

Desenvolvimento e fabrico de um equipamento de suporte em terra para aplicação espacial

Pedro Jorge Custódio de Sá Pereira

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. José Duarte Marafona



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Janeiro 2016

Resumo

Uma missão espacial de exploração planetária exige o desenvolvimento de equipamento específico, tanto das sondas que serão enviadas para o espaço como de equipamento de suporte às operações que antecedem o lançamento. Os equipamentos que têm a função de suportar as etapas de fabrico, montagem, integração e testes designam-se de equipamentos de suporte em terra.

A presente dissertação recai sobre o desenvolvimento e fabrico de um equipamento de suporte a ser utilizado em terra, nomeadamente para o teste de componentes eletrónicos. Este será utilizado no âmbito da missão ExoMars 2018, cujo objetivo é obter um conhecimento mais profundo do planeta Marte.

Inicialmente é definida uma configuração conceptual, tendo por base o cumprimento dos requisitos, nomeadamente a utilização em ambiente controlado. A configuração detalhada é determinada através de um estudo comparativo baseado na análise estrutural a diferentes configurações. Após esta etapa, são pormenorizados os restantes elementos do equipamento, bem como a documentação que descreve a solução adotada.

A etapa de fabrico descreve as operações que levam à construção do equipamento, nomeadamente as operações de montagem e integração de componentes. Adicionalmente, são também detalhados os testes de validação a que o equipamento é submetido, bem como os preparativos para seu transporte. Desta forma, é descrito o ciclo completo de desenvolvimento do produto, bem como as competências desenvolvidas durante este processo.

Abstract

A planetary exploration mission requires the development of specific equipment, not only spacecrafts but also equipment to support the operations that occur prior to the launch. The equipment with the functions of supporting the manufacturing, assembly, integration and testing operations is referred as ground support equipment.

The subject of the present dissertation is the development and manufacturing of a ground support equipment, with the purpose of testing electronic components. This will be used in the scope of the ExoMars 2018 mission, with the objective of gaining deeper knowledge of the Mars planet.

Initially, a conceptual configuration is defined based on the compliance with the requirements, namely the use in a cleanroom. A detailed configuration is achieved by a comparison based on the structural analysis of different configurations. Furthermore, the components of the equipment are detailed, as well as the documentation that describes the adopted configuration.

Subsequently, the steps that lead to the manufacturing of the equipment are described, namely the assembly and integration operations. In addition, the test campaign to validate the equipment and the transportation arrangements are also detailed. As a result, a description of all the steps in the development of the product is made, including the skills developed during this process.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Active Space Technologies pela oportunidade de realizar este projeto, bem como pelo desenvolvimento que este me permitiu obter tanto a nível profissional como pessoal.

Aos meus orientadores, Eng.º João Neto e Eng.ª Raquel Loura, e também ao responsável da empresa, Ricardo Patrício, pelo apoio e disponibilidade que sempre demonstraram, bem como pela confiança que em mim depositaram. A todos os colaboradores com que tive o prazer de trabalhar durante a duração deste projeto, dedicando um agradecimento particular ao Eng.º Frederico Teixeira pela interminável paciência mas também pelo sentido de exigência que me transmitiu.

Os meus sinceros agradecimentos ao Prof. Monteiro Baptista e ao meu orientador Prof. José Marafona pela receptividade e disponibilidade que demonstraram na execução deste projeto.

A todos os colegas e amigos que me acompanharam ao longo do percurso que me levou até à realização deste projeto, e que contribuíram para que o pudesse realizar com sucesso. À Mafalda, uma palavra especial de agradecimento pela dedicação e incentivo.

À minha família dedico o maior agradecimento que se pode dar, pelo apoio incondicional que sempre me proporcionaram.

Índice

1	Introdução	10
1.1	Motivação	10
1.2	Objetivo	11
1.3	Estrutura do trabalho	11
2	Empresa e Metodologia	12
2.1	Apresentação da empresa	12
2.2	Metodologia do processo de conceção.....	13
2.3	Metodologia do processo de fabrico	14
3	Conceção	15
3.1	Análise de requisitos	15
3.1.1	Requisitos do Sistema.....	15
3.1.2	Restrições.....	16
3.2	Conceção da estrutura do ES1	25
3.2.1	Definição de configuração conceptual	25
3.2.2	Análise da estrutura.....	25
3.2.3	Integração dos acessórios na estrutura	38
3.3	Conceção de elementos funcionais	38
3.3.1	Elementos de suporte.....	38
3.3.2	Elementos de apoio à cablagem	38
3.3.3	Elementos de fixação	41
3.4	Documentação da solução.....	42
3.4.1	Definição do desenho.....	43
3.4.2	Manual do utilizador	44
3.4.3	Relatório orçamental	45
3.4.4	Desenho técnico 2D	45
3.5	Validação.....	46
4	Fabrico	47
4.1	Identificação de necessidades e condicionantes	47
4.2	Aquisição e Fabrico de componentes	47
4.2.1	Aquisição de componentes	47
4.2.2	Fabrico de componentes.....	49
4.3	Montagem dos componentes.....	51
4.4	Testes de validação.....	56
4.5	Preparação para transporte	57
5	Conclusões.....	59
6	Trabalhos Futuros	60
7	Referências	61

Lista de figuras

Figura 1: ExoMars Rover [1]	10
Figura 2: Logótipo da empresa Active Space Technologies.....	12
Figura 3: Digrama da metodologia do processo de conceção.....	13
Figura 4: Diagrama da metodologia do processo de fabrico	14
Figura 5: Dimensões do equipamento	16
Figura 6: Sala limpa (adaptado de [5]).....	17
Figura 7: Comparação do tamanho de partículas (de acordo com [4])	19
Figura 8: Contador de partículas.....	20
Figura 9: Solução comum de equipamento	22
Figura 10: Solução para sala limpa.....	23
Figura 11: Pormenor da solução para sala limpa	24
Figura 12: Características dos perfis de alumínio.....	26
Figura 13: Dimensões do perfil equivalente.....	26
Figura 14: Gráfico da convergência da malha de elementos finitos	27
Figura 15: Configuração F1.....	28
Figura 16: Configuração F2.....	28
Figura 17: Configuração F3.....	29
Figura 18: Gráfico de análise da configuração F1	30
Figura 19: Viga duplamente encastrada com uma força uniformemente distribuída	30
Figura 20: Gráfico de análise da configuração F2	31
Figura 21: Gráfico de análise da configuração F3	31
Figura 22: Perfil MiniTec© 45x45.....	32
Figura 23: Capacidade dos elementos de ligação de perfis (retirada de [9])	32
Figura 24: Gráfico de dimensionamento da placa base	33
Figura 25: Configurações de apoio à placa base.....	34
Figura 26: Configuração de apoio à placa base: Antes da simulação (A) e depois (B)	35
Figura 27: Gráfico de deslocamento máximo de cada configuração.....	36
Figura 28: Gráfico da composição de cada configuração.....	37
Figura 29: Gráfico de variação de massa e deslocamento máximo	37
Figura 30: Exemplo de suporte de cablagem	39
Figura 31: Exemplo de suporte de conectores	40
Figura 32: Exemplo de módulo de demonstração	40
Figura 33: Helicoil® (retirado de [14])	41
Figura 34: Modelo 3D detalhado	43
Figura 35: Desenho técnico 2D do modelo	45
Figura 36: Receção e inspeção de componentes.....	48
Figura 37: Braço de medição	49
Figura 38: Operação de corte dos perfis de alumínio	50
Figura 39: Execução dos rasgos no perfil de alumínio	50

Figura 40: Inserção de Helicoils®	51
Figura 41: Montagem da estrutura	52
Figura 42: Verificação de interfaces.....	52
Figura 43: Montagem da estrutura	53
Figura 44: Pormenor da estrutura	53
Figura 45: Montagem da placa base na estrutura	54
Figura 46: Equipamento completo	55
Figura 47: Detalhe do equipamento completo	55
Figura 48: Montagem do equipamento em ambiente controlado	56
Figura 49: Modelo do contentor de transporte	57

Lista de tabelas

Tabela 1: Valores máximos de concentração de partículas permitidos pela norma ISO 14644 e comparação com o US Federal Standard 209 E (elaborada a partir de [4])	19
Tabela 2: Composição de cada configuração	36

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

ESA	European Space Agency
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
ISO	International Organization for Standardization
CAD	Computer Aided Design
CATIA	Computer Aided Three-dimensional Application
ET1	Equipamento de Testes 1
ET2	Equipamento de Testes 2
EGSE	Electrical Ground Support Equipment
EN	EuroNorm
AISI	American Iron and Steel Institute
3D	Tridimensional
2D	Bidimensional
PME	Pequena e Média Empresa

1 Introdução

1.1 Motivação

Estabelecer se existiu, ou se ainda existe, vida em Marte corresponde a uma das questões científicas mais pertinentes e fascinantes do nosso tempo. De forma a investigar o ambiente nesse planeta a Agência Espacial Europeia iniciou o programa ExoMars, com o qual pretende utilizar tecnologias que permitam executar uma missão de envio para a Terra de amostras do solo, com horizonte a partir de 2020. Com este programa ficarão demonstradas as capacidades de aterrar um veículo em Marte, mobilidade na sua superfície, recolha e análise de amostras. A partir das amostras recolhidas será possível investigar sinais de vida presente ou passada, fazer uma caracterização geoquímica e geofísica do planeta, e também identificar potenciais ameaças para futuras missões tripuladas.

Para atingir este objetivo, a Agência Espacial Europeia irá enviar em 2018 um veículo autónomo de exploração da superfície, normalmente designado por Rover, neste caso o ExoMars Rover apresentado na Figura 1. Este terá a capacidade de se movimentar para locais de interesse científico, perfurar a superfície, recolher amostras do solo e de as analisar recorrendo a um conjunto de instrumentos dedicados à exobiologia e geoquímica – designado módulo Pasteur.

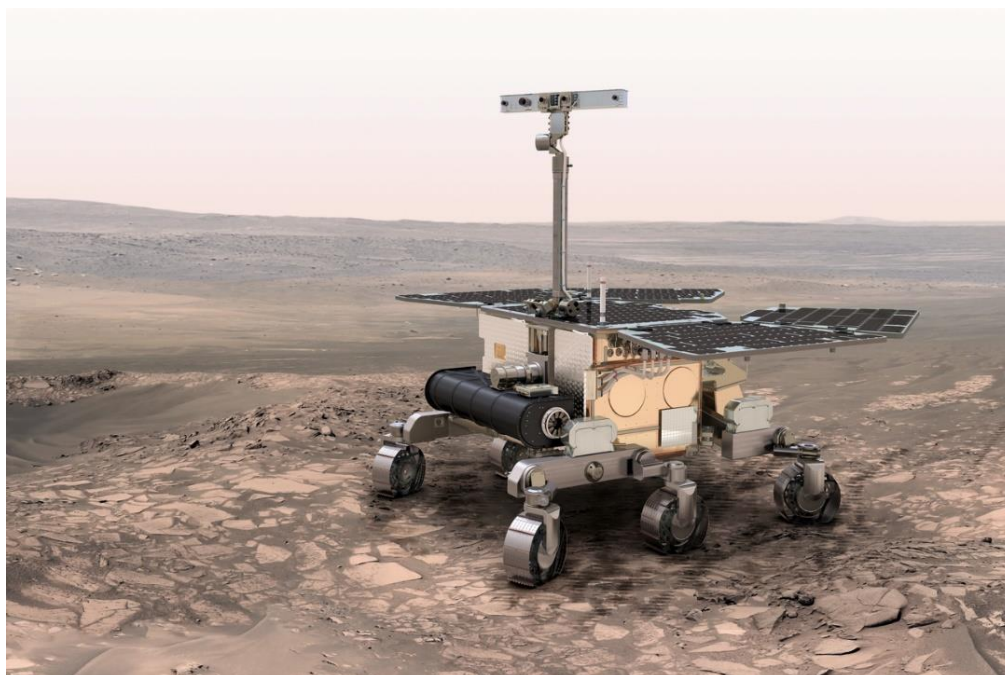


Figura 1: ExoMars Rover [1]

Uma missão espacial deste tipo requer o desenvolvimento de uma gama de equipamentos de suporte às atividades de fabrico, montagem, integração e teste dos componentes eletrónicos - normalmente designados por Electrical Ground Support Equipment (EGSE). Este tipo de equipamentos permitem verificar e validar o correto funcionamento e interação dos vários sistemas eletrónicos, bem como simular as etapas que ocorrem antes, durante e após o lançamento.

É sobre a conceção e fabrico de um EGSE a ser utilizado no âmbito da campanha de testes ao equipamento de bordo do Rover da missão ExoMars 2018 que recai o presente trabalho.

1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é conceber e fabricar um equipamento de suporte (EGSE) a ser utilizado no âmbito da campanha de testes de validação dos componentes eletrónicos implementados a bordo do Rover da missão ExoMars 2018 da ESA. Este desenvolvimento irá contemplar todo o ciclo de produção desde a conceção da solução para o equipamento, passando pelo fabrico e montagem dos seus componentes, até à entrega do sistema ao cliente.

O equipamento de suporte consiste num conjunto de componentes eletrónicos, suportados por elementos mecânicos, que será designada por Equipamento de Suporte 1 (ES1). Esta dissertação debruça-se exclusivamente sobre o desenvolvimento dos componentes mecânicos, detalhando quais as opções que foram tomadas de forma a cumprir os requisitos em todas as fases da produção. Este desenvolvimento decorreu em estreita sintonia com o desenvolvimento dos restantes componentes, em particular com o conjunto de cablagens necessárias às ligações eletrónicas entre os elementos a serem testados. Ao ser realizada em ambiente empresarial, esta dissertação tem também como objetivo a aquisição das competências que são necessárias ao longo do ciclo de desenvolvimento de um equipamento.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto por seis capítulos de acordo com a seguinte estrutura:

No primeiro capítulo é feita uma introdução que aborda a motivação e objetivos que conduzem a realização desta dissertação.

O segundo capítulo é composto pela apresentação da empresa onde ocorreu a realização do trabalho, bem como dos métodos que foram seguidos na sua execução.

O terceiro capítulo aborda as etapas de conceção do equipamento, tendo em conta os métodos referidos no capítulo anterior. É detalhado o processo de desenvolvimento, desde a análise inicial de requisitos até à documentação da configuração adotada.

O quarto capítulo dá seguimento ao anterior na medida em que é apresentada a fase de fabrico. Neste são expostas as operações envolvidas na execução do equipamento, desde a aquisição de componentes até ao transporte do mesmo.

O quinto capítulo descreve as conclusões retiradas da concretização deste trabalho.

O sexto capítulo apresenta as perspetivas de trabalhos futuros que advêm da realização desta dissertação.

2 Empresa e Metodologia

2.1 Apresentação da empresa

A presente dissertação foi realizada na sede da empresa Active Space Technologies, em Coimbra, cuja operação é focada no ramo espacial, aeronáutico, industrial e de defesa. As suas atividades estão dedicadas ao desenvolvimento de sistemas eletrónicos e mecânicos para ambientes extremos, nomeadamente instrumentação e sistemas de controlo aeroespaciais, bem como análise estrutural e térmica de componentes para aplicações espaciais.



Figura 2: Logótipo da empresa Active Space Technologies

A Active Space Technologies encontra-se certificada segundo as normas ISO 9001 e AS 9100, tendo sido distinguida em 2014 com o prémio PME excelência. Dado o seu desempenho nas áreas da engenharia mecânica e eletrotécnica possui clientes como a Agência Espacial Europeia, AIRBUS DS, Agusta Westland, e PSA Peugeot Citroën, entre outros.

2.2 Metodologia do processo de conceção

Os passos do método de conceção são apresentados no diagrama seguinte. O processo de definição do modelo 3D foi realizado com o auxílio do programa CATIA V5, sendo este um programa de CAD bastante utilizado no ramo aeroespacial.

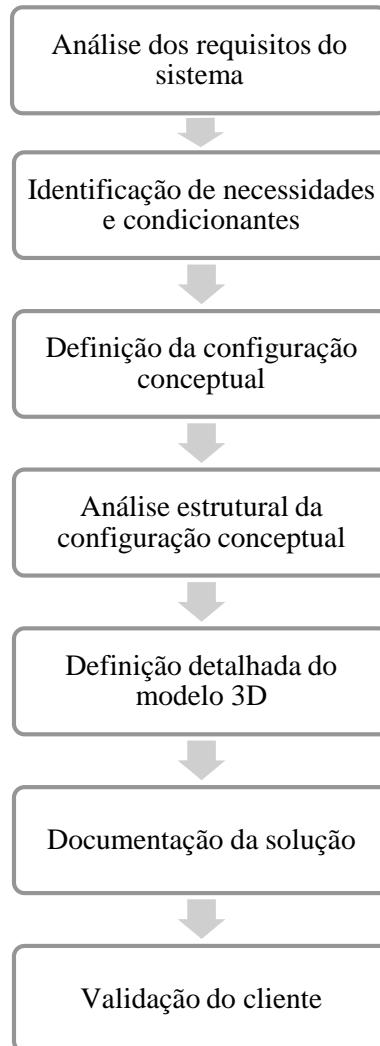


Figura 3: Diagrama da metodologia do processo de conceção

2.3 Metodologia do processo de fabrico

O seguinte diagrama ilustra os passos seguidos no processo de fabrico e montagem.

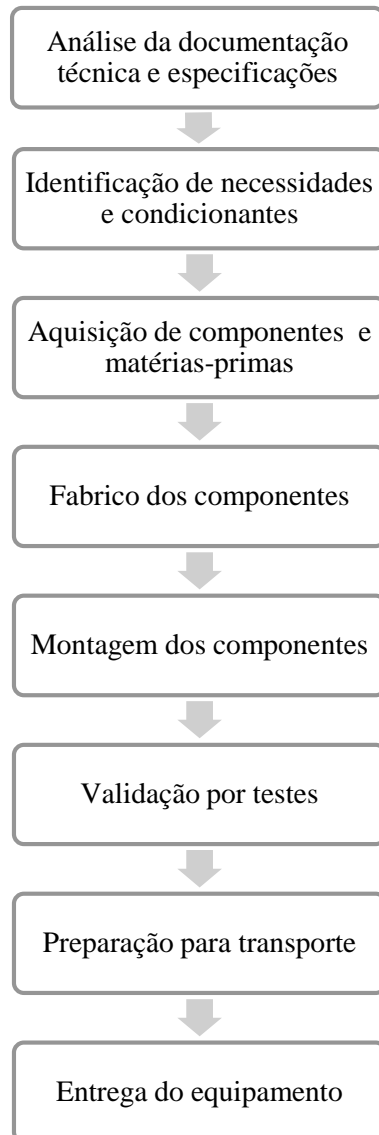


Figura 4: Diagrama da metodologia do processo de fabrico

3 Conceção

3.1 Análise de requisitos

Este foi o primeiro passo na conceção do equipamento, no qual se tomou contacto com toda a documentação fornecida pelo cliente, de forma a analisar quais os requisitos mais significativos. Um desafio adicional prendeu-se com o facto de a documentação fornecida inicialmente não ser a versão completa e final, dado que o desenvolvimento do equipamento de testes estava a acontecer sem que o componente estivesse finalizado. Este facto exigiu uma comunicação eficaz com o cliente, de forma a evitar atrasos desnecessários bem como a redefinição de requisitos que permitissem agilizar o processo de desenvolvimento.

3.1.1 Requisitos do Sistema

De acordo com o definido pelo cliente da empresa o equipamento de suporte deve alojar os componentes a serem testados, bem como a cablagem de ligação entre os mesmos e componentes externos, e ainda as respetivas estruturas de apoio. O seu desenvolvimento é feito de acordo com as normas da ECSS, cuja missão é desenvolver um conjunto único de normas a ser aplicado na gestão, engenharia e desenvolvimento de projetos espaciais europeus.

Os requisitos gerais deste sistema são os seguintes:

- O equipamento deve ser capaz de suportar as solicitações mecânicas geradas pelos componentes instalados e pelos operadores durante o seu uso e transporte;
- O equipamento é desenhado de forma a acomodar os elementos a serem testados de acordo com o definido pelo cliente, respeitando nomeadamente o critério de separação de cablagens;
- O equipamento deve possuir elementos que facilitem a sua manobra nas instalações, nomeadamente rodízios direcionais com travão, olhais de elevação e puxadores;
- O centro de gravidade deve ser o mais baixo possível, com os apoios colocados o mais próximo possível dos cantos de forma a proporcionar o máximo de estabilidade.

3.1.1.1 Requisitos de utilização

O equipamento deverá ser compatível com a instalação em sala limpa classe ISO 8, restrição que será detalhada na secção 3.1.2.1, e tendo em conta os seguintes fatores ambientais:

- Temperatura em operação $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$;
- Temperatura em transporte -10°C a 60°C ;
- Humidade $55\% \pm 10\%$.

Estas condições deverão manter-se durante o transporte, sendo os pormenores deste ponto detalhados na secção 4.5.

3.1.1.2 Requisitos dimensionais

O equipamento deverá ter 1500 mm de comprimento e 1200 mm de largura e proporcionar uma altura de trabalho entre 800 e 1000 mm. O equipamento tomará a forma de bancada, pelo que existirão elementos de suporte dispostos à altura de trabalho, não existindo restrições dimensionais para os mesmos. A Figura 5 mostra uma perspetiva geral das dimensões do equipamento que deverá pesar no máximo 100 kg. São ainda representados a azul os componentes a testar, bem como a laranja as placas adaptadoras entre estes e o equipamento.

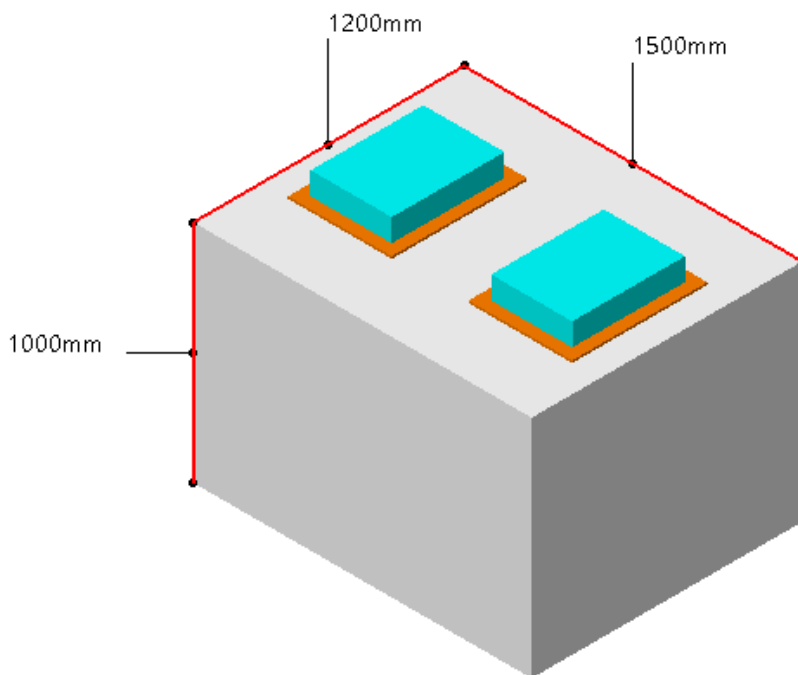


Figura 5: Dimensões do equipamento

3.1.2 Restrições

3.1.2.1 Desenho para sala limpa

De acordo com [2] o Artigo IX do “Outer Space Treaty” estabelece: “Os estados devem estudar o espaço exterior, incluindo a Lua e outros corpos celestes, e conduzir a sua exploração de forma a evitar a sua contaminação e também mudanças adversas na Terra resultantes da introdução de matéria extraterrestre e, quando necessário, adotar medidas apropriadas para este propósito.” Contaminação neste âmbito é definida como contaminação por constituintes orgânicos de forma a proteger o ambiente e permitir futuros estudos de exobiologia. Assim a norma [2] estabelece os procedimentos necessários para conter a contaminação em ambientes controlados de acordo com os requisitos de proteção planetária.

Além deste âmbito existe o efeito que a presença de contaminantes pode ter em sistemas espaciais. Entre os principais efeitos que são contabilizados em [3], é possível resumir de uma forma geral:

- Influência no resultado de determinadas experiências científicas (espectómetros de massa);
- Degradação da performance de equipamentos óticos (lentes, espelhos e janelas);

- Degradação da performance de equipamentos eletrónicos (ruído e corrosão em contactos, descargas e efeitos indesejados em superfícies condutoras e não-condutoras);
- Falha de mecanismos de precisão (fecho de válvulas, efeitos indesejados em propulsores);

No caso da missão ExoMars 2018, e mais especificamente nos equipamentos de análise de amostras a bordo do Rover, é necessário que não exista qualquer tipo de contaminação ao serem procurados compostos orgânicos. Caso sejam detetados compostos orgânicos em Marte, será necessário comprovar que estes não são provenientes da Terra. Para provar este facto o Rover irá fazer a medição inicial usando uma amostra em branco, cujos resultados deverão indicar a ausência de compostos orgânicos, provando que todo o processo de colheita, processamento e análise de amostras está livre de contaminantes. Caso este facto não se verifique, o objetivo da missão ficará comprometido. Em caso de sucesso o Rover terá a bordo um número suplementar de amostras em branco de forma a determinar qual o nível de contaminação entre as amostras recolhidas no solo de Marte, permitindo a calibração do equipamento de medição, evitando assim que o resultado de uma amostra influencie a seguinte [1].

Pela exposição feita até este ponto é perceptível a importância do desenvolvimento deste tipo de sistemas ocorrer num ambiente em que é controlada a presença de contaminantes. O ambiente controlado referido é normalmente designado por sala limpa, esquematizada na Figura 6, sendo a sua definição dada pela norma ISO 14644-1:

“Uma divisão em que a concentração de partículas em suspensão é controlada, sendo construída e utilizada de forma a minimizar a introdução, geração e retenção de partículas dentro da divisão e em que outros parâmetros relevantes, como temperatura, humidade e pressão são controlados.” [4].

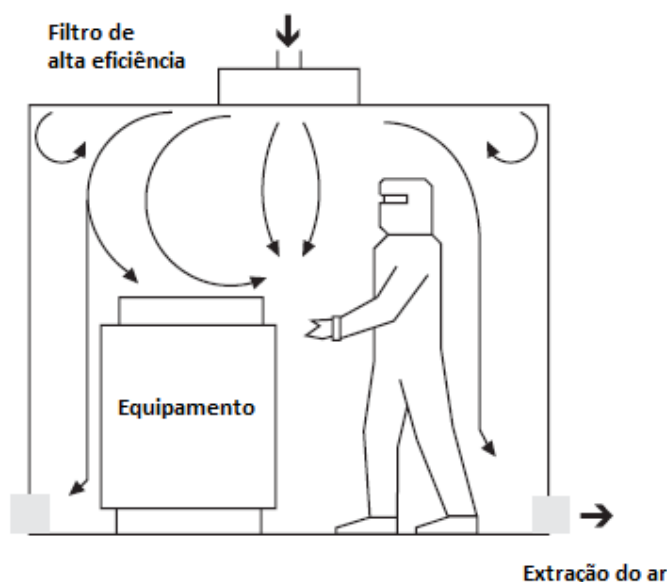


Figura 6: Sala limpa (adaptado de [5])

A concentração de partículas em suspensão é mantida abaixo de um determinado limite, através do uso de equipamentos de ventilação e filtragem do ar. A norma ISO 14644-1:1999 define as regras fundamentais de funcionamento, sendo baseada na norma US Federal Standard 209 E de 1988 – que apesar de deixar de ser oficialmente utilizado em 2001 é por vezes ainda utilizado como referência. De acordo com [4] a classificação ISO tem por base a seguinte equação:

$$C_n = 10^N \times \left[\frac{0.1}{D} \right]^{2.08}$$

C_n – Representa a concentração máxima permitida de partículas em suspensão que são iguais, ou maiores, que a dimensão considerada.

N – Número de classificação ISO, que não deve exceder o valor 9. São permitidos valores intermédios, sendo 0.1 o menor incremento permitido.

D – Diâmetro da partícula considerada em μm .

Na Tabela 1 encontramos os valores máximos permitidos para cada classe de limpeza.

Tabela 1: Valores máximos de concentração de partículas permitidos pela norma ISO 14644 e comparação com o US Federal Standard 209 E (elaborada a partir de [4])

Classificação ISO	Valor máximo de concentração de partículas (partículas por metro cúbico de ar)						US Federal Standard 209 E
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	1 μm	5 μm	
ISO classe 1	10	2	-	-	-	-	-
ISO classe 2	100	24	10	4	-	-	-
ISO classe 3	1000	237	102	35	8	-	1
ISO classe 4	10000	2370	1020	352	83	-	10
ISO classe 5	100000	23700	10200	3520	832	29	100
ISO classe 6	1000000	237000	10200	35200	8320	293	1000
ISO classe 7	-	-	-	352000	83200	2930	10000
ISO classe 8	-	-	-	3520000	832000	29300	100000
ISO classe 9	-	-	-	35200000	8320000	29300	-

De modo a que a dimensão das partículas presentes nesta norma seja perceptível, podemos comparar as dimensões em causa com elementos tangíveis como um cabelo humano cujo diâmetro, de acordo com [5], varia normalmente entre 70 e 100 μm . Segundo a mesma fonte, a visão humana consegue detetar partículas até valores próximos de 50 μm de diâmetro, sendo que a Figura 7 permite uma comparação visual entre as dimensões referidas e uma partícula de 0.5 μm como consta na Tabela 1.

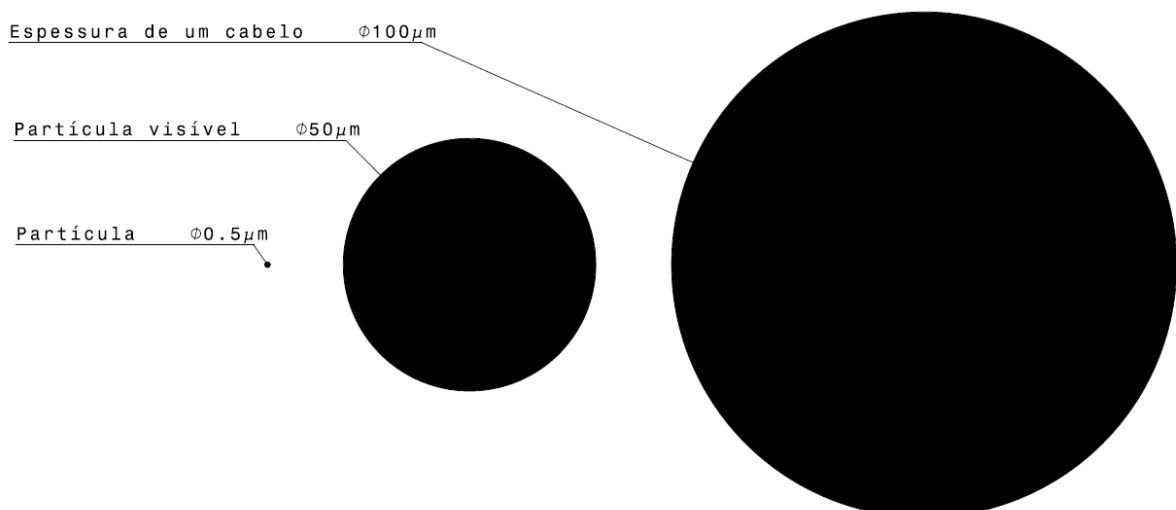


Figura 7: Comparação do tamanho de partículas (de acordo com [4])

De acordo com [3] o tamanho de uma partícula é definido como a maior dimensão linear no plano de observação através de um microscópio, ou o diâmetro equivalente de uma partícula detetada por instrumentação automática, como o contador de partículas apresentado na Figura 8. O diâmetro equivalente corresponde ao diâmetro de uma esfera de referência (tal como representada na Figura 7) que produz uma resposta equivalente, no equipamento de medição, à partícula que se pretende medir.



Figura 8: Contador de partículas

É de notar que a classificação presente nas normas tem como objetivo apenas a aceitação e classificação de salas limpas. Apesar dos procedimentos de teste e classificação poderem ser feitos quando a sala está equipada, a classificação não é transmissível ao equipamento, pelo que é errado dizer que um produto tem classe de limpeza ISO 5 por exemplo. Desta forma, nenhum material ou produto pode ser alocado a uma classe de limpeza. [5]

A exposição feita até este momento torna fácil a compreensão de que a conceção de um equipamento a operar em sala limpa deve obedecer a medidas que promovam a menor concentração de partículas. Apesar de não existir um conjunto de requisitos ou regras restritas, existem várias boas práticas que devem ser consideradas, como as que podemos encontrar no anexo E de [3]. Neste capítulo são apresentadas algumas regras gerais que devem conduzir a conceção de equipamentos, das quais é de destacar a aptidão à limpeza de materiais e partes mecânicas, e a verificação da compatibilidade de tratamentos superficiais com o nível de limpeza.

Ao nível de materiais, apesar do equipamento a conceber não ser utilizado em ambiente espacial, a seleção deve estar de acordo com a norma [6] cujo âmbito é a seleção de materiais para espaço e respetivos processos. De um modo geral, os materiais utilizados devem ser facilmente limpos e resistentes aos agentes de limpeza sem alterar as suas propriedades. Devem ser evitadas todas as operações que utilizem produtos abrasivos, sendo que, obviamente, o material não deverá ser processado após entrar na sala limpa.

Em termos de desenho do equipamento, devem observar-se as seguintes medidas:

- Os elementos devem ser dispostos de modo a interferirem o menos possível com o fluxo de ar;
- Os elementos devem permitir a passagem do ar e o adequado direcionamento da contaminação gerada;
- As superfícies devem ser suaves e conter o mínimo de fendas, juntas e relevos possíveis dado que as irregularidades superficiais acumulam partículas e as arestas afiadas danificam os panos de limpeza);
- Os elementos roscados, manípulos, elementos de elevação, e demais elementos “acessórios” devem ser cuidadosamente selecionados e colocados de forma a evitar acumulação de partículas;
- Devem ser evitadas as reentrâncias, lacunas, bordas e arestas de forma a evitar a concentração de partículas em áreas de difícil limpeza, cantos internos e côncavos devem ser evitados;
- A fricção entre peças deve ser evitada, mas caso isso não seja possível devem tomar-se as seguintes medidas: utilização de lubrificantes próprios para uso em sala limpa, encapsulamento dos materiais, extração de partículas recorrendo a vácuo, manter os materiais friccionados o mais longe do produto e mais perto da saída de ar;
- Utilização de movimento rotacional em vez de linear: um movimento rotacional gera menos partículas e é mais fácil de selar os seus elementos;
- O número de componentes utilizados deve ser o mínimo, se possível atribuir ao mesmo elemento várias funções;
- Os furos devem ser tapados (com capas ou fita Kapton®), caso seja necessário utilizar furos ou depressões, estes devem estar virados para baixo;
- Incluir coberturas temporárias para reduzir a contaminação em elementos que não estão a ser utilizados;

De forma a ser compreendida a aplicação prática destas medidas serão apresentados dois exemplos que ilustram quais as diferenças entre uma solução comum e uma solução concebida para utilização em sala limpa. Esta comparação permite analisar quais as medidas que foram adotadas na conceção do equipamento.

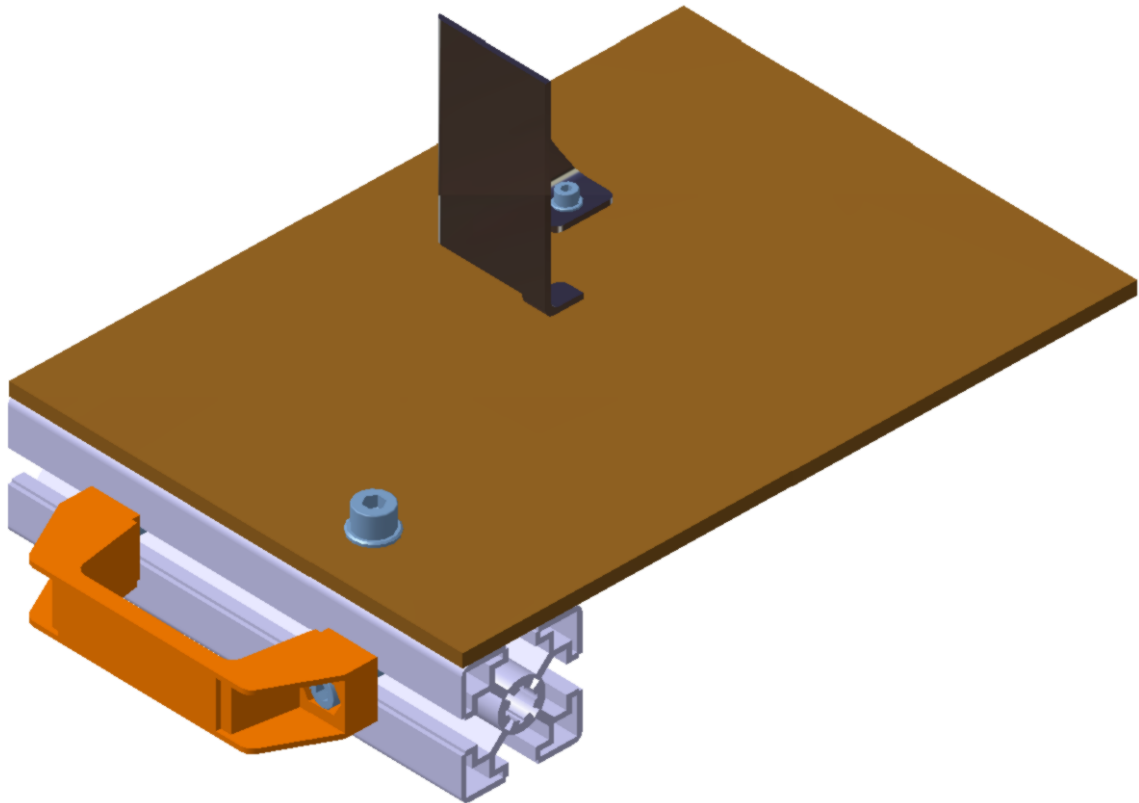


Figura 9: Solução comum de equipamento

Na Figura 9 é demonstrada uma solução comum para uma utilização em ambiente não controlado, pelo que podemos observar que as medidas anteriormente mencionadas não são respeitadas, nomeadamente:

- O perfil utilizado tem ranhuras sem cobertura;
- O puxador utilizado possui relevos;
- O desenho da peça negra bloqueia o fluxo de ar junto da superfície de apoio;
- Elementos de fixação, como parafusos, não se encontram cobertos.

Todos estes pontos contribuem para a acumulação e aumento do número de partículas em suspensão, pelo que a sua utilização não é aconselhada num ambiente controlado. Por outro lado, podemos observar na Figura 10 uma solução com vista à utilização em sala limpa.

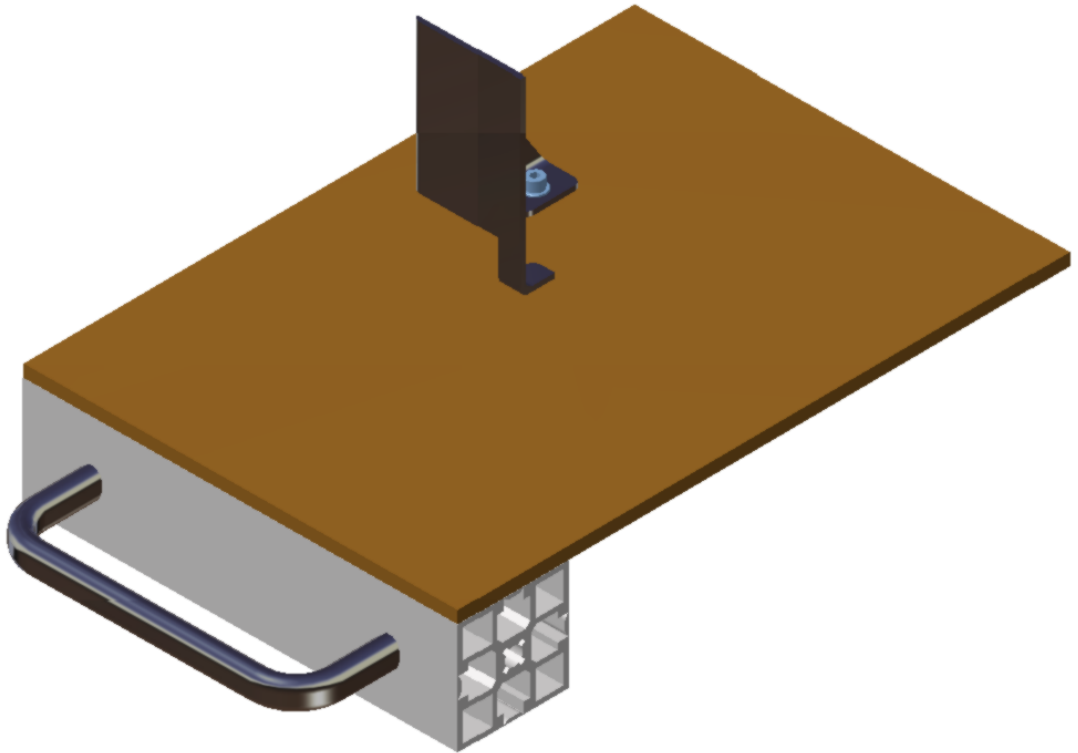


Figura 10: Solução para sala limpa

Ao comparar a solução da Figura 10 com a da Figura 9, podemos observar as seguintes diferenças:

- O perfil é fechado, pelo que as ranhuras estão cobertas
- O puxador não possui arestas ou concavidades
- O desenho da peça negra permite a passagem de ar junto dos seus apoios
- O parafuso de ligação entre a placa base e o perfil foi eliminado, sendo substituído pela ligação representada na Figura 11.

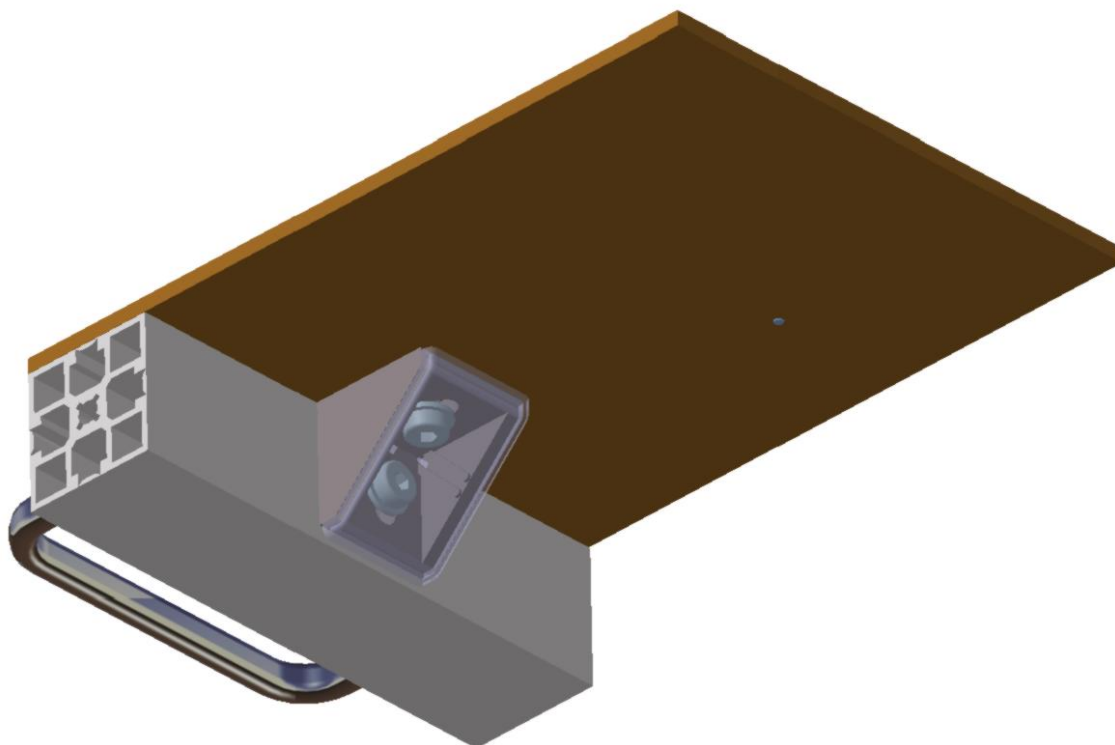


Figura 11: Pormenor da solução para sala limpa

A ligação representada na Figura 11 faz uso de uma peça de forma angular, que proporciona uma ligação aparafusada entre as peças, permitindo que seja coberta por uma tampa (translúcida na figura). Esta solução de ligação, apesar de mais complexa do que a apresentada na Figura 9, apresenta a vantagem de evitar zonas de concentração de partículas.

A adoção de uma solução de ligação aparafusada mais compatível com utilização em ambiente controlado, como o apresentado na Figura 11, permite questionar se o mesmo procedimento deve ser aplicado a todas as ligações. Ao compararmos a Figura 9 com a Figura 10 é possível verificar que a ligação aparafusada da placa ao perfil foi alterada, mas a ligação da peça negra à placa não foi, o que se justifica pela função dessa mesma ligação. Apesar de ser sempre possível cobrir as cabeças dos parafusos e evitar a acumulação de partículas nas suas reentrâncias, a função da ligação também é um fator a considerar. A ligação que foi alterada tem uma função estrutural, sendo de carácter permanente, pelo que retirar os elementos de fixação para limpeza não é viável. Por outro lado, a peça negra possui uma função acessória, pelo que retirar a ligação para ser feita a limpeza tem efeitos reduzidos, justificando-se a manutenção da solução existente.

Por fim, podemos concluir relativamente aos aspetos referidos até este ponto que a implementação de medidas de minimização da contaminação na conceção de equipamento não é linear nem obedece a regras estritas, sendo possível optar por diferentes configurações que permitam atingir resultados satisfatórios. O critério que deve presidir à escolha da solução a adotar deverá ser o da facilidade de limpeza e o de manutenção dessa condição, adaptando a conceção à classe de limpeza em que o equipamento será utilizado.

3.2 Conceção da estrutura do ES1

3.2.1 Definição de configuração conceptual

De forma a definir uma configuração inicial, foi feito um estudo comparativo entre várias configurações estruturais. Este estudo teve como base uma análise estrutural realizada através do módulo de análise de elementos finitos do programa CATIA V5, que apresenta algumas limitações em análises complexas quando comparado com outros programas dedicados à análise de elementos finitos. Neste caso o que se pretende fazer é uma análise estrutural estática relativamente simples, para a qual o módulo do programa revelou ter as funcionalidades necessárias à sua execução, sendo que para o seu uso foi consultada a referência [7].

As variáveis em estudo, cujo valor se pretende otimizar, são as seguintes:

- Massa
- Deslocamento máximo

Este estudo teve como objetivo determinar quais os parâmetros mais significativos, de forma a otimizar a solução. O ponto de partida foi uma análise dos seguintes aspetos:

- Configuração da estrutura base
- Configuração de fixação da placa base
- Características da placa base

A partir da análise de requisitos a configuração dos seguintes elementos foi determinada à partida:

- Placa base – devido às suas dimensões e necessidade de interface com os restantes elementos, e de acordo com os requisitos definidos pelo cliente, o material será alumínio tratado superficialmente com Alodine. Este tratamento é baseado na aplicação de um químico em pó que é utilizada para produzir uma camada protetora no alumínio que minimiza a corrosão e proporciona uma melhor adesão de tinta, caso seja aplicada [8].
- Estrutura – Os elementos a utilizar na estrutura serão perfis modulares de alumínio, de forma a facilitar a montagem da mesma, bem como a integração dos elementos e acessórios do equipamento.

3.2.2 Análise da estrutura

3.2.2.1 Método de análise

Dado que se pretende estudar a configuração de uma estrutura em perfis de alumínio, é necessário determinar qual o tipo de perfil mais adequado. Devido às características recortadas do interior destes perfis, a sua análise recorrendo a elementos finitos torna-se pouco prática dado que são necessários muitos elementos de malha para simular as secções interiores. Desta forma, foi determinado que para a análise estrutural seria vantajoso determinar um perfil equivalente, com as mesmas dimensões exteriores e momentos de inércia do perfil real. Os tipos de perfil escolhidos encontram-se na Figura 12.

	30	45	60	90			
Descrição							
Perfil Bosch© 30x30 mm	Perfil MiniTec© 45x45 mm	Perfil Bosch© 60x60 mm	Perfil MiniTec© 90x90 mm				
Dimensões [mm]							
Características							
Peso	0.80 kg/m	Peso	1.97 kg/m	Peso	2.60 kg/m	Peso	5.33 kg/m
I_x	2.70 cm ⁴	I_x	14.09 cm ⁴	I_x	39.70 cm ⁴	I_x	195.27 cm ⁴
I_y	2.70 cm ⁴	I_y	14.09 cm ⁴	I_y	39.70 cm ⁴	I_y	195.27 cm ⁴
Perfil equivalente [mm]							

Figura 12: Características dos perfis de alumínio

Os momentos de inércia segundo os eixos x e y (designados como I_x e I_y) são fornecidos pelos dados dos fabricantes e, dado que se pretende manter as dimensões exteriores do perfil, a dimensão a determinar no perfil equivalente é a espessura, que será determinada a partir da expressão:

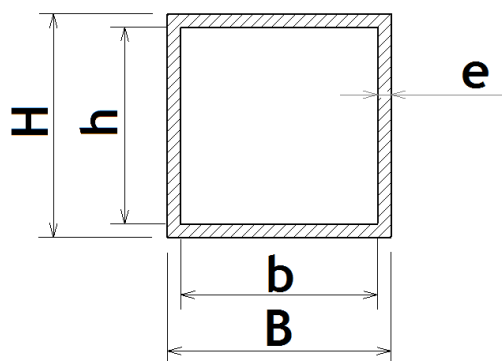


Figura 13: Dimensões do perfil equivalente

$$I_x = I_y = \frac{BH^3}{12} - \frac{bh^3}{12}$$

Substituindo os valores de momento de inércia fornecidos pelos fabricantes e, dado que o perfil é quadrado temos $B=H$ e $b=h$, é possível obter os valores das dimensões a utilizar e, consequentemente, qual a espessura e da Figura 13. Os resultados deste cálculo para cada tipo de perfil encontram-se apresentados na Figura 12.

3.2.2.2 Convergência da malha de elementos finitos

De forma a validar a análise estrutural, foi efetuado um estudo prévio de convergência da malha de elementos finitos. Para este estudo foram utilizadas as configurações apresentadas na secção 3.2.2.5. Os resultados apresentados referem-se à configuração O, solicitada pelo peso próprio e um carregamento adicional de 200 N na zona das placas adaptadoras (solicitação designada como 1G+200N), condição que será detalhada na secção referida anteriormente.

O gráfico da Figura 14 apresenta os valores obtidos, sendo verificável que para valores de elemento de malha inferiores a 15 mm, os valores de deslocamento máximo convergem. Desta forma, será o valor de 15 mm para o elemento de malha que será utilizado, dado que a utilização de um elemento de menor dimensão conduziria a um esforço computacional adicional sem que este fosse traduzido numa melhoria da precisão dos resultados.

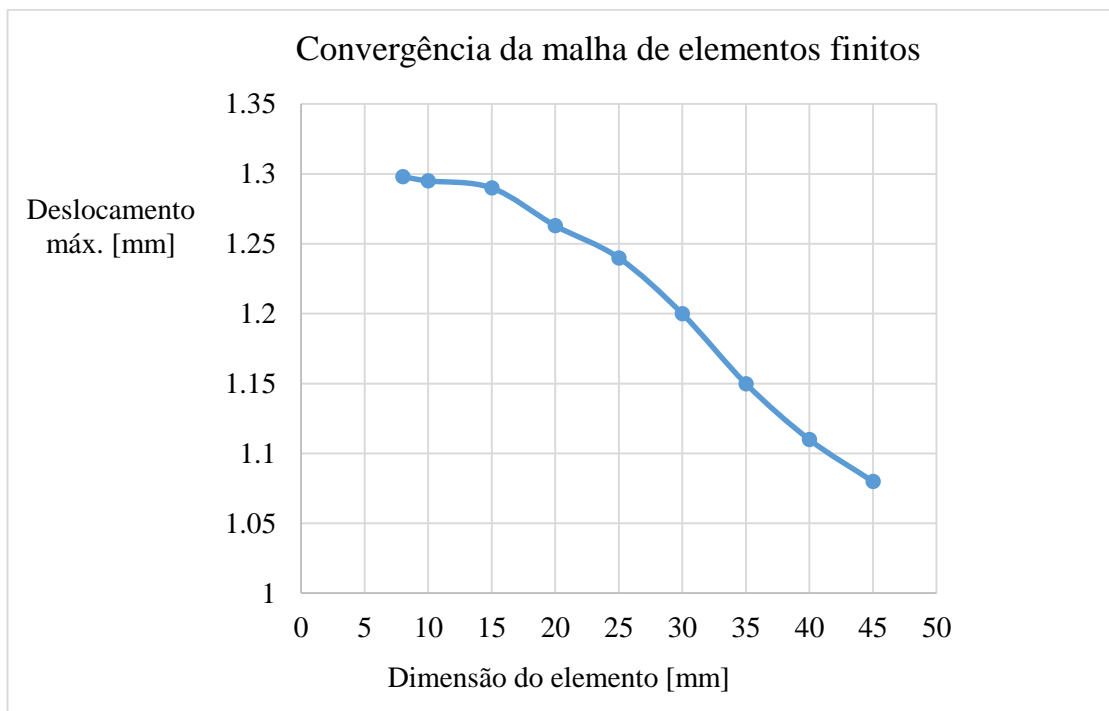
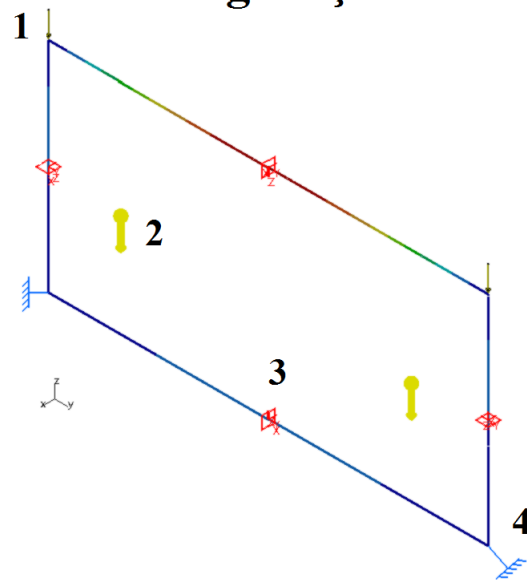


Figura 14: Gráfico da convergência da malha de elementos finitos

3.2.2.3 Configuração da estrutura base

De forma a determinar a configuração da estrutura base mais apropriada foi efetuada uma análise comparativa entre três configurações, tendo por base os requisitos dimensionais. Foi considerado o lado de maiores dimensões de acordo com a Figura 5, neste caso 1,5 m de comprimento e 0,7 m de altura - tendo em conta que serão incluídos acessórios como rodas e olhais de elevação, não seria adequado simular toda a dimensão disponível. Assim as configurações estudadas foram designadas por F1, F2 e F3 e encontram-se detalhadas nas figuras seguintes. As configurações foram simuladas recorrendo a elementos de viga, pelo que a configuração do perfil se encontra representada por uma reta, sendo que a dimensão e a orientação do perfil são indicadas pelo elemento 3 conforme a legenda das figuras.

Configuração F1

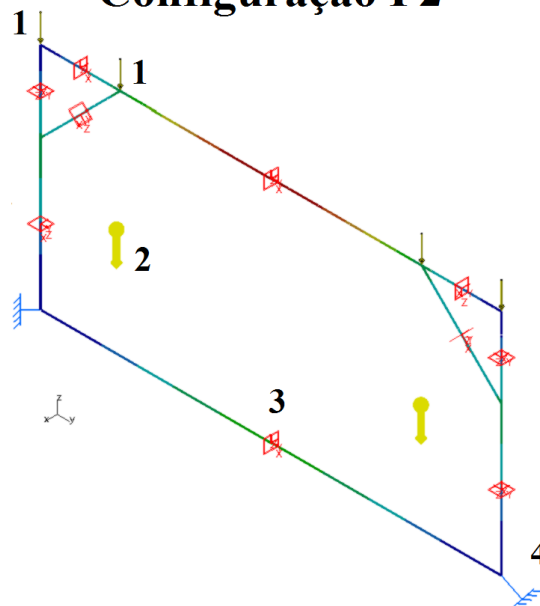


- 1 - Força distribuída 2 - Força gravítica
3 - Orientação do perfil 4 - Encastramento

Figura 15: Configuração F1

A configuração F1 representada na Figura 15 apresenta uma estrutura retangular básica, em que as extremidades dos dois elementos verticais contactam com os apoios, simulados através de um encastramento. Na trave superior é aplicada uma força distribuída de forma a simular o carregamento provocado pelos componentes que o equipamento irá suportar.

Configuração F2



- 1 - Força distribuída 2 - Força gravítica
3 - Orientação do perfil 4 - Encastramento

Figura 16: Configuração F2

A configuração F2 apresentada na Figura 16 possui uma configuração semelhante à F1, mas neste caso são incluídos dois elementos diagonalmente dispostos de forma a suportar o carregamento provocado pela força distribuída aplicada na trave superior.

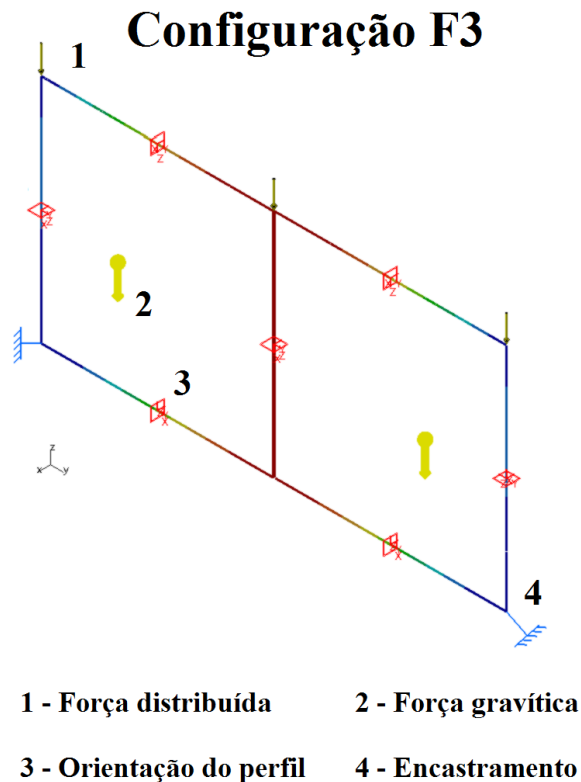


Figura 17: Configuração F3

A configuração F3, de acordo com a Figura 17, acrescenta à configuração F1 um elemento vertical a meio da estrutura com o propósito de suportar as cargas na travessa superior.

A cada configuração foram atribuídos os quatro tipos de perfis equivalentes apresentados na Figura 12 e, para cada um destes, foram aplicadas as solicitações: 1G, 5G, 5G+100N na travessa superior. Além destes carregamentos, foram aplicadas condições fronteira sob a forma de encastramentos na localização dos apoios em todas as configurações, tal como representado nas respetivas figuras. Os resultados obtidos para a configuração F1 encontram-se apresentados no gráfico da Figura 18.

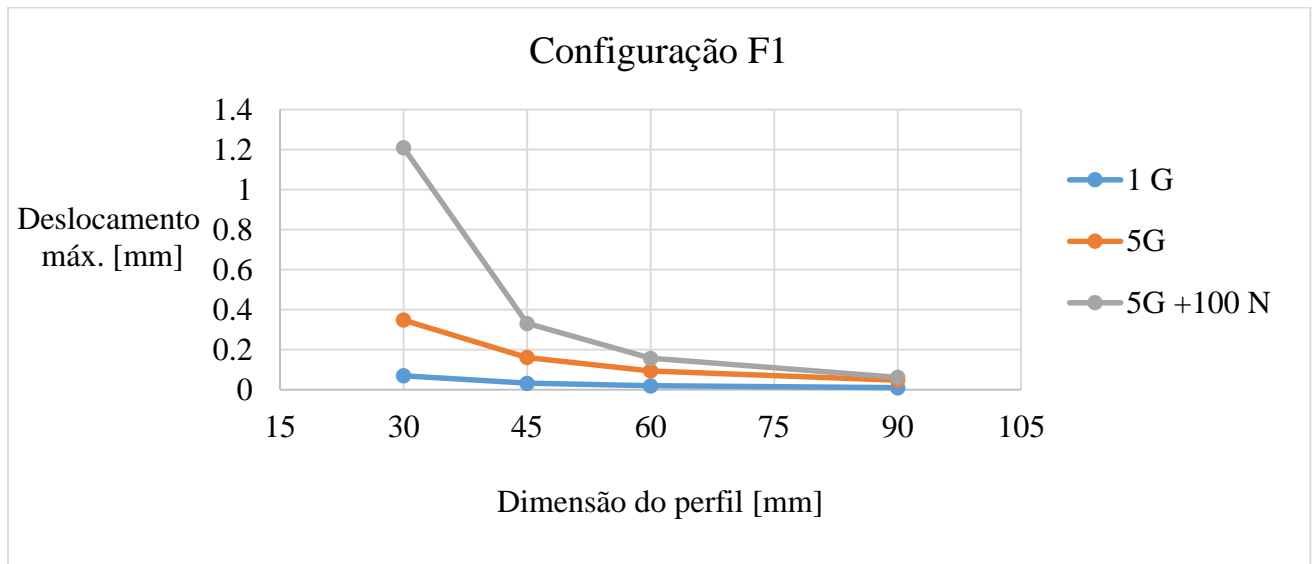


Figura 18: Gráfico de análise da configuração F1

Após a análise dos dados obtidos para a configuração F1 foi realizada uma comparação com resultados obtidos de uma forma teórica. Estes cálculos foram realizados a partir de uma análise da deformação devido à flexão, sendo que a parte superior da estrutura foi considerada uma viga duplamente encastrada sujeita a uma força uniformemente distribuída, como é visível na Figura 19. Dado o maior deslocamento ocorre a meio vão, podemos utilizar a equação seguinte para o deslocamento máximo [9].

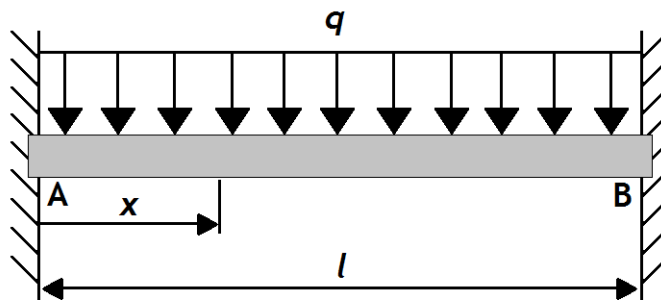


Figura 19: Viga duplamente encastrada com uma força uniformemente distribuída

$$y_{max} = y_{x=l/2} = \frac{ql^4}{384EI}$$

Considerando o perfil 45x45 que apresenta um valor de 1,97 kg/m, sendo solicitada apenas pelo peso próprio obtemos $q = 1,97 \text{ kg/m} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 19,3 \text{ N/m}$. O valor do comprimento é semelhante ao modelo 3D de $l = 1,5 \text{ m}$, o momento de inércia é dado pelo fabricante $I = 14,09 \text{ cm}^4$, e por fim o Módulo de Young do alumínio $E = 70 \text{ GPa}$.

Substituindo as incógnitas obtemos:

$$y_{max} = y_{x=l/2} = \frac{19,3 * 1,5^4}{384 * (70 * 10^9) * (1,409 * 10^{-7})} = 0,0268 \text{ mm}$$

Ao comparar o valor de 0,0322 mm obtido através da simulação para 1G com o obtido na equação acima, verifica-se que este é 16,7% inferior, o que foi considerado satisfatório. Assim, foi prosseguida a abordagem tomada até este ponto e analisadas as restantes configurações somente através da simulação. As Figura 20 e 19 apresentam os gráficos de resultados obtidos para as configurações F2 e F3 respetivamente.

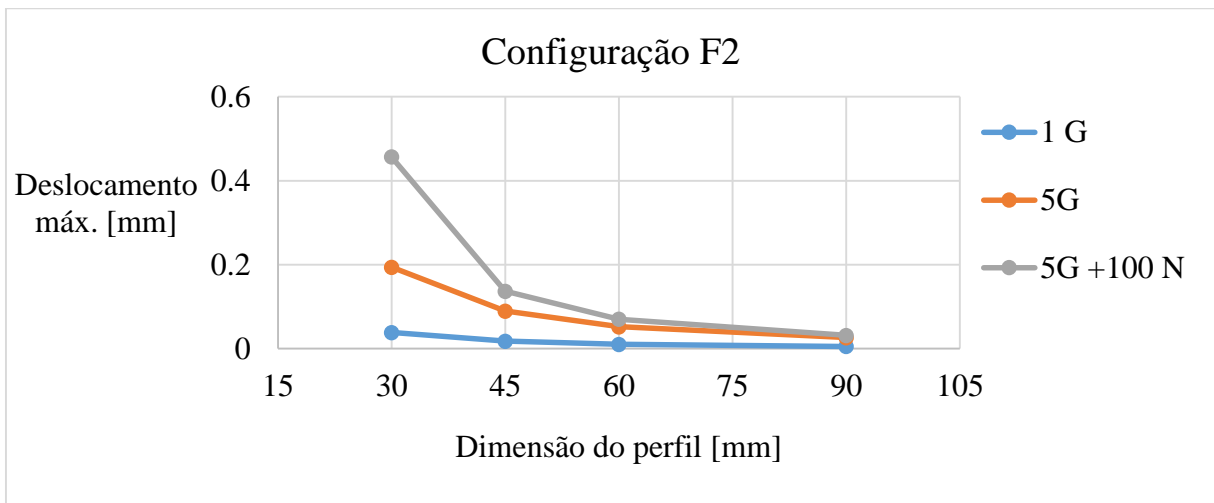


Figura 20: Gráfico de análise da configuração F2

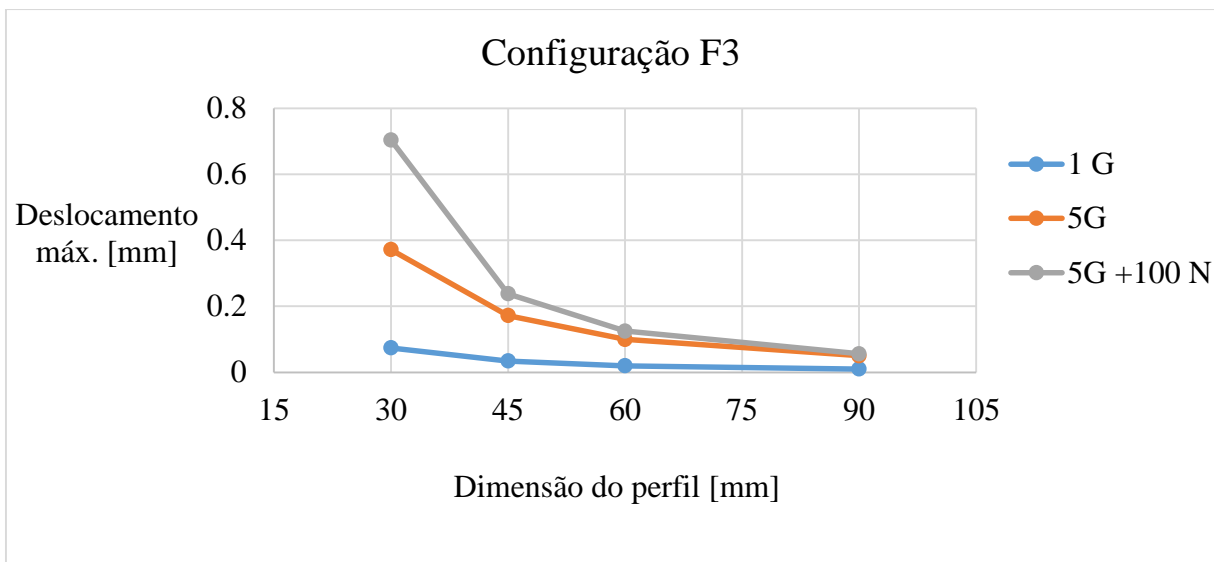


Figura 21: Gráfico de análise da configuração F3

A partir da análise dos gráficos é possível retirar duas conclusões:

- A configuração que apresenta os menores valores de deslocamento máximo é a configuração F2.
- O tipo de perfil mais vantajoso é o 45x45 mm. Dado que os valores de deslocamento convergem com o aumento da dimensão, este perfil apresenta uma grande redução de deslocamento máximo em relação ao perfil 30x30, enquanto a diferença para o perfil 60x60 é significativamente mais reduzida.

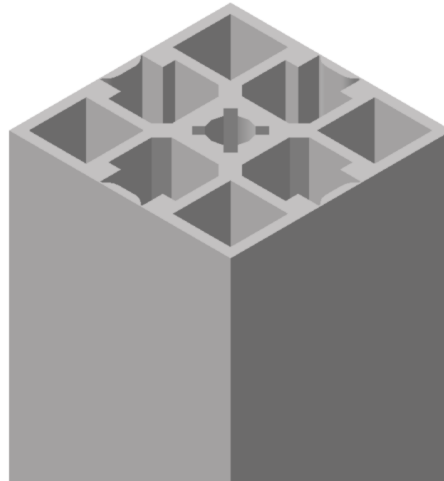


Figura 22: Perfil MiniTec© 45x45

A conceção de uma estrutura modular exige não só a seleção do tipo de perfil, mas também a seleção dos elementos de ligação entre perfis. Neste processo é necessário recorrer à informação fornecida pelo fabricante através do catálogo [10], sendo a informação mais revelante apresentada na Figura 23.

LOAD CAPACITY

ANGLE	NUMBER OF SCREWS	Mmax (N)	Mmax (Nm)
Angle 19	2	3.600	280
Angle 25	2	3.600	280
Angle 45	2	3.600	280
Angle 45x90	4	7.200	560
Angle 90	8	14.400	1.120

All values include double safety.

These values are valid only for angles mounted in pairs
If used one-sided, the load reduces as follows:

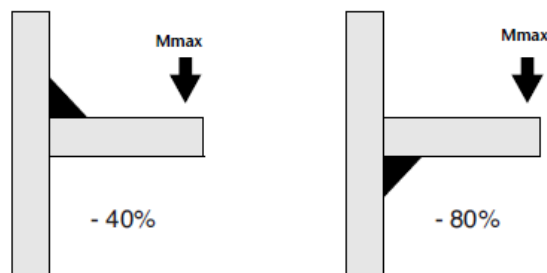


Figura 23: Capacidade dos elementos de ligação de perfis (retirada de [10])

A seleção inicial foi o componente designado “Angle 45x90” e a partir da análise da Figura 23 é possível verificar que, no caso aplicável às travessas superiores da estrutura, o momento máximo (M_{max}) sofre uma redução de 80%, passando de 560 Nm para 112 Nm. Dado que o elemento de perfil de maior comprimento possui 1,5 m, ao considerar uma carga a meio do mesmo é possível através da equação do momento determinar uma força máxima de cerca de 150 N. Este valor corresponde a uma carga pontual de 15,2 kg, sendo que a aplicação de uma solicitação deste tipo não está prevista para o equipamento. Adicionalmente, dado que a configuração F2 possui um valor inferior a 1,5 m para o comprimento livre da travessa superior, o valor da carga pontual admissível será mais elevado, pelo que se pode concluir que este elemento de ligação é adequado.

3.2.2.4 Características da placa base

De forma a otimizar as dimensões da placa base, sendo neste caso a única dimensão em questão a espessura dado que as restantes são determinadas pelos requisitos, foi efetuado um estudo do deslocamento máximo em função de diferentes valores para a mesma. Para a elaboração do gráfico da Figura 24 foi utilizada a configuração H (apresentada na Figura 25) solicitada pelo peso próprio, bem como a configuração O, cuja utilização será explicada na análise aos dados obtidos.

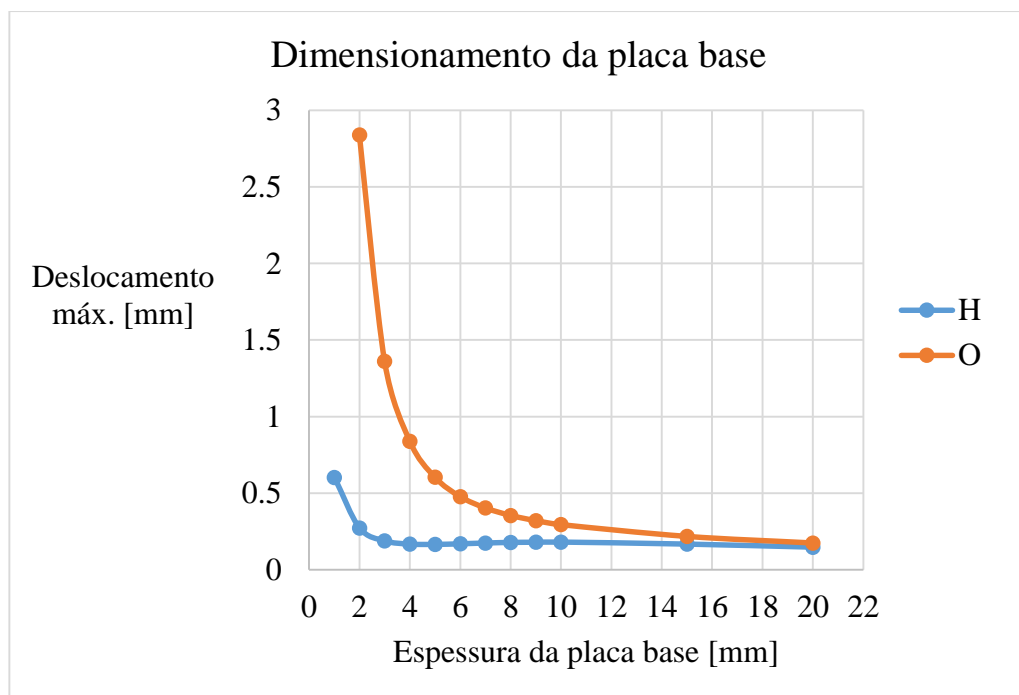


Figura 24: Gráfico de dimensionamento da placa base

No gráfico da Figura 24 podemos observar, para a configuração H, a estabilização dos valores de deslocamento a partir dos 4 mm. O ligeiro aumento dos valores de deslocamento entre os 6 e 15 mm é explicado por um erro associado ao modelo utilizado na simulação, dado que o comportamento teórico deveria ser de convergência. Este comportamento convergente é demonstrado pela inclusão dos resultados da configuração O, cujo modelo é mais simples, verificando-se a convergência de valores. A partir destes resultados optou-se por utilizar uma placa base de 5 mm de espessura. Apesar do valor ser superior aos 4 mm referidos anteriormente, o aumento de 1 mm na espessura corresponde a um incremento de cerca de 5 kg, valor que foi considerado aceitável. Desta forma é melhorada a interface para os elementos de fixação, tendo em conta a maior disponibilidade de comprimento de rosca ao nível das ligações aparafusadas.

3.2.2.5 Configuração de apoio à placa base

De forma a determinar qual a configuração que melhor responde às solicitações impostas ao equipamento, foi feito um estudo comparativo tendo em conta os resultados obtidos nas análises anteriores (perfil Minitec© 45x45, placa base 5mm). As variáveis em estudo para cada configuração são a massa e o deslocamento máximo, sendo as configurações apresentadas na Figura 25.

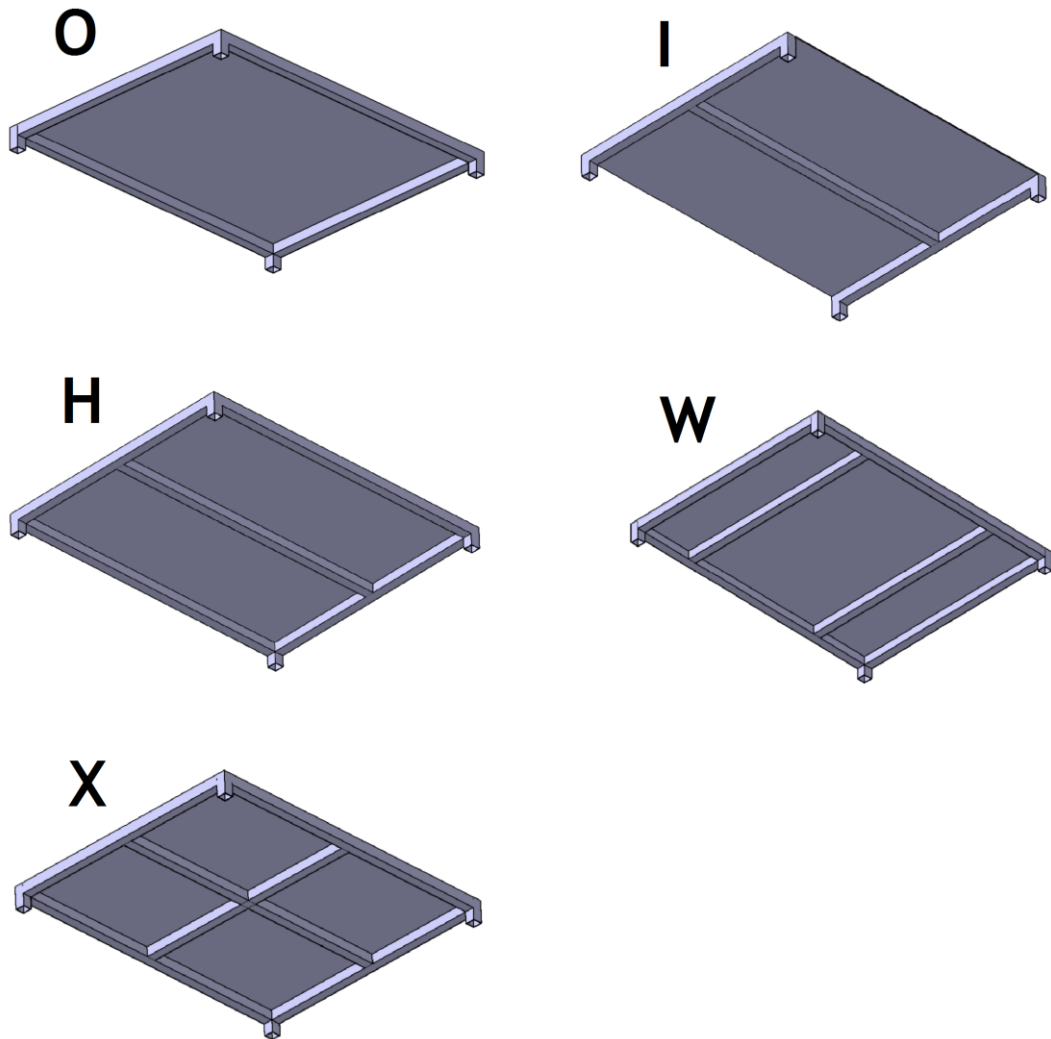


Figura 25: Configurações de apoio à placa base

A cada configuração foram aplicadas três solicitações diferentes. Em primeiro lugar, a solicitação devida ao peso próprio, designada por 1G, sendo de seguida incrementada por uma força distribuída de 200 N na localização das placas adaptadoras, solicitação designada por 1G+200N e que é o caso mais próximo da realidade. Por fim, a aceleração gravítica aplicada foi incrementada cinco vezes originando a solicitação 5G+200N.

A Figura 26 mostra, em A, a localização das forças aplicadas e condições fronteira, pelo que se pode identificar a força gravítica aplicada a todo o modelo, e as forças distribuídas nas placas adaptadoras, bem como os encastramentos nos apoios. Na mesma figura, mas em B, são apresentados visualmente os resultados sob a forma de uma escala de cores em que a progressão nas cores quentes demonstra o aumento do deslocamento máximo.

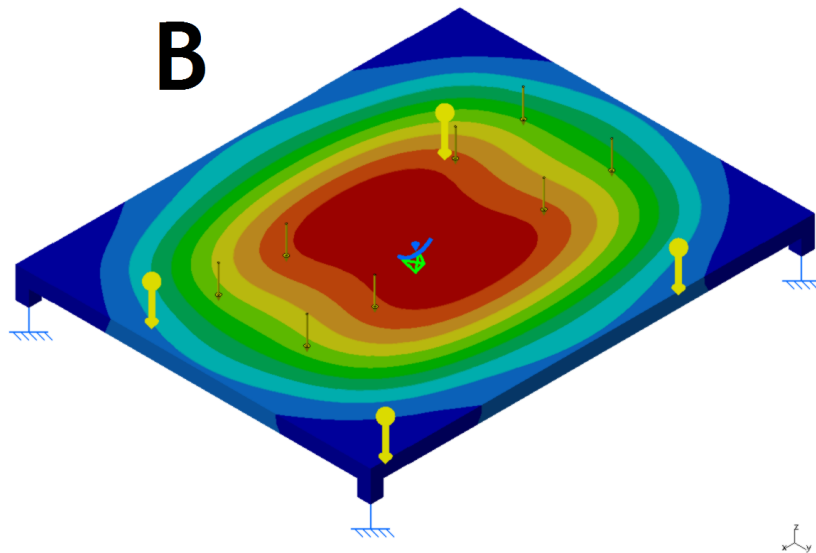
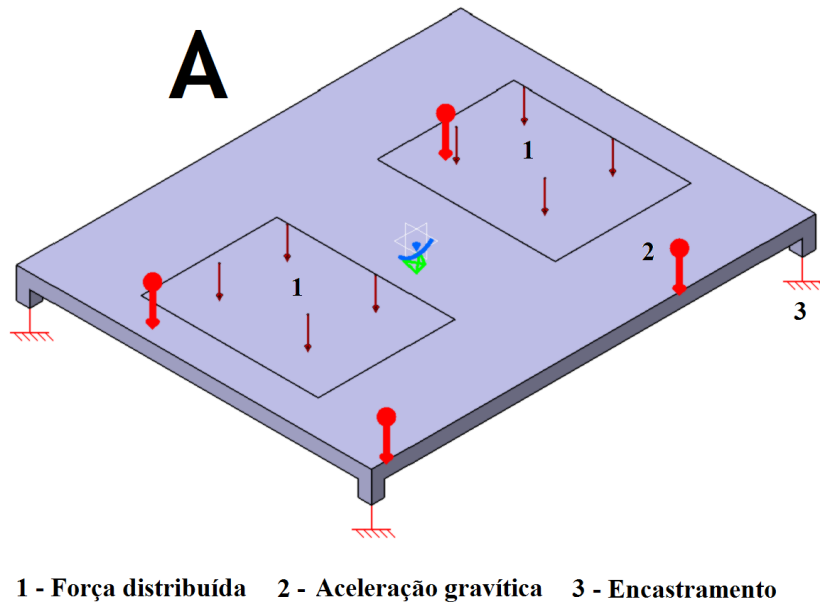


Figura 26: Configuração de apoio à placa base: Antes da simulação (A) e depois (B)

No gráfico da Figura 27 são apresentados os valores de deslocamento máximo resultantes da aplicação das solicitações anteriormente descritas às diferentes configurações apresentadas na Figura 25. O valor apresentado refere-se ao valor máximo de deslocamento para cada configuração, sendo que a localização do ponto onde deslocamento ocorre não é coincidente em todas as configurações.

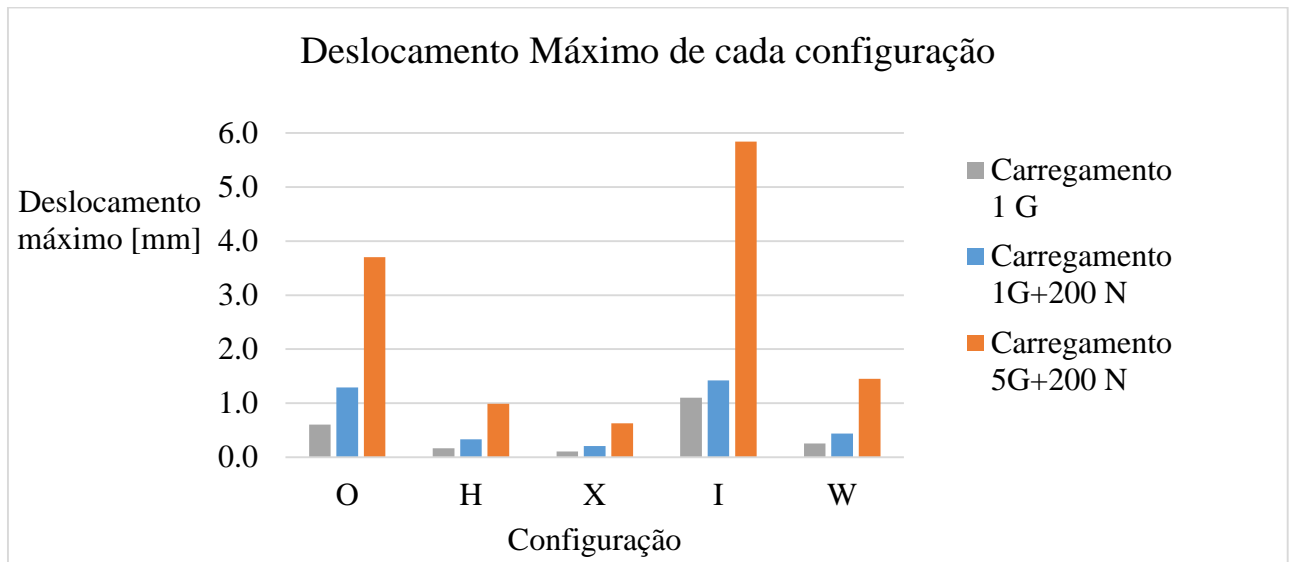


Figura 27: Gráfico de deslocamento máximo de cada configuração

Ao analisar o gráfico da Figura 27 é possível verificar que o aumento da solicitação provoca uma amplificação dos resultados, ou seja, o deslocamento é mais elevado mas existe uma relação que as configurações mantêm entre si. As configurações O e I apresentam os valores mais elevados, pelo que se tornam menos interessantes. É também de notar que são as configurações H, X e W que apresentam menores valores de deslocamento, mas este não é o único fator em análise.

Foi também determinada a massa de cada configuração tendo em conta o comprimento de perfil utilizado e o número de uniões necessárias para a sua instalação, cuja contribuição para a massa total pode ser observada na Tabela 2. A Figura 28 apresenta graficamente a contribuição de cada um dos componentes para o valor da massa total.

Tabela 2: Composição de cada configuração

Configuração	Perfil		Uniões		Massa
	Comprimento [m]	Massa [kg]	Quantidade	Massa [kg]	Total [kg]
O	5.04	10.06	4	1.20	11.26
H	6.45	12.88	8	2.40	15.28
X	7.515	15.01	16	4.80	19.81
I	3.63	7.25	4	1.20	8.45
W	7.26	14.50	12	3.60	18.10

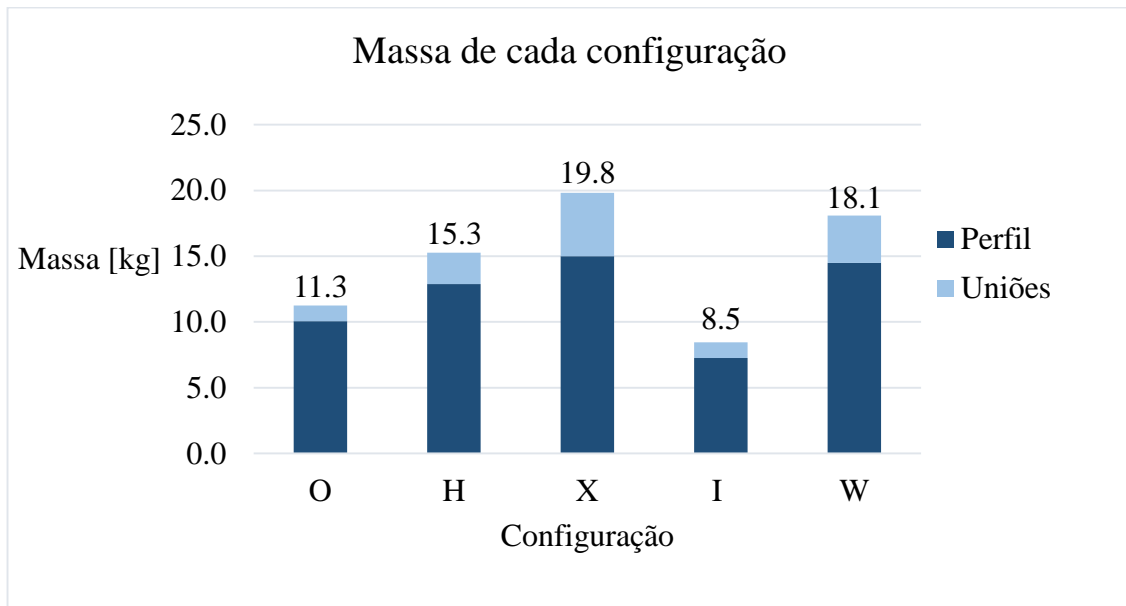


Figura 28: Gráfico da composição de cada configuração

No gráfico da Figura 29 é representada a variação percentual de massa em relação ao valor mínimo possível, correspondente aos 8,45 kg da configuração I. Simultaneamente é representada, para cada configuração, qual a diminuição percentual de deslocamento em relação à configuração I. Esta comparação é baseada no facto de, para a solicitação 1G+200N, a configuração I ser a que apresenta os valores mais elevados de deslocamento máximo.

Para determinar qual a melhor configuração foi comparado para cada caso qual a relação entre a percentagem de aumento de massa e a percentagem de diminuição do deslocamento. Desta forma um rácio entre ambos os dados vai permitir determinar qual a configuração mais eficiente, ou seja, a que apresenta uma maior redução do deslocamento para um menor aumento de massa. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 29.

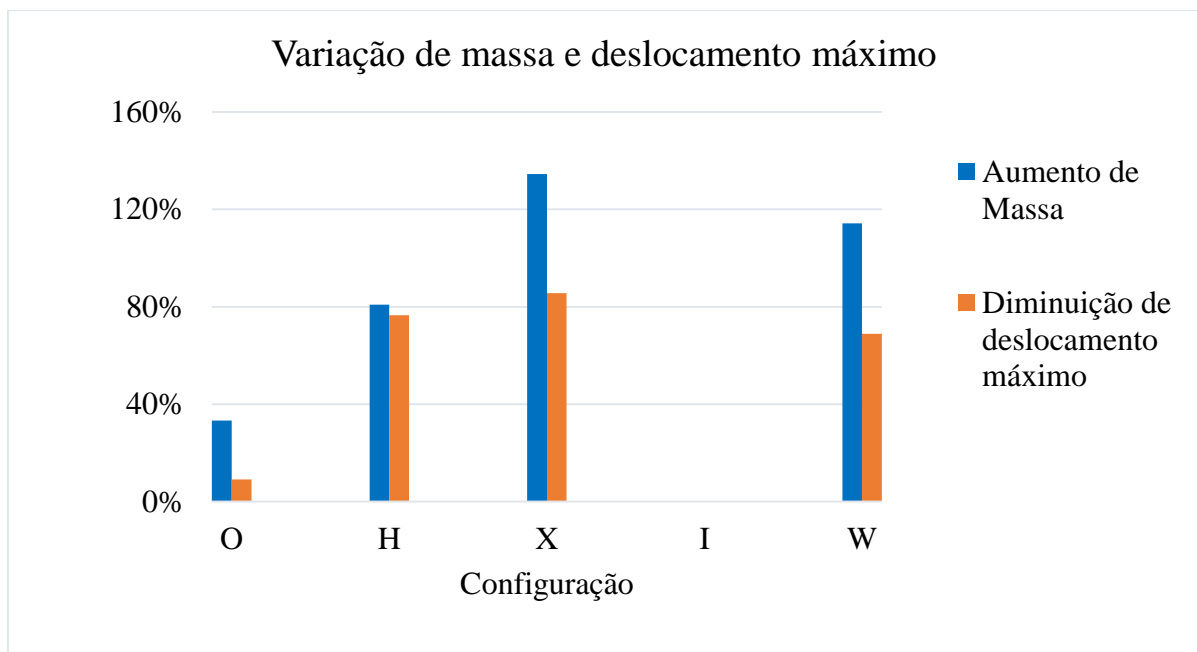


Figura 29: Gráfico de variação de massa e deslocamento máximo

A análise dos dados permite determinar que a melhor configuração é a H, dado que é a que apresenta um menor aumento da massa (81%) para uma maior diminuição do deslocamento (76%). Desta forma, o rácio entre a variação de massa e deslocamento é praticamente unitário na configuração H, ao contrário das restantes em que o valor do rácio é superior, pelo que foi essa a configuração adotada.

3.2.3 Integração dos acessórios na estrutura

De modo a que seja possível manobrar o equipamento com facilidade, foi necessário contemplar a inserção de rodas, puxadores e olhais de elevação de acordo com o previsto nos requisitos fornecidos pelo cliente.

A utilização de uma estrutura em perfis de alumínio apresenta a vantagem de se encontrar projetada para a inserção de acessórios, pelo que dispensa a conceção de interfaces especialmente dedicadas para este efeito. Assim, os componentes podem ser facilmente integrados recorrendo a ligações aparafusadas.

A escolha dos puxadores, olhais de elevação e rodízios teve como fator comum a atenção dada à compatibilidade destes elementos com a utilização em sala limpa, como especificado na secção 3.1.2.1. No caso dos olhais de elevação e dos rodízios, foi tida em conta a capacidade de carga adequada, sendo de salientar que cada unidade destes elementos possui uma capacidade de carga superior ao peso total do equipamento.

3.3 Conceção de elementos funcionais

3.3.1 Elementos de suporte

Os elementos de suporte são constituídos por duas placas adaptadoras, uma para cada um dos componentes a serem testados. A função destas placas é a de permitir mover os componentes a testar sem interferir diretamente nos mesmos, ou seja, move-se a placa adaptadora e o componente como um conjunto único. Desta forma, o contacto entre o componente e a sua base de suporte é permanente, o que elimina possíveis danos no componente em si e variações de condutividade que existiriam caso o equipamento fosse apoiado em diferentes superfícies.

Apesar das dimensões e características destes elementos serem determinados pelos requisitos, existem particularidades a destacar. A primeira, e à semelhança da placa base, é o tratamento superficial com Alodine 1200S, cujo objetivo é o de promover uma camada protetora no alumínio de forma a minimizar a corrosão de acordo com [8]. A segunda é o facto de existir uma tolerância de planeza, de forma a garantir um suporte uniforme ao componente, como referido anteriormente.

3.3.2 Elementos de apoio à cablagem

A solução construtiva adotada para estes elementos é feita a partir de chapa de alumínio quinada. A seleção da liga de alumínio 5754 (AlMg3-H111) foi feita tendo em conta as a resistência à corrosão, disponibilidade de fornecedores e principalmente as características de formabilidade sendo este parâmetro avaliado através da determinação do raio de dobra mínimo. Para os elementos de suporte de cabos e módulos de demonstração foi escolhida uma chapa de espessura de 3 mm, a que corresponde um raio de dobra mínimo de 6 mm de acordo com [11].

Para os elementos que têm a função de suportar conectores, a espessura da chapa utilizada foi de 2 mm de forma a permitir a correta interface com os mesmos, sendo neste caso o raio de dobra mínimo de 4 mm [11]. A forma adotada para estes elementos recorre a rasgos de forma a permitir a circulação de ar junto à sua base e assim evitar a acumulação de partículas na zona de dobra, tal como demonstrado na Figura 31.

3.3.2.1 Elementos de suporte de cabos e conectores

Estes elementos dividem-se em dois tipos diferentes tendo em conta a sua função:

Os elementos de suporte da cablagem têm como função garantir o correto posicionamento dos cabos tendo em conta os critérios de separação dos mesmos e o respetivo raio de curvatura (para cabos simples e conjuntos). Além de elementos disponíveis no mercado, foi necessário dimensionar suportes com a função de servir apoio aos cabos, como exemplificado na Figura 30.



Figura 30: Exemplo de suporte de cablagem

Os elementos de suporte de conectores têm como função garantir que estes se encontram corretamente apoiados de forma a serem feitas as ligações a conectores provenientes de componentes externos, tendo em conta os critérios de separação de cablagem. Na Figura 31 é apresentado um exemplo deste tipo de elementos.

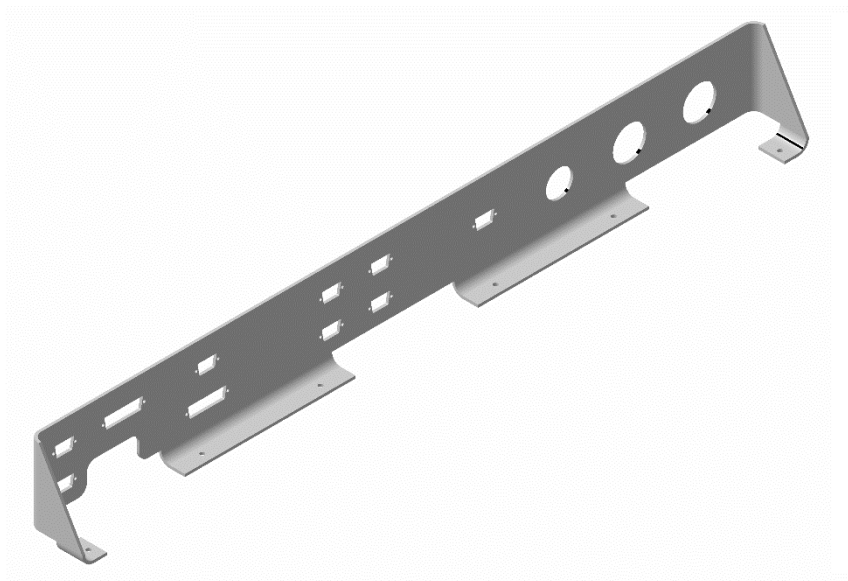


Figura 31: Exemplo de suporte de conectores

3.3.2.2 Módulos de demonstração da localização de conectores

A função destes elementos está relacionada com o fabrico e montagem de toda a cablagem. Apesar de o posicionamento de toda a cablagem estar presente no modelo 3D, não é possível modelar com precisão o comportamento do cabo dado que este depende de vários fatores (massa, rigidez, raio de curvatura) pelo que estes elementos têm como função permitir simular a localização dos conectores, e assim permitir uma melhor construção da cablagem.

A solução adotada é também de elementos em chapa de alumínio quinada, sendo que a furação está de acordo com os componentes a testar. É apresentado um exemplo destes elementos na Figura 32, que será apoiado numa das placas adaptadoras.

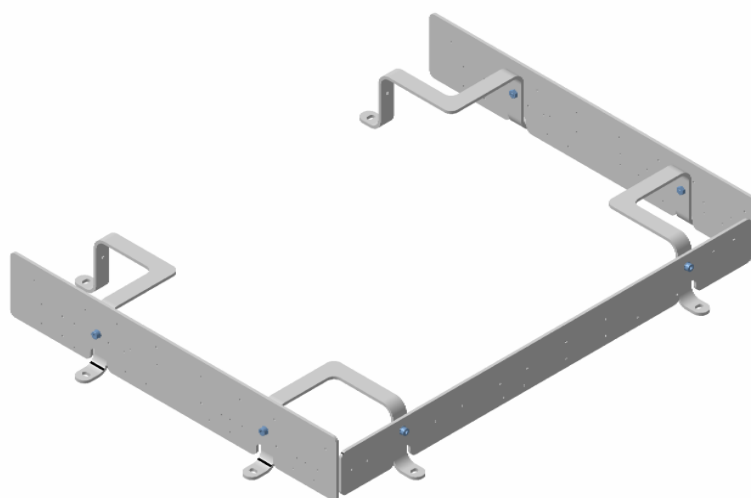


Figura 32: Exemplo de módulo de demonstração

3.3.3 Elementos de fixação

Para a fixação dos elementos no equipamento foram utilizadas ligações aparafusadas, tendo estas sido dimensionadas recorrendo a [12]. Dado que o equipamento será utilizado em ambiente controlado, optou-se por utilizar os elementos das ligações aparafusadas em aço inoxidável, de forma a evitar a geração de partículas devido a oxidação. O aço inoxidável escolhido é o EN 1.4301 X5CrNi18-10, também designado por A2-70 de acordo com a norma ISO 3506 [13], sendo que a classificação A2 se refere a um aço AISI 304 e o 70 se refere à classe 70 da norma, que determina um mínimo de 700 MPa de tensão de rotura.

Adicionalmente foi realizada a inclusão de Helicoils® [14] nos furos roscados das placas das adaptadoras e da placa base. Dado que estes elementos são de alumínio e a parafusos a utilizar são de aço inoxidável, é normal que exista desgaste na rosca pelo que, apesar de não ser requisito, é comum utilizar esta solução, visível na Figura 33.



Figura 33: Helicoil® (retirado de [14])

Para evitar o desgaste da rosca são utilizados estes componentes que consistem numa espiral de aço inoxidável (X5CrNi18-10) que vai ser aplicada na rosca fêmea – desta forma o interface com o parafuso é feito entre duas superfícies do mesmo material, e dado que a espiral se mantém imóvel é eliminado o desgaste no alumínio.

Estes elementos foram também colocados na ligação entre os olhais de elevação e os perfis de alumínio. Dado que o perfil de alumínio não possui uma parede de espessura suficiente no seu centro para realizar uma rosca adequada tendo em conta a métrica utilizada, como é visível na Figura 22, a colocação de Helicoils® permite não só evitar o desgaste da rosca como aumentar a área de contacto com o parafuso do olhal de elevação.

Ao verificar as ligações aparafusadas, é de notar que irá ocorrer contacto entre metais diferentes, o que poderá originar corrosão galvânica. Será demonstrado de seguida a forma como esse fenómeno é minimizado, dado que na tabela de compatibilidades galvânicas em [6] a combinação de ligas de alumínio e o aço inoxidável AISI 304 requer medidas específicas para evitar a corrosão galvânica. Em primeiro lugar é necessário compreender o fenómeno, de acordo com [15]: “Quando dois materiais metálicos, com diferentes potenciais, estão em contacto na presença de um eletrólito, ocorre uma diferença de potencial, isto é uma transferência de eletrões. Tem-se então o tipo de corrosão chamado corrosão galvânica”.

No entanto, a corrosão não afeta de forma semelhante ambos os materiais em contacto, dado que a corrosão do material que funciona como ânodo é muito mais acentuada. De facto, “Um fator importante na corrosão galvânica é a relação entre a área anódica e a catódica. Se a relação área anódica/catódica for muito maior que um, isto é, área catódica pequena em relação à área anódica, a corrosão não será tão prejudicial, mas no caso contrário, isto é, a área catódica maior que a anódica a corrosão será tanto mais intensa quanto maior for a área catódica e menor a anódica, pois tem-se uma alta densidade de corrente na parte do metal, ânodo, que está sendo corroída. Devido a isto, quando necessário, é mais indicado o uso de parafusos e rebites de material metálico catódico, numa estrutura anódica, do que o inverso” [15]. Ao consultar a tabela relativa à serie galvânica de materiais metálicos em água do mar a 25°C em [16], podemos verificar que o alumínio possui um potencial entre os -0.75 e -1.0 V sendo o mais anódico, e o aço inoxidável 304 um potencial entre os -0.05 e -0.1 V sendo por isso o elemento mais catódico desta combinação.

Após compreender o fenómeno, é possível verificar que este vai ser minimizado em primeiro lugar pelo facto de o equipamento ser utilizado num ambiente controlado, estando à partida excluída a presença de um eletrólito suficientemente capaz de promover a corrosão galvânica. Em segundo lugar, dado que a dimensão do ânodo (neste caso o alumínio) é bastante superior à do cátodo (elementos de ligação em aço inoxidável), sendo a área de contacto entre ambos bastante reduzida, o efeito da corrosão é significativamente diminuído devido a uma menor densidade de corrente. Deste modo, o equipamento está de acordo com a prática comum de utilizar fixações de aço inoxidável em peças de alumínio – no caso inverso existiria uma maior disposição para a ocorrência da corrosão, facto que justifica as medidas específicas exigidas em [6].

3.4 Documentação da solução

Após a execução detalhada do modelo 3D, apresentado na Figura 34, procedeu-se à produção dos elementos documentais necessários de acordo com [17]. De forma a cumprir os requisitos, a solução documentada apresenta uma altura de trabalho de 830 mm e pesa 98,3 kg. Não é possível, por motivos de confidencialidade, divulgar o conteúdo dos documentos produzidos mas dado que norma referida é bastante explícita em relação aos conteúdos que devem estar presentes, é apresentado de seguida qual a estrutura e secções presentes em cada documento.

FIGURA CONFIDENCIAL

Figura 34: Modelo 3D detalhado

3.4.1 Definição do desenho

O objetivo do documento de definição de desenho é estabelecer a definição técnica de um sistema ou produto, com informação relativa à arquitetura física e funcional do sistema, bem como as características necessárias para a sua identificação, fabrico, configuração, utilização, e remoção de serviço. Este detalha a configuração do sistema ou produto e é realizado pela equipa responsável pela engenharia do sistema, sendo a base técnica para a produção, montagem, integração, teste, operação e manutenção do produto.

Este documento tem a seguinte arquitetura:

1. Introdução
2. Documentos aplicáveis e referências
3. Resumo do projeto e requisitos técnicos
4. Descrição funcional
 - 4.1. Arquitetura funcional
 - 4.2. Árvore funcional
 - 4.3. Descrição de cadeias funcionais
5. Descrição física
 - 5.1. Arquitetura Física
 - 5.2. Árvore de produto
 - 5.3. Árvore de especificação
 - 5.4. Descrição dos elementos da arquitetura física

- 5.5. Descrição de interfaces
- 6. Orçamento técnico, margens e desvios
- 7. Restrições do desenho
 - 7.1. Restrições de produção
 - 7.2. Restrições de operação
 - 7.3. Restrições de transporte e armazenamento
 - 7.4. Restrições de manutenção
- 8. Base de dados de engenharia
- 9. Conclusão

3.4.2 Manual do utilizador

O objetivo do manual do utilizador é o de fornecer informações que são necessárias ao utilizador para manusear, instalar, operar e manter o produto durante a sua vida útil. Este documento está organizado da seguinte forma:

- 1. Introdução
- 2. Documentos aplicáveis e referências
- 3. Definição da função do produto
 - 3.1. Funções esperadas
 - 3.2. Restrições funcionais
 - 3.3. Fases de vida útil e objetivos
- 4. Descrição do produto
 - 4.1. Resumo do desenho
 - 4.2. Nível de autonomia
 - 4.3. Configurações
 - 4.4. Orçamento
 - 4.5. Especificações de interface
 - 4.6. Manuseamento
 - 4.7. Armazenamento
 - 4.8. Instalação
 - 4.9. Operações
 - 4.10. Manutenção
 - 4.11. Remoção de serviço
- 5. Descrição dos componentes do produto
 - 5.1. Geral
 - 5.2. Resumo do desenho dos componentes do produto
 - 5.3. Definição de desenho dos componentes do produto
 - 5.4. Software

- 5.5. Desempenho dos componentes do produto
- 5.6. Telemetria e telecomando dos componentes
- 5.7. Análise de falha dos componentes
- 5.8. Operações dos componentes

3.4.3 Relatório orçamental

Este documento define, para cada parâmetro chave da engenharia de um sistema ou produto, a natureza desse parâmetro, o valor especificado, os requisitos de medição e o valor medido no estado atual. Como exemplo, é descrito neste documento a contribuição de cada elemento para a massa total do equipamento. Este documento possui a seguinte forma:

1. Introdução
2. Documentos aplicáveis e referências
3. Lista de parâmetros chave de engenharia
4. Avaliação dos parâmetros chave de engenharia
5. Conclusão

3.4.4 Desenho técnico 2D

O desenho técnico que é incluído na documentação da solução representa todos os componentes mecânicos presentes no equipamento, tal como detalha o desenho de conjunto apresentado na Figura 35. Além dos elementos que estão disponíveis no mercado, inclui também os desenhos detalhados necessários para os componentes a serem fabricados, tendo sido elaborados de acordo com [12].

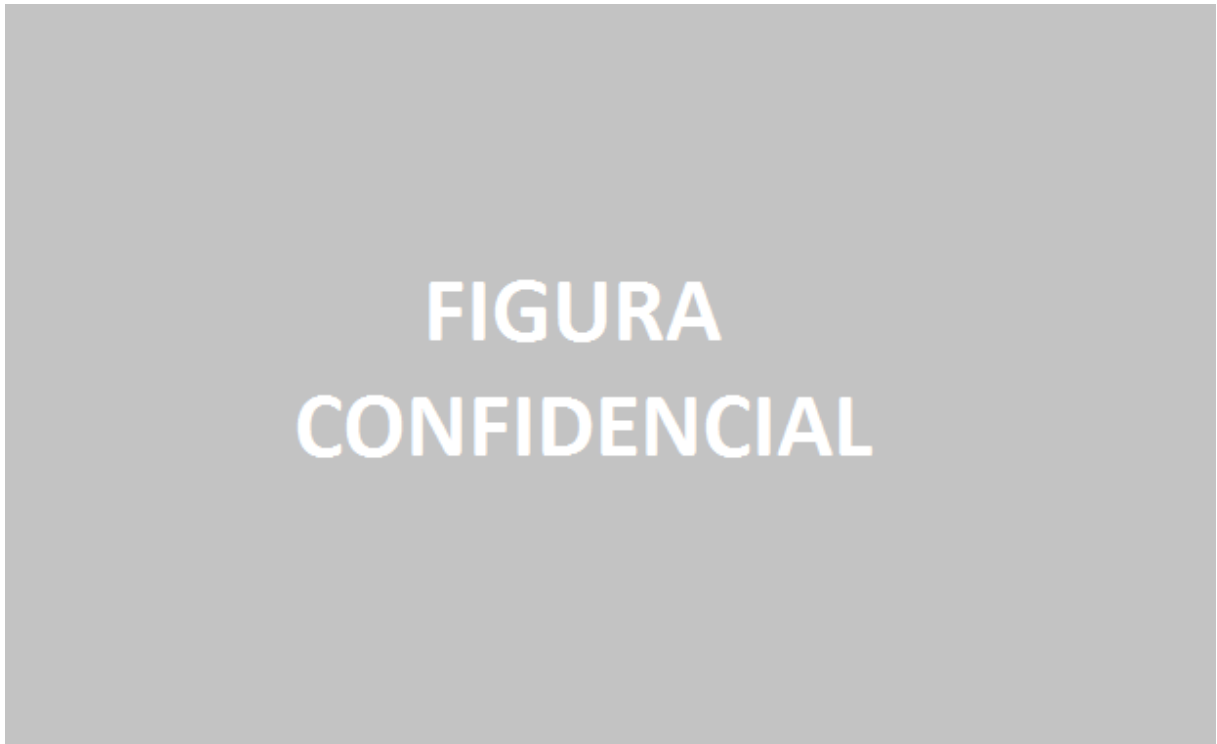


Figura 35: Desenho técnico 2D do modelo

3.5 Validação

Após a execução da documentação da solução, esta foi submetida para avaliação por parte do cliente. Só após a validação da parte do cliente, é que o projeto pôde avançar para a fase de fabrico, descrita no próximo capítulo.

4 Fabrico

4.1 Identificação de necessidades e condicionantes

A identificação de necessidades e condicionantes permitiu fazer uma avaliação do planeamento da produção do equipamento. Ao nível de necessidades foi considerada a aquisição de todos os componentes, a existência das ferramentas necessárias e a disponibilidade da sala limpa para a fase final de montagem. Em termos de condicionantes para a fase de fabrico foram identificados os processos realizados exteriormente à empresa e os prazos associados.

4.2 Aquisição e Fabrico de componentes

4.2.1 Aquisição de componentes

Após a aprovação da solução, a fase seguinte passa por garantir as condições necessárias para iniciar o seu fabrico. A primeira etapa foi a aquisição das matérias-primas a serem fabricadas ou dos componentes na sua forma final. Ao projetar quais os componentes utilizados na solução são também previstos os respetivos fornecedores, mas nesta fase foi necessário aumentar o leque a outros fornecedores de forma a garantir a escolha mais adequada.

Um dos fatores determinantes na elegibilidade de um fornecedor de materiais metálicos é a garantia de fornecimento de certificados de inspeção de acordo com a norma EN 10204:2004 [18]. Esta norma detalha os tipos de certificados de inspeção que acompanham o material fornecido, sendo este fator fundamental para a rastreabilidade do produto, algo que poderá ser importante caso se detete uma não-conformidade. A norma referida detalha os seguintes tipos de certificados:

- Certificados de inspeção não-específicos
 - Tipo 2.1 – Declaração de conformidade: este certificado atesta que os produtos fornecidos se encontram de acordo com o pedido e com as normas de qualidade aplicáveis.
 - Tipo 2.2 – Relatório de teste: este documento acrescenta um relatório de teste baseado numa inspeção não-específica, ou seja, os resultados do teste poderão não ser do lote de material que é fornecido.
- Certificados de inspeção específica
 - Tipo 3.1 – Certificado de inspeção: este certificado garante a conformidade com o pedido, bem como apresenta os resultados dos testes relevantes e da composição química dos produtos fornecidos.
 - Tipo 3.2 – Certificado de inspeção: este tipo de certificado apresenta os mesmos conteúdos que o Tipo 3.1 mas a certificação é feita por um inspetor designado pelo cliente ou pelos regulamentos oficiais.

Os componentes que foram acompanhados dos certificados 2.1 foram os elementos de fixação e estruturais, enquanto as placas adaptadoras, base e as peças quinadas incluíram os certificados e 3.1. Para os componentes aplicados diretamente no equipamento (rodízios, olhais de elevação) a avaliação foi baseada no custo e disponibilidade. No entanto, no caso dos componentes que necessitam de operações de fabrico, foi necessário avaliar também a disponibilidade de ferramentas e de operadores para as efetuar.

No caso particular deste equipamento foi determinado que a operação de corte dos perfis de alumínio seria feita nas instalações da empresa, a partir das secções de 6 m de comprimento que foram fornecidas. Esta escolha baseou-se na falta de precisão de corte que foi verificada pela empresa em situações anteriores, bem como na substancial diferença de preço dos elementos dispostos diagonalmente (de acordo com a configuração F2 escolhida em 3.2.2.3), cujo custo por metro na sua forma final era cerca de 4,5 vezes superior ao valor do mesmo perfil. As implicações desta opção serão analisadas mais à frente neste documento nas secções relativas ao fabrico e montagem. Adicionalmente a aplicação dos Helicoil® também foi feita nas instalações da empresa, dado que as peças onde seriam aplicadas foram submetidas a controlo dimensional e tratamento superficial antes da respetiva aplicação.

Os componentes ou matérias-primas adquiridas são submetidos a uma inspeção, aquando da chegada às instalações da empresa. Esta inspeção, da qual resultou o preenchimento do respetivo relatório, tem como objetivo garantir que o material recebido está de acordo com o que foi encomendado, tendo em conta os parâmetros:

- Inspeção visual à embalagem e aos produtos
- Inspeção dimensional
- Concordância em tipo e quantidades
- Documentação (certificados de conformidade, fatura, nota de envio)

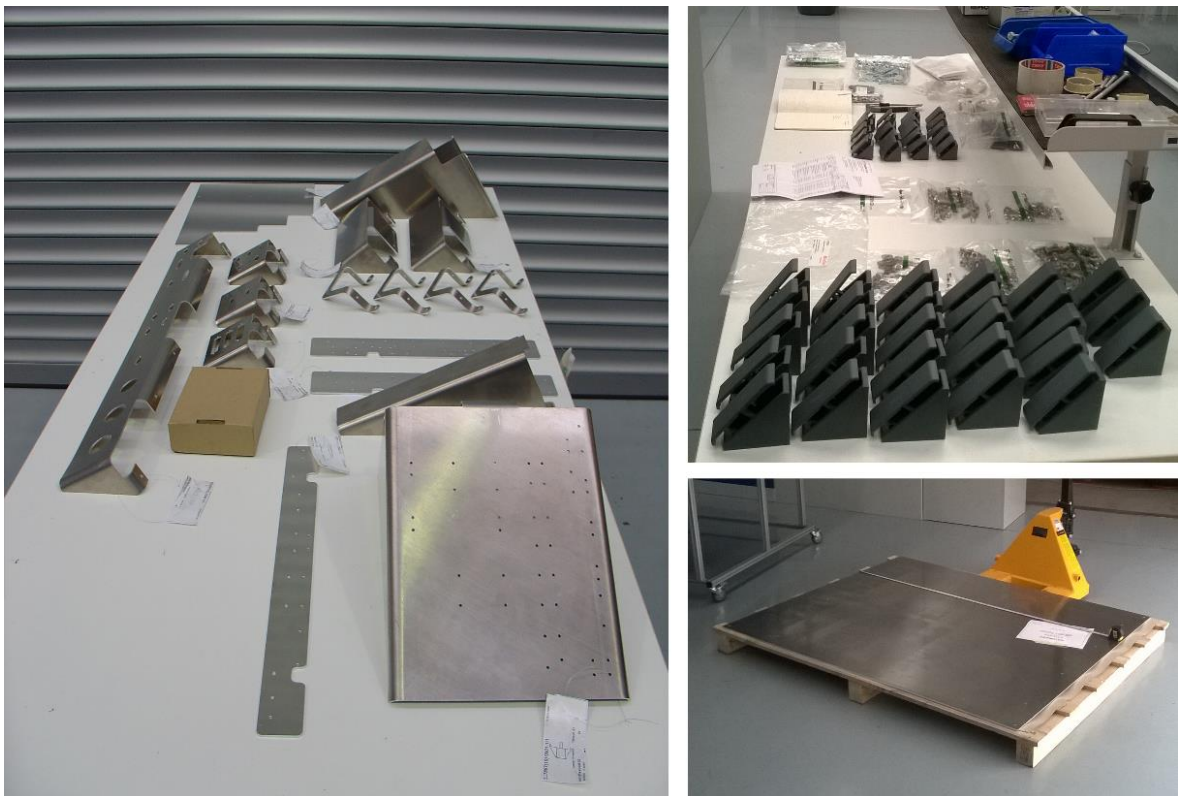


Figura 36: Receção e inspeção de componentes

O parâmetro que merece maior destaque é o da inspeção dimensional, em que é verificada a concordância com o desenho técnico enviado ao fornecedor. No caso do equipamento em questão, recorreu-se a um braço de medição com precisão de 0,025 mm para realizar o controlo dimensional das placas adaptadoras. A aplicação deste tipo de controlo a estas peças prende-se com o facto de serem aquelas em que o cliente irá fazer a integração dos seus componentes, pelo que é especialmente importante que se verifique a concordância da furação. Como é visível na Figura 37, o controlo foi feito antes da aplicação do tratamento superficial. O controlo dimensional das restantes peças foi feito recorrendo a uma fita métrica ou paquímetro, tendo sido verificado o interface entre os componentes.



Figura 37: Braço de medição

4.2.2 Fabrico de componentes

Após a aceitação do material através da validação das inspeções realizadas, é iniciada a execução das operações de fabrico de componentes. As operações de fabrico são executadas de acordo com um documento designado por “Ficha de processo de fabrico” cujo objetivo é coordenar a execução e que prevê os seguintes conteúdos:

- Verificação da aceitação do material
- Verificação da disponibilidade das ferramentas
- Verificação das condições de segurança
- Descrição e ordem das operações a efetuar
- Pontos de inspeção

Após a elaboração do documento, procedeu-se ao início do fabrico. Tal como descrito na secção anterior, um dos procedimentos realizados foi o de corte dos perfis de alumínio, operação visível na Figura 38.



Figura 38: Operação de corte dos perfis de alumínio

Após a operação de corte foram executados os rasgos que permitem a colocação dos elementos de fixação. O perfil escolhido encontra-se dimensionado com vista à realização desta operação, detalhada na Figura 39, pelo que a sua execução estava facilitada. Para terminar a preparação dos perfis de alumínio, foi feita a furação necessária para a montagem da estrutura completa.



Figura 39: Execução dos rasgos no perfil de alumínio

Apesar de estas operações serem relativamente simples nos elementos dispostos horizontal e verticalmente na estrutura, o mesmo não aconteceu para as secções de perfil diagonalmente dispostas que constituem a configuração F2 escolhida de acordo com a secção 3.2.2.3, e que são visíveis em pormenor na Figura 44. Devido à indisponibilidade momentânea da ferramenta mais indicada para executar a furação necessária, teve de ser adotado um método alternativo que se revelou mais demorado e com menor precisão que o previsto. Apesar de esta demora não ter provocado atraso na execução do projeto, e os resultados irem de encontro ao esperado, este ponto ilustra de uma forma clara a implicação que as decisões anteriores têm nesta fase. As vantagens que estes elementos apresentavam ao nível da conceção e aquisição, ficaram assim diminuídas devido à dificuldade de fabrico.

De salientar que em várias ocasiões ao longo do processo se procedia à limpeza das peças através de ar comprimido e álcool isopropílico, de forma a evitar a acumulação de sujidade decorrente das operações (como limalhas e lubrificante). Também incluído no processo de fabrico foi a inserção de Helicoils®, recorrendo a uma ferramenta específica, como demonstra a Figura 40.



Figura 40: Inserção de Helicoils®

Em todos os elementos foi efetuada a quebra de arestas, sendo que este procedimento se reveste de especial importância nos componentes em chapa quinada, dado que serão os mais próximos do contacto com operadores. A existência de arestas não quebradas poderá levar ao rasgar de luvas ou outro vestuário de proteção, pelo que é importante que estes elementos sejam preparados de acordo com a utilização do equipamento em sala limpa.

4.3 Montagem dos componentes

Após a conclusão das fases de fabrico descritas no ponto anterior, foi iniciada a montagem de todos os componentes. Este processo está também incluído na “Folha de processo de fabrico” que foi referida anteriormente. O primeiro passo deste processo foi a montagem da estrutura em perfil de alumínio, como é visível da Figura 41.



Figura 41: Montagem da estrutura

De forma a facilitar o processo, a estrutura foi montada numa posição invertida. Ao longo do processo de montagem foram verificados os interfaces entre os vários componentes, de forma a garantir que a montagem final dos elementos seria a correta.

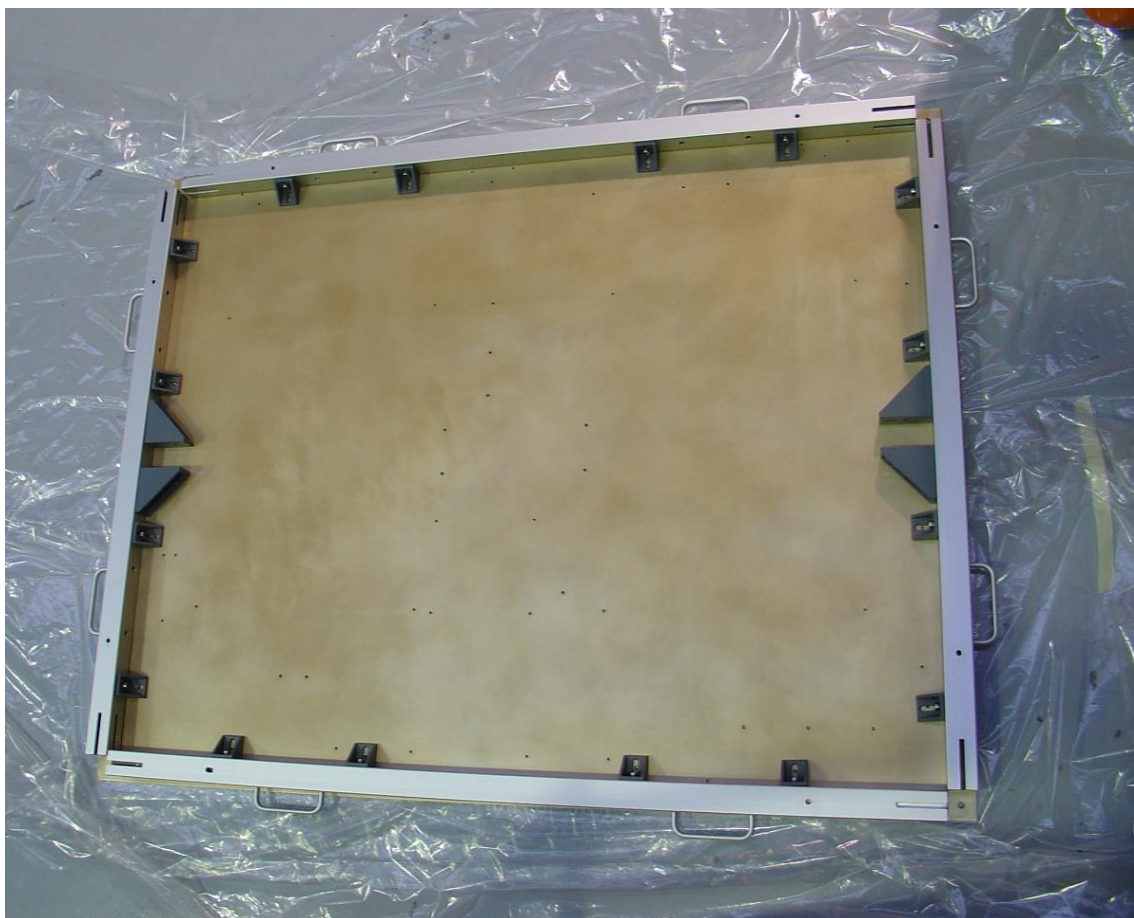


Figura 42: Verificação de interfaces

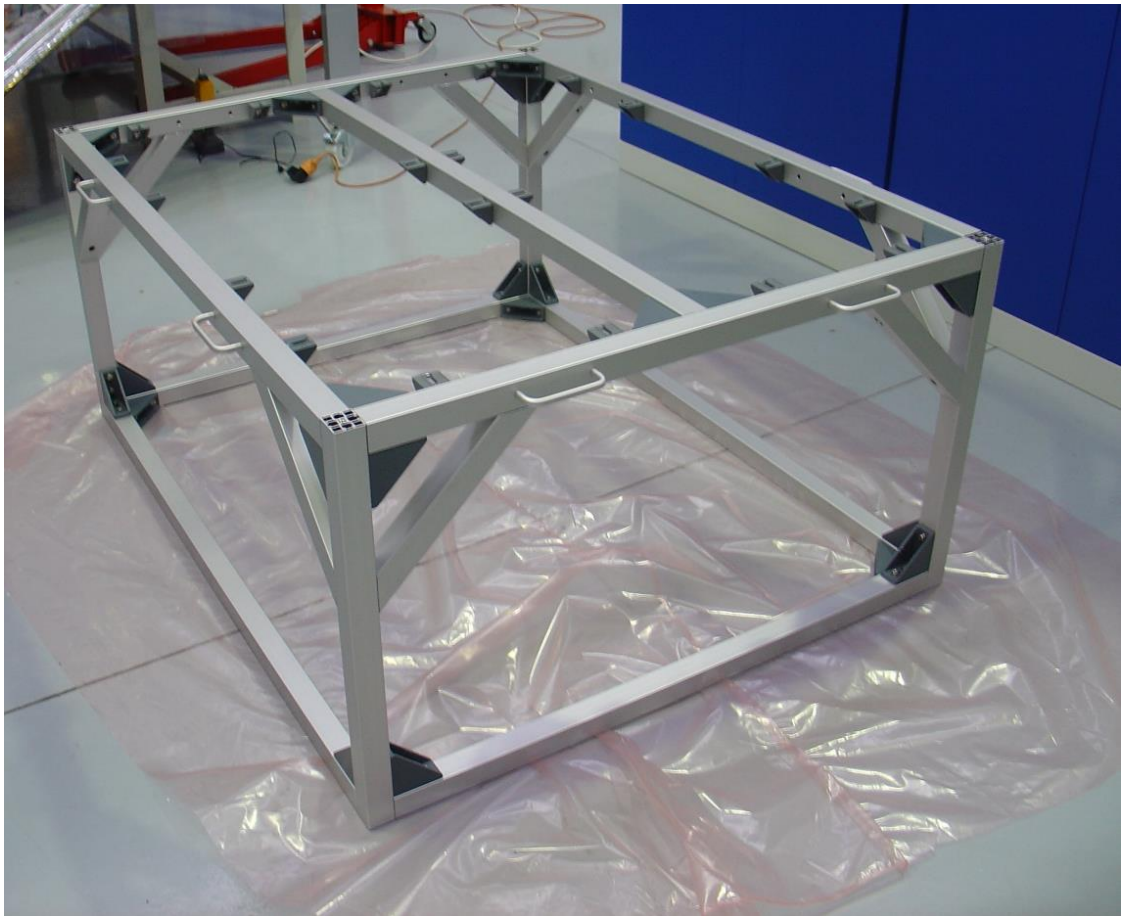


Figura 43: Montagem da estrutura

Após a montagem completa da estrutura em perfil, foi feita a integração da placa base à estrutura. Esta fixação foi feita através do tipo de ligação descrito na Figura 11, e que é mostrada em detalhe na Figura 44. Nesta figura são também visíveis os elementos diagonalmente dispostos e referidos anteriormente.



Figura 44: Pormenor da estrutura



Figura 45: Montagem da placa base na estrutura

Posteriormente foram montados na estrutura os rodízios com travão, e os olhais de elevação, apesar de não estarem presentes nas figuras devido ao demorado prazo de entrega. Finalmente foram colocados os elementos de suporte à cablagem, de suporte de conectores e módulos de demonstração, como é visível em detalhe na Figura 47 e de acordo com o descrito na secção 3.3. A Figura 46 mostra uma perspetiva geral do equipamento após a montagem dos seus componentes, e que está de acordo com a documentação da solução apresentada na Figura 34.

**FIGURA
CONFIDENCIAL**

Figura 46: Equipamento completo

**FIGURA
CONFIDENCIAL**

Figura 47: Detalhe do equipamento completo

Como é visível nas figuras do processo de montagem todos os procedimentos ocorreram em ambiente não controlado. Após a verificação da correta integração de todos os elementos, estes foram adequadamente limpos, recorrendo a ar comprimido e álcool isopropílico. A Figura 48 mostra a montagem do equipamento já em ambiente controlado, facto evidenciado pelo vestuário de proteção do operador. Posteriormente, e nesta sala limpa de classe ISO 5, foi feita a integração dos componentes eletrónicos.



Figura 48: Montagem do equipamento em ambiente controlado

A etapa final será a colocação de sinalética na estrutura de forma a transmitir informação e promover a correta utilização do equipamento: massa do equipamento, avisos para que o levantamento não seja feito pelos puxadores, símbolos de perigo para os rodízios, além do logótipo da empresa. A colocação destes elementos só ocorrerá após a ocorrência dos testes detalhados na secção seguinte.

4.4 Testes de validação

De forma a validar o equipamento, garantindo o cumprimento dos requisitos, foi planeada a execução de testes de validação de acordo com a norma [19]. Dado que o desenvolvimento recaiu sobre a componente mecânica do equipamento, os testes realizados serão inspeções dimensionais, de massa e teste de carga. As inspeções dimensionais serão realizadas de acordo com o descrito na secção 4.2.1 e tendo em atenção os interfaces entre todos os componentes. Adicionalmente será verificado se a massa do equipamento corresponde ao valor antecipado, através da pesagem do mesmo. O último teste, designado teste de carga, pretende avaliar a capacidade do equipamento suportar uma carga superior à carga normalmente aplicada durante o seu uso. Desta forma o equipamento será içado pelos olhais de elevação e ser-lhe-á aplicada uma carga correspondente a duas vezes a massa do equipamento. Caso não se verifiquem alterações na estrutura após dez minutos, o teste será concluído com sucesso.

4.5 Preparação para transporte

Durante a sua operação, o equipamento vai estar sujeito apenas às solicitações estáticas causadas pelos componentes a testar, pelo que pode ser afirmado que as solicitações mais exigentes serão aplicadas à estrutura durante o transporte. Esta etapa é também aquela em que a manutenção das condições de limpeza requer maiores cuidados. Desta forma foi necessário conceber uma solução com dois objetivos principais:

- Garantir o estado de limpeza do equipamento durante o transporte
- Assegurar a resistência aos choques e vibrações impostos durante o transporte

De forma a cumprir estes requisitos, foi elaborado um documento com os encargos a serem cumpridos pelo fornecedor da solução para o transporte. Este documento tem em conta as indicações constantes na secção 5.4.4 da norma [3] dedicada ao embalamento e transporte. Como exemplo, está prevista a inclusão de sensores de choque de 5G, pelo que se o equipamento estiver danificado à chegada, é possível averiguar se tal se deveu a solicitações impostas durante o transporte.

Para a elaboração do referido documento foi necessário realizar uma análise prévia, tendo para isso ocorrido uma reunião com um fornecedor de soluções de embalamento e transporte. Nesta ocasião, foi possível contactar com as soluções habitualmente utilizadas bem como obter amostras do material a ser fornecido. De seguida foi concebida uma embalagem e realizado um modelo 3D, detalhado na Figura 49, para que fosse comunicado visualmente e em maior detalhe qual o tipo de solução pretendida.

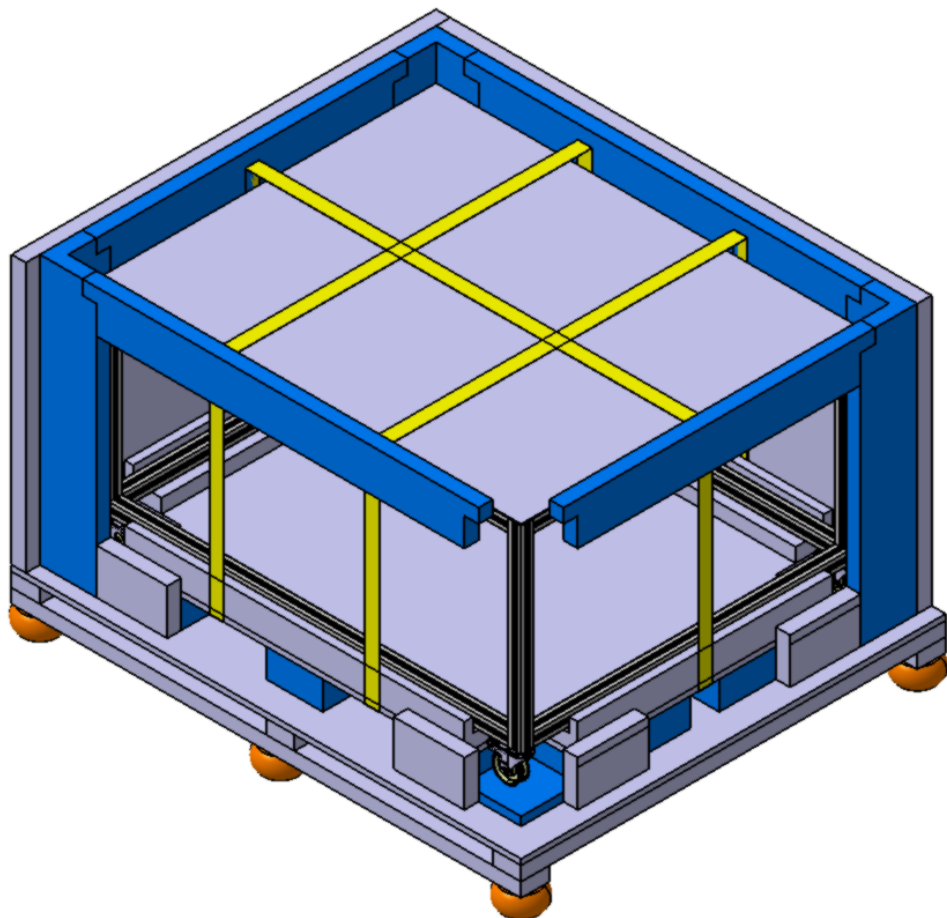


Figura 49: Modelo do contentor de transporte

O principal objetivo que se pretende alcançar com a elaboração do documento é a de transmitir a especificidade de transportar um equipamento mantendo os requisitos de limpeza. De forma a manter o ambiente controlado, o equipamento será duplamente embalado em filme de alumínio selado por fita, em que será adicionado dessecante de forma a controlar a humidade, e posteriormente criada uma atmosfera protetora recorrendo a azoto. Este processo cria algumas dificuldades à fixação do equipamento dado que deixam de estar disponíveis os principais pontos de apoio, pelo que passamos a necessitar de uma solução para o transporte de um “embrulho”. No entanto, está previsto que os olhais de elevação sejam mantidos fora da embalagem de forma que seja fácil de manobrar o equipamento aquando da chegada às instalações do cliente. Estes olhais serão limpos ou substituídos por novos antes da entrada do equipamento na sala limpa, de forma a manter as condições de limpeza.

Assim, o documento elaborado possui a seguinte estrutura geral:

1. Descrição do equipamento
2. Conceito de solução
3. Especificações
 - 3.1. Dimensões
 - 3.2. Materiais
 - 3.3. Suportes e proteções
 - 3.4. Compatibilidade com sala limpa
 - 3.4.1. Embalamento
 - 3.4.2. Controlo de humidade
4. Entrega

5 Conclusões

O desenvolvimento e fabrico de um equipamento de suporte, sobre o qual recai a presente dissertação, permitiu aplicar os conhecimentos obtidos durante a formação académica assim como a aquisição de um conjunto de competências importantes para quem está a iniciar o seu percurso em ambiente empresarial. A sua utilização no âmbito de uma missão espacial tornou ainda mais aliciante este desafio pelo seu carácter único e específico, fazendo simultaneamente elevar a responsabilidade associada a este trabalho.

A análise dos requisitos permitiu extrair os parâmetros gerais do projeto, tanto ao nível da funcionalidade como de materiais e configurações. O processo de conceção exigiu a aprendizagem do programa CATIA V5, bem como de uma filosofia de modelação permeável a alterações e correções por outros elementos da equipa, algo determinante para a eficiência do processo. A elaboração do conceito e a sua análise solicitou a aplicação de conceitos de análise estrutural num módulo do referido programa, processo este que permitiu realizar uma comparação entre várias configurações possíveis.

A solução adotada para o equipamento recorreu a uma estrutura em perfis de alumínio, resultando da análise estrutural a escolha da configuração mais vantajosa. O desenvolvimento envolveu também a conceção de suportes em chapa quinada que permitissem o roteamento da cablagem destinada aos componentes eletrónicos a serem testados, sendo que em todo o processo foi tida em conta a aptidão para utilização em ambiente controlado.

Adicionalmente, a etapa de aquisição de componentes permitiu desenvolver um conjunto de competências comunicacionais, dada a necessidade de articulação não só com fornecedores, mas também com os responsáveis financeiros e da qualidade da empresa. Foi tangível nesta fase que além dos conhecimentos obtidos durante a formação em engenharia, capacidades de negociação e comunicação revelam-se importantes para o planeamento da produção, tendo em conta a gestão de recursos e prazos.

Durante a fase de produção, a experiência de “chão-de-fábrica” foi fundamental para a perceção do processo de desenvolvimento como um todo. Foi possível avaliar na primeira pessoa o impacto das escolhas feitas nas etapas anteriores, desenvolvendo espírito crítico mas também sentido de compromisso em relação às mesmas, dado que não era possível alterar soluções já documentadas. Como exemplo, a inclusão dos suportes diagonais na estrutura foi uma opção que apesar das vantagens, representou um obstáculo na fase de fabrico. Ainda que esta opção tenha apresentado resultados satisfatórios, é um aspeto que poderá ser melhorado em trabalhos futuros. Por outro lado, muitas das soluções adotadas serão de facto utilizadas num segundo equipamento de suporte que se encontra nesta altura em desenvolvimento na empresa, comprovando a sua viabilidade.

Concluindo, o envolvimento em todas as fases do processo permitiu compreender e desenvolver o conjunto de capacidades necessárias para que um produto evolua com êxito desde a fase conceptual até à entrega, algo que é transversal a toda a indústria e que será uma experiência importante para o futuro. No caso deste equipamento de suporte, além do sentimento de concretização do projeto e de cumprimento dos objetivos propostos, existe também a satisfação de contribuir para a missão ExoMars 2018.

6 Trabalhos Futuros

Ao nível da realização de trabalhos futuros é de referir que as soluções desenvolvidas poderão ser utilizadas em projetos semelhantes, o que já se verifica no desenvolvimento de um equipamento que será designado como Equipamento de Suporte 2 (ES2). Este equipamento tem as mesmas funções do ES1 e será utilizado no âmbito da mesma missão, partilhando a grande maioria dos requisitos, embora seja utilizado no teste de diferentes componentes eletrónicos. O seu desenvolvimento está a ser realizado por uma diferente equipa de engenharia e o início da sua fase conceção coincidiu com o início da fase de fabrico do ES1. Desta forma, foi feito o acompanhamento do desenvolvimento do ES2 de forma a transmitir os métodos de conceção e as configurações adotadas. Dado que o final da etapa de conceção do ES2 coincidiu com o final do fabrico do ES1, foi também possível transmitir a experiência obtida relativamente à implementação das soluções concebidas.

7 Referências

- [1] European Space Agency, “Robotic exploration of Mars,” [Online]. Available: <http://exploration.esa.int/mars/>. [Acedido em 12 2015].
- [2] ECSS, “Space product assurance - Bioburden control of cleanrooms,” ECSS Secretariat ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2008.
- [3] ECSS, “Space Product Assurance - Cleanliness and contamination control,” ECSS Secretariat ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2008.
- [4] W. Whyte, Cleanroom Technology: Fundamentals of Design, Testing and Operation, Wiley, 2010.
- [5] Festo , Cleanroom Technology. Fundamentals of cleanroom technology., Festo S.A..
- [6] ECSS, “Space product assurance - Data for selection of space materials and processes,” ECSS Secretariat ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2004.
- [7] N. G. Zamani, “CATIA V5 FEA Tutorials Release 20,” Schroff Development Corporation, Mission KS, 2011.
- [8] Henkel Corporation Engineering Adhesives, “Henkel Surface Treatment Selector Guide,” Henkel Corporation, 2013.
- [9] L. F. M. da Silva e J. F. S. Gomes, “Introdução à Resistência dos Materiais,” Publindústria, Porto, 2010.
- [10] MiniTec, “MiniTec Catalogue,” MiniTec GmbH.
- [11] U. Fischer, “Manual de Tecnologia Metal Mecânica,” EDGARD BLUCHER LTDA., São Paulo, Brasil, 2008.
- [12] S. Morais, “Desenho Técnico Básico - 3,” José Manuel de Simões Morais, 2012.
- [13] British Stainless Steel Association, “Stainless Steel Fasteners to BS EN ISO 3506 Grades A1, A2 (A3) & A4 (A5) - SSAS Information Sheet No. 2.31 Issue 05,” BSSA - Stainless Steel Advisory Service, Sheffield, UK, 2007.
- [14] Boellhoff, “Helicoil® Plus Thread technology for high-strength fastenings - metric threads,” Boellhoff Group.
- [15] V. Gentil, Corrosão, Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1982.
- [16] K. R. Tretheway e J. Chamberlain, Corrosion for Science and Engineering, Essex, England: Longman Scientific & Technical, 1995.
- [17] ECSS, “Space engineering - System engineering general requirements,” ECSS Secretariat ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2009.

- [18] Ruukki Metals, "Inspection Documents," Ruukki Metals, Helsinki, Finland, 2013.
- [19] ECSS, "Space engineering - Testing," ECSS Secretariat ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2012.