando para os elementos de composição, o terreno das calhas é dominado pela presença de pinho como material idealizado de espessuras constantes de 10 e 15 mm. Não se tratando de elementos estruturais, a madeira de pinho responde facilmente pois trata-se de uma madeira abundante, leve e barata.

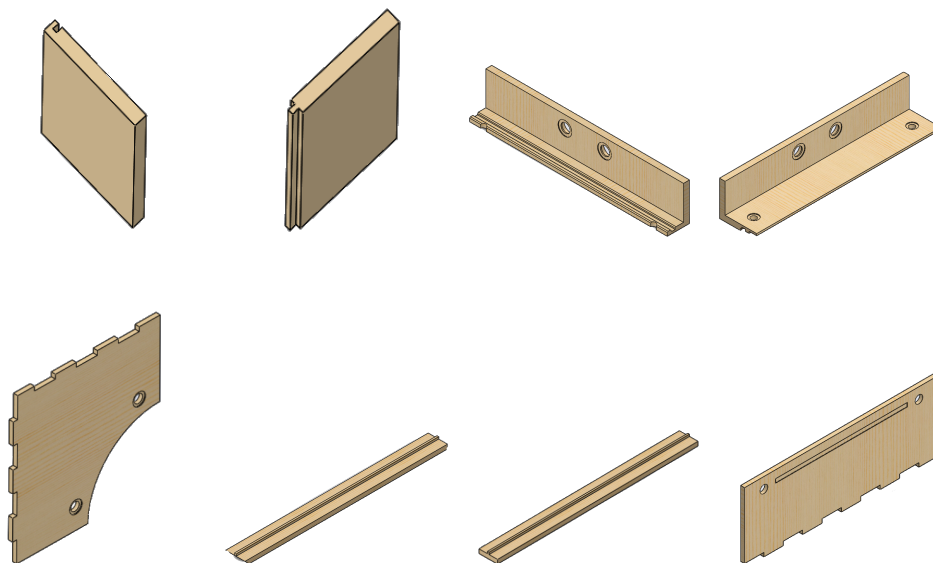


Figura 5.16: Calhas constituintes.

### Janelas

Os elementos com função de vidros da janela estão previstos serem constituídos por chapas de acrílico transparente (PMMA) de espessura 4mm. Esta é escolhida pois garante a coesão vertical do mesmo e ao mesmo tempo uma certa flexibilidade na sua inserção no conjunto.





Figura 5.17: Janela simples e perfurada, respetivamente.

### Porta

Provavelmente, o conjunto associado à porta deverá ser o mais *standard* de todo este projeto. Trata-se de uma comum porta utilizada em interiores constituída de placas de compostos de madeira de recheio oco. Os elementos anexados a esta são em latão que é um material normalmente utilizado neste tipo de peças.

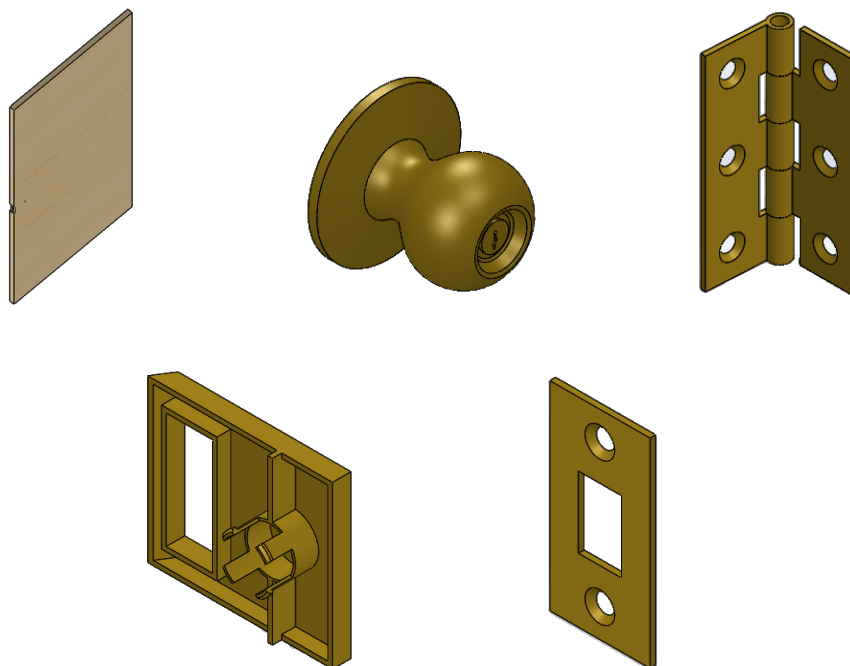


Figura 5.19: Conjunto porta.

### Elementos roscados

Os elementos roscados previstos passam pelos já referidos parafusos FHC ISO 10642-M8x45-8.8 e porcas longas DIN 6334-M8x24.



Figura 5.20: Elementos roscados constituintes.

### Pinos

Nos pinos de montagem das janelas toma-se o latão como material utilizado. Este é sublime no que se trata ao reduzido atrito entre os elementos em contacto, pelo que a presença deste inconveniente pediu um material de resposta positiva.



Figura 5.21: Pinos constituintes.

### 5.2.1 Outros elementos

Os elementos acima descritos não correspondem à totalidade dos mesmo inseridos, pelo que os restantes são aqui apresentados. O puxador da janela móvel está previsto ser feito em madeira, montado através da inserção de um parafuso. Relativamente à cobertura do chão trata-se de placas de cortiça, com 5mm de espessura. No grupo de iluminação prevê-se que o caixilho seja feito de uma liga de aço simples, entre 1 a 2mm de espessura, e o vidro protetor feito em acrílico.

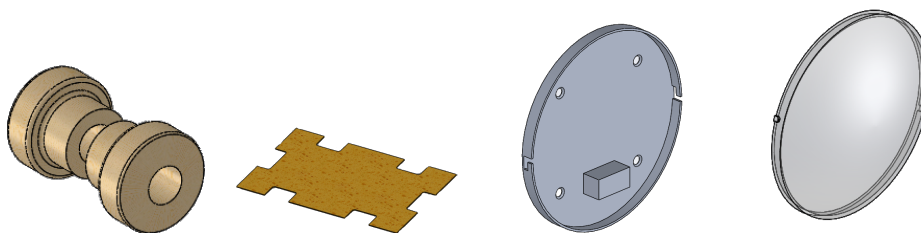


Figura 5.22: Respetivamente puxador, cobertura do chão, caixilho e vidro.

### 5.3 Definição dos processos de fabrico envolvidos

A definição dos processos envolvidos no fabrico dos componentes passam pelos usuais processos para componentes de produção rápida. De fora desta seleção ficam os elementos normalizados pois estes já se encontram no mercado.

#### Módulos

A produção dos módulos deverá ser a que dará um maior trabalho. Tal começa a ser justificado pela prévia escolha, manual, das placas com menor distorção de toda uma pá eólica. De seguida, deverá ser cortada em retângulos de 1x0.5m com a posterior furação dos respetivos furos passantes.

#### Chapas

O fabrico das chapas metálicas passa pelo corte, por prensagem, dos perfis quadrangulares e retangulares bem como os furos numa chapa de 5mm de espessura de alumínio. De seguida procede-se ao rebaixamento de 1.5mm na zona dos furos de um lado, com a definição da caixa de alojamento do parafuso no outro. Até esta etapa, o processo é idêntico para os dois casos sendo que as chapas planas saem desta finalizadas. As restantes chapas seguem para uma fase de dobragem em L, onde sofrem ainda com uma estampagem para a elaboração dos dois reforços.

#### Pinos

Os pinos dobradiça e os pinos batente, presentes nas janelas, são elementos que já estão presentes no mercado pelo que também os seus processos de fabrico estão definidos. Estes passam pela maquinagem de varões de metal até à configuração final.

#### Janelas

As janelas são produzidas através do corte de chapas de acrílico com as dimensões definidas bem como a furação dos respetivos furos passantes.

#### Porta

A chapa da fechadura possui uma topologia própria pelo que terá de ser produzida especialmente para este caso. Assim, propõe-se o fabrico da mesma através de processos de embutidura de chapa de latão para que esta adquira a conformação desejada.

#### Calhas

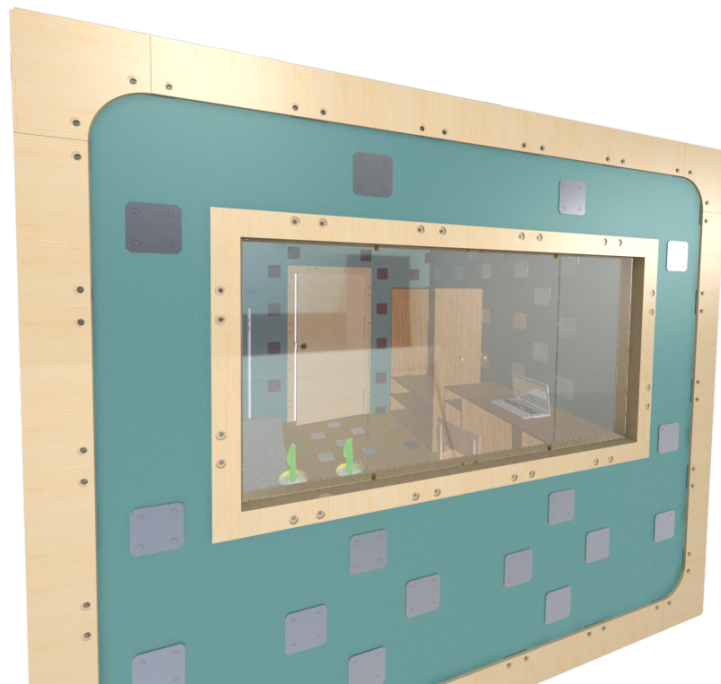
As calhas são produzidas recorrendo ao corte de tábuas de madeira e talhadas com os devidos encaixes, onde é prevista a posterior montagem consoante a disposição por estas pretendida.

### Outros elementos

Em relação aos puxadores está previsto que sejam elaborados de forma idêntica às calhas, passando pelo corte e posterior talhamento. A cobertura do chão passa pelo recorte de placas de cortiça com o contorno desejado. O caixilho do candeeiro pode ser obtido por embutidura de um círculo de chapa, com a prévia operação de recorte dos encaixes, e o vidro protetor por injeção de polímeros.

### 5.4 Renderização do conceito finalizado







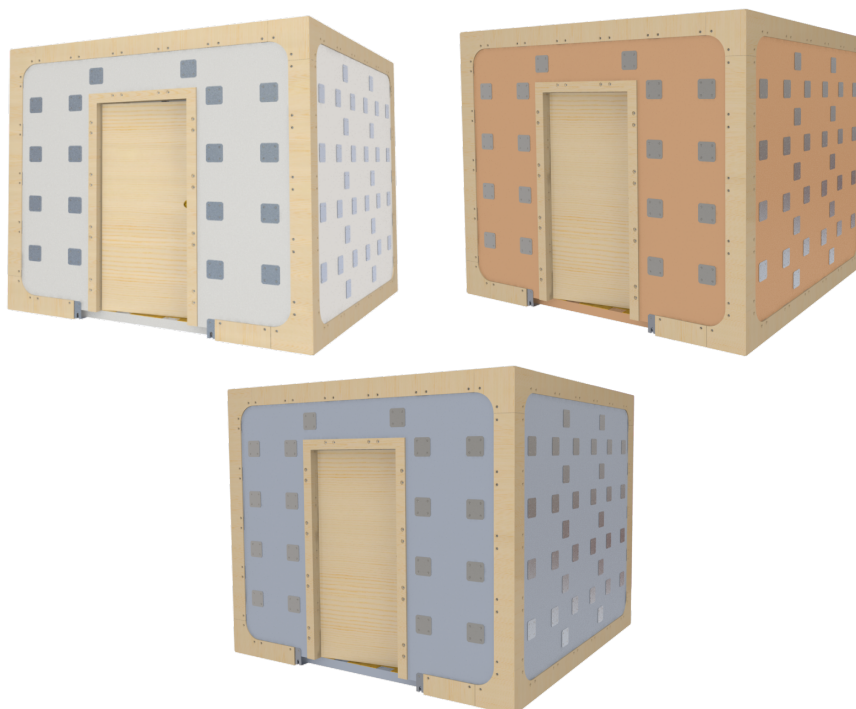


Figura 5.23: Diferentes cores associadas aos módulos.

## Capítulo 6

# Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1 Conclusões

De uma maneira global, o objetivo deste trabalho foi cumprido. Este passava essencialmente pelo desenvolvimento de um compartimento habitável de construção modular de utilização temporária, com reutilização de elementos estruturantes, para montagem e instalação no interior de um edifício maior.

No cumprimento do objetivo deste trabalho pretendeu-se privilegiar o recurso a materiais provenientes do recorte de pás eólicas que fossem utilizados como estruturas divisórias, autoportantes, evitando a necessidade de utilização de elementos estruturais adicionais. O desenvolvimento deste compartimento modular implicou a sua validação estrutural.

Nesse sentido podemos começar por referir que os resultados obtidos nos ensaios de simulação estrutural do comportamento do modulo habitacional foram satisfatórios uma vez que o módulo e os seus componentes conseguiram suportar as cargas impostas com uma margem de segurança aceitável. Os valores e os resultados obtidos inferem de alguma incerteza uma vez que a análise estrutural utilizando materiais compósitos é de facto incerta, o que num ambiente de utilização real podem-se observar valores distintos. Na validação dos elementos de ligação, e em resultado de uma análise prévia, foi possível validar uma configuração minimalista do conjunto de forma a garantir a coesão do mesmo e a definir a sua topologia base. Assim, e com base nestes resultados, procedeu-se a uma redefinição dos elementos no conjunto realizando as devidas correções do conceito inicial. Numa etapa final, foi definido cada um dos componentes individuais necessários para a montagem do módulo final, bem como as especificações técnicas.

Refletindo sobre a metodologia adotada para responder a este problema, esta foi a mais correta pois conseguiu relacionar os requisitos que o cliente esperava encontrar numa solução para o efeito com as diretivas impostas pela lei em vigor, sendo que fora necessário sacrificar alguns aspetos em prol do conjunto. Este conjunto é apresentado como uma caixa cúbica com uma área de  $10.24 \text{ m}^2$  exterior ( $9 \text{ m}^2$  de área útil interior) e com uma altura de  $2.7 \text{ m}$ , perfazendo um total de  $27.65 \text{ m}^3$ . Para a elaboração do mesmo são necessários 88 módulos onde o volume para transporte dos mesmos é de  $3.87 \text{ m}^3$ , bem como os restantes elementos necessários para a coesão (380 chapas planas, 68 chapas de canto curtas e longas, 2112 casquilos, 2112 parafusos e 1056 porcas) onde se prevê que a montagem esteja completa em 1 ou 2 dias. Cada módulo pesa cerca de  $14 \text{ kg}$  sendo que cada parede vertical terá um peso de  $225 \text{ kg}$ , o chão e o teto  $270 \text{ kg}$  e a



parede com porta e janela por volta de 165 kg.

Numa abordagem técnica das envergaduras horizontais, o chão foi analisado com a carga mínima por lei ( $1500 \text{ N/m}^2$  + o peso do módulo ( $300 \text{ N/m}^2$ )) obtendo os valores de tensão de 35.4 MPa e de deslocamento 9.57 mm, desviando-se e muito da tensão de cedência (144 MPa). O teto está apenas sujeito ao peso do próprio tendo obtido uma tensão de 36.2 MPa e um deslocamento de 31 mm no centro do mesmo. Olhando para as paredes, estas estão sujeitas ao próprio peso bem como ao peso do teto. Numa parede completa é possível observar uma tensão resultante de 11.2 MPa e uma deformação de 2.64 mm, onde mais uma vez a tensão de cedência é de 144 MPa. Na parede com porta e com janela, respetivamente, a análise apresentou uma tensão de 8.9 MPa e 13.1 MPa com os respetivos deslocamentos de 0.34 mm e 1.32 mm.

Uma vertente crítica deste trabalho passou pela escolha do material utilizado para composição dos módulos. Neste caso tratou-se de material reaproveitado das pás eólicas em fim de vida, atribuindo novos propósitos ao mesmo, com a sua reutilização. Entre as repercussões não expectáveis desta proposta, uma delas passa pela possível explosão na procura desta solução habitacional sendo que o fornecimento desse elemento pode não acompanhar a procura, o que levaria à produção de elementos idênticos com o conseqüente agravamento ecológico. Outro aspeto a discutir no âmbito do material utilizado passa pelas dimensões e respetivos pesos associados, sendo que devido à densidade dos materiais utilizados e o peso de cada módulo, este poderá ser um entrave à sua utilização. Numa primeira instância, o peso associado traz problemas na fase de transporte pelo que uma viatura normal não consegue transportar todos os elementos necessário para a edificação do módulo, sendo por isso necessário a contratação de unidades de transporte especializado para o efeito o qual se traduz num aumento de custos. Outro dos entraves assenta na dificuldade de uma só pessoa conseguir edificar o compartimento, como inicialmente foi idealizado, considerando o peso de cada módulo (cerca de 15 kg) o que pode traduzir-se num esforço acrescido para uma pessoa de estatura normal.

Passando para uma análise crítica relativamente aos elementos ligantes, é possível destacar as seguintes. A preferência pela utilização de elementos normalizados pode ser posta em causa devido à facilidade ou rapidez de montagem. Nesta solução existem muitas ligações aparafusadas, sendo que esta ação pode ser demorada e complicada para o público em geral. Caso este produto venha a apresentar um nível de produção elevado, pode ser recomendado o desenvolvimento de um novo tipo de ligação personalizado (tipo *snap-fit*), capaz de superar a facilidade e rapidez de montagem.

Do ponto de vista económico, este trabalho não explora as gamas de valores associadas ao tipo de construção idealizada mas pretendeu ter em conta o desenvolvimento de soluções fáceis de produzir e implementar e de menor valor. Para tal, sempre que possível foram escolhidos elementos normalizados para fazer a ligação entre componentes e do conjunto. Um outro esforço passou pela adoção de uma estratégia de utilização do menor número de elementos diferentes e redução da variedade de componentes, com conseqüente redução potencial dos custos e da dificuldade de montagem.

## 6.2 Trabalhos futuros

Este trabalho tratou-se de uma análise básica como resposta a um problema, pelo que tornar-se-ia complicado e extenso abordar todas as questões necessárias para passar à

fase de prototipagem física. Assim seguem pontos que podem ser desenvolvidas no futuro com vista a validar todo o produto.

Numa primeira etapa seria interessante estudar novas disposições e tipologias do módulo com vista a promover a facilidade quer do seu transporte como da sua montagem e instalação.

Por analisar, ficaram os requisitos de impermeabilidade térmica e acústica do módulo, considerando a extensão e exigência destes requisitos, pelo que seria importante o estudo, desenvolvimento e validação do módulo relativamente à sua performance térmica, acústica e perante a presença de chama. Um outro aspeto que faltou explorar foi o desenvolvimento dos sistemas de instalação para a passagem de corrente elétrica no interior da divisória.

No que se refere aos elementos utilizados para a coesão do conjunto propõe-se também uma nova abordagem dos mesmos tendo por base diretivas referentes ao DFA e DFM, para uma produção mais eficiente. Uma proposta é igualmente a construção de um protótipo físico de forma a validar o conceito.



# Bibliografia

- [1] Bastos, P. *Desenvolvimento de uma solução de construção modular para um módulo habitacional*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2019.
- [2] Malthus, Thomas R. *An Essay on the Principle of Population*. J. Johnson, 1798.
- [3] Bavel, J. *The world population explosion: causes, backgrounds and projections for the future*. Facts, views & vision in ObGyn, 2013.
- [4] Wallerstein, I. *The Capitalist World-Economy*. Cambridge University Press, 1979.
- [5] Jacobs, J. *The Economy of Cities*, New York Random House, 1969.
- [6] Silva, Alvaro & Sousa, M. Luísa. *In search of the urban variable : Understanding the roots of urban planning in Portugal*. Métropoles, 2011
- [7] Squires, Gregory D. *Urban Sprawl: Causes, Consequences & Policy Responses*, The Urban Institute Press, 2002.
- [8] Cupeto, C., Silva, S., Abelha, H., Ribeiro, P., & Figueiredo, M. J. *Guia Agenda 21 Local - Um Desafio Para Todos*, 2007.
- [9] Spence, Robin; Mulligan, Helen. *Sustainable Development and the Construction Industry*, Cambridge Architectural Research Limited, UK, 1995.
- [10] F Pacheco-Torgal, LF Cabeza, J Labrincha, A de Magalhães. *Eco-Efficient Construction and Building Materials*, Woodhead Publishing, 2014.
- [11] KP Mehta. *Reducing the Environmental Impact of Concret*, CONCRETE INTERNATIONAL, 2001.
- [12] Bergdoll B, Christensen P, Broadhurst R, Y N. *Home Delivery : Fabricating the Modern Dwelling*. Museum of Modern Art, 2008.
- [13] C.Tesla. *The Industrialization of Building*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1972.
- [14] Patinha, S. *Construção Modular - Desenvolvimento Da Ideia: Casa Numa Caixa*. Universidade de Aveiro, 2011.
- [15] Crisis, E. M. (n.d.). *Eu Migrant Crisis and Increasing Demand for Modular Construction : Modular Social Housing Complex for*. July 2015, 921?931.



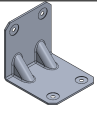
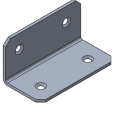





- [16] Schoenborn, Joseph M. *A Case Study Approach to Identifying the Constraints and the barriers to design innovation for Modular Construction*. Blacksburg, VA : Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2012.
- [17] Ramos, A. T. *Prefab Perfection*. Essential Lisboa, 2007.
- [18] Gibb, A.G.F. *Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularization*. Latheronwheel Whittles Publishing, 1999.
- [19] Martins, J.C.M. *Introdução ao Design do Produto Modular*. Universidade do Porto, 2002.
- [20] Varela, M.X. *A casa modular vista na perspetiva do engenheiro mecânico*, Universidade de Aveiro, 2015.
- [21] Palermo. H.N.S. *O Sistema Domino*. Universidade Federal do Rio Grande Sul, 2006.
- [22] Deuss, M., Panozzo, D., Whiting, E., Liu, Y., Block, P., & Pauly, O. S. M. *Assembling Self-Supporting Structures*. EPF Lausanne, ETH Zurich, Dartmouth College, Microsoft Research, 2014.
- [23] Al-Homoud, M. S. *Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials*. Building and Environment, 2005.
- [24] ISO EN 717-1, [Consultado em 10 de Fev. de 2020]. [https : //www.iso.org/standard/51968.html](https://www.iso.org/standard/51968.html)
- [25] Silva, N. *Conceção e desenvolvimento de um edifício modular*. Universidade de Aveiro, 2017
- [26] Dan Hisel Architect, [Consultado em 7 de Fev. de 2020]. [http : //www.danhiselarchitect.com/](http://www.danhiselarchitect.com/)
- [27] ModularWalls, [Consultado em 7 de Fev. de 2020]. [https : //modularwalls.com.au/products/slimwall/](https://modularwalls.com.au/products/slimwall/)
- [28] EverPanel: Modular Wall System, [Consultado em 7 de Fev. de 2020]. [https : //www.everblocksystems.com/everpanel – specifications](https://www.everblocksystems.com/everpanel-specifications)
- [29] Job, S. *Recycling glass fibre reinforced composites: history and progress*, Elsevier Reinforced Plastics, 2013.
- [30] WallForms: Retail Display Solutions, [Consultado em 7 de Fev. de 2020]. [http : //www.wallsforms.com](http://www.wallsforms.com)
- [31] Fibs Building System: Fast & Easy, [Consultado em 7 de Fev. de 2020]. [https : //www.fibseurope.com/](https://www.fibseurope.com/)
- [32] Zink, T., Geyer, R. *Circular Economy Rebound*. Journal of Industrial Ecology, 2017.
- [33] Giuri. G. The Sustainable Design Journey. [https : //thesustainabledesignjourney.wordpress.com/tag/makingthedifference/](https://thesustainabledesignjourney.wordpress.com/tag/makingthedifference/)
- [34] Neto, V. *Eco-Design & Eco-Efficiency*. Universidade de Aveiro, 2018.

- [35] Ellen Macarthur Foundation. *Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*, 2013.
- [36] Andersen, M.S. *Evaluation of the cleaner technology programme, environmental review no. 14*, Environmental Protection Agency, Copenhagen, 1997.
- [37] Okorie, O., Salonitis, K., Charnley, F., Moreno, M., Turner, C., & Tiwari, A. *Digitisation and the circular economy: A review of current research and future trends*. Energies, 2018
- [38] Alcott, B. *Jevons' paradox*. Ecological Economics, 2005.
- [39] Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J. *Circular Economy: The Concept and its Limitations*, Ecological Economics, 2018.
- [40] Bank, L. C. *Composites for construction: structural design with FRP materials*. John Wiley & Sons, 2006.
- [41] Hayman, B., Wedel-Heinen, J., & Brøndsted, P. *Materials Challenges in Present and Future Wind Energy*. MRS Bulletin, 2008, 33(4), 343-353.
- [42] Yazdanbakhsh, A., and Bank, L. *A critical review of research on reuse of mechanically recycled FRP production and end-of-life waste for construction* Polymers, 2014, 6(6):1810-1826.
- [43] Beauson, J., Madsen, B., Toncelli, C., Brøndsted, P., and Bech, J. I. *Recycling of shredded composites from wind turbine blades in new thermoset polymer composites* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 90:390-399.
- [44] Bank, L. C., Arias, F. R., Yazdanbakhsh, A., Gentry, T. R., Al-Haddad, T., Chen, J. F., & Morrow, R. (2018). Concepts for reusing composite materials from decommissioned wind turbine blades in affordable housing. Recycling, 3(1). <https://doi.org/10.3390/recycling3010003>
- [45] Shu, Q., Gao, J., Liao, Y., Wang, D., & Wang, J. *Estimation of the sauter mean diameter for biodiesels by the mixture topological index*. Renewable Energy, 2011, 36(2), 482-487.
- [46] Bank, L. C., & Chen, J. *Reusing Composite Materials From*. November, 2017, 1-12.
- [47] REGEU - Regulamento Geral das Edificações Urbanas, PORTUGAL, Decreto-Lei n<sup>o</sup>290 de 2009.
- [48] European Standard EN 13501-1,[Consultado em 12 de Fev. de 2020]. 2013.
- [49] Silva, P. J. O. *Isolamento a sons aéreos de acordo com a norma NP EN ISO 16283-1 2014. Procedimento geral vs Procedimento de baixa frequência*, Escola de Engenharia - Universidade do Minho, 2016, 6-9.
- [50] O'Brien, C. *Sustainable production - a new paradigm for a new millennium*. International Journal of Production Economics, 1999.

- [51] Matzler, K., Bailom, F., Sauerwein, E., & Hinterhuber, H. H. *How to delight your customers*. Journal of Product & Brand Management, 1996, 5(2), 6-18.
- [52] Mill, H. , "Enhanced Quality Functional Deployment", *World Class Design to Manufacture, Vol. 1 No. 3*, pp. 23-26. 1994
- [53] Relvas C. *DESIGN & ENGENHARIA - da ideia ao produto*. Engebook. (2018). p. 1-361. ISBN: 9789897232404
- [54] Gentry, R., Bank, L., Chen, J. F., Arias, F., & Al-Haddad, T. (2018). *Adaptive reuse of FRP composite wind turbine blades for civil infrastructure construction*. 9th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering, CICE 2018.
- [55] Sandia National Laboratories, [Consultado em 10 de Março de 2020]. <https://www.sandia.gov/>
- [56] Griffith, D. T., & Ashwill, T. D. The Sandia 100-meter All-glass Baseline Wind Turbine Blade : SNL100-00. Baseline, June, 1-67. 2011. <https://doi.org/Report No. SAND2011-3779>
- [57] Lee, S.H. & Waas, Anthony. (1999). Compressive response and failure of fiber reinforced unidirectional composites. International Journal of Fracture. 100. 10.1023/A:1018779307931.
- [58] Better Soundproofing, [Consultado em 11 de Março de 2020]. <https://betersoundproofing.com/is-styrofoam-good-for-soundproofing/>
- [59] MatWeb - Material Property Data, [Consultado em 11 de Março de 2020]. <http://www.matweb.com/>
- [60] Howard, I. C. Load bearing fibre composites. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 3(3), 399-401, 1981.
- [61] Decreto-Lei nº 349-c/83 do Diário da República.

## Apêndice A

# Lista de Componentes

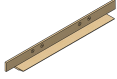
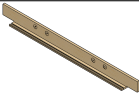
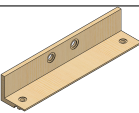
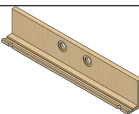
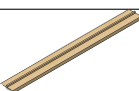
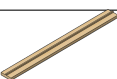
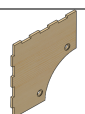
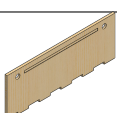
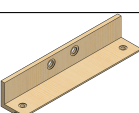
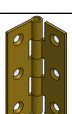
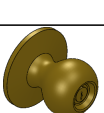
| Elemento    |                                | Material  | Qtd                        | Dimensões<br>mm |              |
|-------------|--------------------------------|---|----------------------------|-----------------|--------------|
| Módulos     | -                              |    | Fibra de vidro<br>+ espuma | 88              | 1000x500x86  |
| Chapas      | Planas                         |   | Alumínio<br>6063-T5        | 380             | 160x160x5    |
|             | Canto Longas                   |  | Alumínio<br>6063-T5        | 68              | 170x170x5    |
|             | Canto Curtas                   |  | Alumínio<br>6063-T5        | 68              | 80x80x5      |
| Casquilhos  | Norelem<br>23731-<br>02502826  |  | Ver catálogo               | 2112            | Ver Catálogo |
| Parafusos   | FHC ISO<br>10642-<br>M8x45-8.8 |  | Ver catálogo               | 2112            | Ver catálogo |
| Porca longa | DIN 6334-<br>M8x24             |  | Ver catálogo               | 1056            | Ver catálogo |
|             | Vedação<br>L-1                 |  | Pinho                      | 68              | 500x86x10    |
|             | Vedação<br>L-2                 |  | Pinho                      | 68              | 500x86x10    |

Continua na página seguinte

Calha

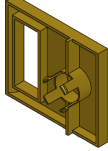


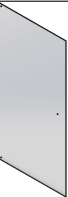


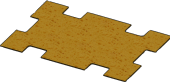
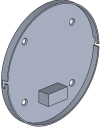



Tabela A.1 – continuação da página anterior

| Elemento  |                     | Material  | Qtd          | Dimensões<br>mm |              |
|-----------|---------------------|---|--------------|-----------------|--------------|
|           | Aro Topo 1          |    | Pinho        | 3               | 1160x101x15  |
|           | Aro Topo 2          |    | Pinho        | 3               | 1160x56x15   |
|           | Aro Geral 1         |    | Pinho        | 14              | 500x56x15    |
|           | Aro Geral 2         |    | Pinho        | 14              | 500x101x15   |
|           | Batente em cunha    |    | Pinho        | 4               | 485x46x15    |
|           | Batente Reto        |  | Pinho        | 6               | 500x46x15    |
|           | Cubo de fecho       |  | Pinho        | 24              | 350x350x10   |
|           | Calha de fecho      |  | Pinho        | 112             | 500x180x10   |
|           | Aro dobradiça       |  | Pinho        | 2               | 500x101x15   |
| Dobradiça | Doorstuff 3905/3909 |  | Ver catálogo | 2               | Ver catálogo |
| Maçaneta  | Hyland OEM 607 SSET |  | Ver catálogo | 1               | Ver catálogo |

Continua na página seguinte

Tabela A.1 – continuação da página anterior

| Elemento          |           |   | Material                | Qtd | Dimensões<br>mm  |
|-------------------|-----------|---|-------------------------|-----|------------------|
|                   | Fechadura |    | Latão                   | 1   | 80x70x23         |
| Porta             | -         |    | Compostos<br>de madeira | 1   | 1970x965x35      |
| Vidros            | Fixos     |    | Acrílico<br>(PMMA)      | 2   | 980x496x4        |
|                   | Móveis    |   | Acrílico<br>(PMMA)      | 2   |                  |
| Pinos             | Dobradiça |  | Latão                   | 4   | $\phi 15$ - L36  |
|                   | Batente   |  | Latão                   | 4   | $\phi 15$ - L36  |
| Cobertura<br>chão | -         |  | Cortiça                 | 14  | 1500x500x5       |
| Candeeiro         | Caixilho  |  | Aço                     | 1   | $\phi 190$ - L10 |
|                   | Vidro     |  | Acrílico<br>(PMMA)      | 1   | $\phi 188$ - L20 |



## Apêndice B

# Análise do QFD

O seguinte anexo inclui gráficos referentes ao QFD utilizado neste documento, sendo que o primeiro trata-se da Matriz de Qualidade e o seguinte da Matriz do Produto.

| Requisitos de cliente |                           | KANO                             |                          | ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS |   | ANTROPOMETRIA |    | DIMENSÕES |    | OUTRAS |                | Avaliação dos requisitos de qualidade |                      |             |           |                                |                                       |               |  |      |  |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|---------------|----|-----------|----|--------|----------------|---------------------------------------|----------------------|-------------|-----------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------|--|------|--|
| nível primário        | nível secundário          |                                  | prioridade inicial (Idi) | direção preferida       |   |               |    |           |    |        |                | Z-Box                                 | Fibs Building System | Walls Forms | EverPanel | avaliação da concorrência (Mi) | avaliação estratégica de mercado (Ei) | peso relativo | ATRIBUTOS DE QUALIDADE corrigidos (IDP*) |      |  |
| 1                     | Segurança                 | Segurança - Estrutural           | 0                        | 21                      | ▲ | 3             | 9  | 9         | ▲  | 3      | 3              | 1,0                                   | 0,5                  | 1,0         | 1,0       | 1,0                            | 1,0                                   | 2,0           | 11%                                      | 29,7 |  |
| 2                     | Funcionalidade            | Ergonomia                        | U                        | 15                      | ▲ | 1             | 3  | 3         | ▲  | 1      | 3              | 0,5                                   | 1,0                  | 0,5         | 0,5       | 0,5                            | 1,5                                   | 5%            | 13                                       |      |  |
| 3                     |                           | Escolha da topologia             | U                        | 2                       | ▲ | 3             | 3  | 3         | ▲  | 1      | 9              | 0,5                                   | 1,0                  | 0,5         | 1,5       | 1,0                            | 1,0                                   | 1%            | 2  |      |  |
| 4                     |                           | Transmissão da ideia da robustez | U                        | 9                       | ▲ | 3             | 3  | 3         | ▲  | 9      | 3              | 1,5                                   | 1,0                  | 0,5         | 1,0       | 1,0                            | 1,5                                   | 4%            | 11                                       |      |  |
| 5                     | Isolamento                | Isolamento Térmico               | U                        | 4                       | ▲ | 1             |    |           | ▲  |        |                | 0,5                                   | 1,0                  | 0,5         | 0,5       | 1,0                            | 1%                                    | 2,83          |  |      |  |
| 6                     |                           | Isolamento Acústico              | U                        | 17                      | ▲ | 1             |    |           | ▲  |        |                | 0,5                                   | 0,5                  | 1,0         | 0,5       | 1,0                            | 5%                                    | 14,7          |  |      |  |
| 7                     | Modulares                 | Privacidade                      | O                        | 6                       | ▲ |               |    |           | ▲  |        |                | 1,0                                   | 1,0                  | 1,0         | 0,5       | 1,0                            | 1,5                                   | 3%            | 7,35                                     |      |  |
| 8                     |                           | Facilidade de transporte         | U                        | 14                      | ▲ |               |    |           | ▲  |        |                | 0,5                                   | 1,0                  | 0,5         | 1,5       | 1,0                            | 1,5                                   | 6%            | 17,1                                     |      |  |
| 9                     | Flexibilidade             | Facilidade de produção           | U                        | 1                       | ▲ | 3             |    |           | ▲  |        |                | 0,5                                   | 1,5                  | 0,5         | 1,5       | 1,0                            | 2,0                                   | 1%            | 1,41                                     |      |  |
| 10                    |                           | Facilidade de montagem           | U                        | 12                      | ▲ | 3             |    |           | ▲  |        |                | 0,5                                   | 1,5                  | 1,0         | 2,0       | 1,5                            | 1,5                                   | 7%            | 1,8                                      |      |  |
| 11                    | Design                    | Flexibilidade na personalização  | A                        | 13                      | ▲ | 1             | 1  | 1         | ▲  |        |                | 0,5                                   | 1,0                  | 0,5         | 1,5       | 1,0                            | 1,0                                   | 5%            | 13                                       |      |  |
| 12                    |                           | Adaptação pós-montagem           | A                        | 11                      | ▲ |               |    |           | ▲  |        |                | 0,5                                   | 1,0                  | 1,5         | 2,0       | 1,5                            | 1,5                                   | 6%            | 16,5                                     |      |  |
| 13                    | Manutenção                | Mudança de local                 | A                        | 3                       | ▲ |               |    |           | ▲  |        |                | 2,0                                   | 0,5                  | 0,5         | 1,5       | 1,5                            | 2%                                    | 4,5           |  |      |  |
| 14                    |                           | Apelo estético                   | U                        | 19                      | ▲ | 3             |    |           | ▲  |        |                | 1,5                                   | 0,5                  | 1,0         | 1,5       | 1,0                            | 1,0                                   | 7%            | 1,9                                      |      |  |
| 15                    | Fabrico                   | Qualidade dos acabamentos        | U                        | 5                       | ▲ |               |    |           | ▲  |        |                | 0,5                                   | 1,0                  | 1,5         | 1,0       | 1,5                            | 1,0                                   | 2%            | 6,12                                     |      |  |
| 16                    |                           | Manutenção Fácil                 | U                        | 8                       | ▲ | 1             |    |           | ▲  |        |                | 0,5                                   | 1,0                  | 1,0         | 1,0       | 1,5                            | 1,0                                   | 4%            | 9,8                                      |      |  |
| 17                    | Reutilização de materiais | Manutenção Mínima                | U                        | 10                      | ▲ | 3             | 9  | 9         | ▲  |        |                | 1,5                                   | 0,5                  | 1,0         | 1,0       | 1,0                            | 1,5                                   | 4%            | 12,2                                     |      |  |
| 18                    |                           | Nº peças reduzido                | A                        | 18                      | ▲ |               |    |           | ▲  |        |                | 0,5                                   | 0,5                  | 1,0         | 2,0       | 1,0                            | 1,0                                   | 7%            | 1,8                                      |      |  |
| 19                    | Métricas (unidades)       | Baixo custo p/construtor         | U                        | 7                       | ▲ | 3             |    |           | ▲  |        |                | 0,5                                   | 1,0                  | 0,5         | 2,0       | 1,0                            | 1,5                                   | 3%            | 8,57                                     |      |  |
| 20                    |                           | Reutilização de materiais        | A                        | 20                      | ▲ | 9             |    |           | ▲  |        |                | 3                                     | 3                    | 9           | 1         | 1                              | 1                                     | 7%            | 19,6                                     |      |  |
| 21                    |                           |                                  |                          |                         | % | N/m           | mm | %         | dB | W/mK   | m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup>                        | unl                  | min         | unl       | unl                            |                                       |               |  | 28,3 |  |
| 22                    |                           |                                  |                          |                         | % | N/m           | mm | %         | dB | W/mK   | m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup>                        | unl                  | min         | unl       | unl                            |                                       |               |  | 10%  |  |

| características de qualidade inicial (IQI)   |  | avaliação das características de qualidade |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |  |
|--|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|--|
| Z-Box  |  | 0,5  | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 329,2 | 429,6 | 396,5 | 277,2 | 297,5 | 65,87 | 116,9 | 593,9 | 751,3 | 611,8 | 504,4 | 536,6 |     |     |  |
| Fibs Building System                         |  | 1,0  | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5 | 0,5 |  |
| Walls Forms                                  |  | 0,5  | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5 | 0,5 |  |
| EverPanel                                    |  | 1,0  | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,0   | 1,5   | 1,0   | 1,5   | 1,0   | 1,5   | 1,0   | 1,5   | 1,0   | 1,5   | 1,0   | 1,5   | 1,0 | 1,0 |  |
| AVALIÇÃO COMPETITIVA (Ei)                    |  | 1,0  | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | 1,0   | 0,5   | 1,0   | 0,5   | 1,0   | 0,5   | 1,0   | 0,5   | 1,0   | 0,5   | 1,0   | 0,5   | 1,0 | 0,5 |  |
| DIFICULDADE DE ACTUAÇÃO (Di)                 |  | 2,0  | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,5   | 1,0   | 0,5   | 1,0   | 0,5   | 1,0   | 0,5   | 1,0   | 0,5   | 1,0   | 0,5   | 1,0   | 0,5 | 1,0 |  |
| características de qualidade reviso (IQI*)   |  | 466  | 430 | 397 | 196 | 149 | 466 | 117 | 420 | 531 | 433 | 357 | 379 |     |     |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |  |
| características de qualidade (peso relativo) |  | 12%  | 11% | 10% | 5%  | 4%  | 1%  | 3%  | 11% | 14% | 11% | 9%  | 10% |     |     |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |     |  |

Figura B.1: Matriz da Qualidade.

| COMPONENTE S DO PRODUTO | IQI*                              | ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS         |                               |                        |                             |                            |                           |                |                          |                              |                   | DESEMPENHO                   |                |       | DIMENSÕES            |             |           | OUTRAS                         |                                       |               | Avaliação dos requisitos de qualidade    |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|----------------|-------|----------------------|-------------|-----------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                         |                                   | Volume material reutilizado (%) | Carga máxima admissível (N/m) | Deformação máxima (mm) | Opacidade da envolvente (%) | Isolamento sonoro (>=50dB) | Isolamento térmico (W/mK) | Área útil (m²) | Dimensões do módulo (m²) | Nº de componentes diferentes | Tempo de montagem | Nº de disposições diferentes | Personalização | Z-Box | Fibs Building System | Walls Forms | EverPanel | avaliação da concorrência (Mi) | Avaliação estratégica de mercado (Ei) | peso relativo | ATRIBUTOS DE QUALIDADE corrigidos (IDI*) |  |  |  |  |  |  |
| 1                       | Sistemas de ligação inter-módulos | 9                               | 9                             | 9                      | 1                           | 1                          | 1                         | 9              | 9                        | 9                            | 9                 | 3                            | 1,0            | 0,5   | 0,5                  | 1,5         | 1,0       | 1,0                            | 13%                                   | 26639         |  |  |  |  |  |  |  |
| 2                       | Sistemas de ligação inter-vigas   | 9                               | 9                             | 9                      | 9                           | 1                          | 3                         | 3              | 9                        | 9                            | 1                 | 1,5                          | 0,5            | 1,0   | 0,5                  | 1,0         | 1,0       | 1,0                            | 12%                                   | 25695         |  |  |  |  |  |  |  |
| 3                       | Sistema de ligação à cobertura    | 3                               | 9                             | 9                      | 9                           | 3                          | 1                         | 3              | 9                        | 3                            | 3                 | 1,5                          | 1,0            | 0,5   | 1,0                  | 0,5         | 1,0       | 1,5                            | 13%                                   | 26163         |  |  |  |  |  |  |  |
| 4                       | Sistemas de ligação de cantos     | 3                               | 9                             | 9                      | 9                           | 3                          | 3                         | 3              | 9                        | 9                            | 9                 | 1,5                          | 1,0            | 1,0   | 2,0                  | 1,5         | 1,5       | 1,5                            | 11%                                   | 23363         |  |  |  |  |  |  |  |
| 5                       | Sistema de ligação ao chão        | 3                               | 9                             | 3                      | 3                           | 3                          | 3                         | 3              | 9                        | 3                            | 1                 | 1,5                          | 1,0            | 1,5   | 0,5                  | 1,0         | 1,0       | 1,0                            | 9%                                    | 18634         |  |  |  |  |  |  |  |
| 6                       | Sistemas de acoplamento à lage    | 3                               | 1                             | 3                      | 3                           | 3                          | 3                         | 1              | 9                        | 1                            | 3                 | 1,5                          | 1,0            | 1,5   | 1,5                  | 1,5         | 1,0       | 1,0                            | 6%                                    | 12622         |  |  |  |  |  |  |  |
| 7                       | Sistemas de isolamento            | 1                               | 9                             | 9                      | 9                           | 9                          | 9                         | 9              | 9                        | 9                            | 9                 | 1,0                          | 1,0            | 1,0   | 1,5                  | 1,0         | 1,5       | 1,5                            | 4%                                    | 3066          |  |  |  |  |  |  |  |
| 8                       | Módulo (estrutural)               | 9                               | 9                             | 9                      | 9                           | 9                          | 9                         | 3              | 9                        | 9                            | 3                 | 0,5                          | 0,5            | 1,0   | 1,0                  | 1,0         | 1,0       | 1,0                            | 14%                                   | 23523         |  |  |  |  |  |  |  |
| 9                       | Aberturas (portas/janelas)        | 1                               | 3                             | 3                      | 9                           | 9                          | 9                         | 3              | 9                        | 9                            | 3                 | 0,5                          | 0,5            | 1,0   | 1,0                  | 0,5         | 1,0       | 1,0                            | 8%                                    | 16475         |  |  |  |  |  |  |  |
| 10                      | Sistema de alimentação elétrica   | 9                               | 9                             | 9                      | 9                           | 9                          | 9                         | 9              | 9                        | 9                            | 9                 | 0,5                          | 1,0            | 1,0   | 2,0                  | 2,0         | 2,0       | 10%                            | 13908                                 |               |  |  |  |  |  |  |  |
| MÉTRICAS (UNIDADES)     |                                   |                                 |                               |                        |                             |                            |                           |                |                          |                              |                   |                              |                |       |                      |             |           |                                |                                       |               |  |  |  |  |  |  |  |

Figura B.2: Matriz do Produto.



Apêndice C

Desenhos técnicos



