



OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA CENTRAL FRIGORÍFICA A OPERAR COM CO₂

RÚBEN CARLOS GONÇALVES VASCO

outubro de 2021

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA CENTRAL FRIGORÍFICA A OPERAR COM CO₂

Rúben Carlos Gonçalves Vasco

1191218

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA CENTRAL FRIGORÍFICA A OPERAR COM CO₂

Rúben Carlos Gonçalves Vasco

1191218

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, coorientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva.

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutora Sandra Cristina Faria Ramos

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Coordenador com Agregação, ISEP

Arguente

Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Professor Coordenador com Agregação, IPB

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta tese foi um caminho longo, repleto de desafios. Que só foi possível percorrer graças ao apoio e contributo de várias pessoas.

Ao meu orientador, Doutor Raul Campilho, por todo o conhecimento transmitido, pela orientação prestada, apoio e atenção que sempre demonstrou. Ao Doutor Francisco Silva, pela sua disponibilidade e contributo prestado durante a elaboração da presente tese. À Doutora Elza Fonseca, pela cooperação, pela partilha de informação e apoio demonstrado na elaboração deste trabalho.

Agradeço à empresa que foi o berço desta tese, RACE, pela oportunidade que me proporcionaram, de poder desenvolver a minha tese e de alargar os meus conhecimentos nas suas instalações. Com especial agradecimento a todos os colegas com quem colaborei diariamente. Ao Eng.º Vítor Nogueiro, orientador na empresa, pela partilha de conhecimentos, e pela orientação da presente tese. À Eng.ª Mariana Costa, por toda a dedicação e contributo prestado durante o desenvolvimento da presente tese.

Não poderia deixar de agradecer à minha família e amigos, pelo apoio incondicional e incentivo que disponibilizaram ao longo desta caminhada.

A todas as pessoas que colaboraram e tornaram esta tese possível, o meu obrigado.

PALAVRAS CHAVE

Estruturas metálicas; Projeto mecânico; Métodos de Elementos Finitos (MEF); Análise estática; Análise modal; Centrais frigoríficas.

RESUMO

A indústria da refrigeração apresenta um papel fulcral em diversos setores, tais como alimentar, químico e dos transportes. A grande utilização dos sistemas de refrigeração leva à sua evolução com o intuito de introduzir novas tecnologias e de as aprimorar numa vertente de menor impacto ambiental. Na atualidade as centrais frigoríficas com CO₂ como fluido de trabalho no regime transcrítico são uma excelente resposta para a legislação em vigor atualmente. Como tal, a RACE (empresa de acolhimento) confrontou-se com os novos desafios do setor da refrigeração e tomou a decisão de desenvolver a sua própria linha de produtos. Inicialmente foi desenvolvida uma estrutura para uma central frigorífica a funcionar com CO₂, com o objetivo de oferecer as melhores soluções de produtos aos seus clientes. Posto isto, a empresa sentiu a necessidade de otimizar a estrutura metálica da sua central frigorífica.

A presente dissertação consistiu no estudo desta estrutura, através da realização de estudos estruturais implementando o Método de Elementos Finitos (MEF) ao modelo inicial da estrutura, com o objetivo de apresentar um plano de melhorias a esta central e assim desenvolver, em conjunto com a empresa, uma solução que melhor se adequasse aos seus requisitos do projeto. A estrutura foi submetida a estudos estáticos e modais nas diferentes condições a que está sujeita. Estes estudos foram realizados com o intuito de otimizar a estrutura de modo a obter uma redução da massa, implementar soluções práticas a nível técnico da instalação e benéficas para um melhor desempenho estrutural. A estrutura a desenvolver tem de validar os coeficientes de segurança impostos e oferecer uma solução economicamente apelativa. A estrutura desenvolvida mostrou ser uma solução vantajosa e funcional para a empresa e será aplicada nas próximas centrais frigoríficas desenvolvidas. O produto final validou os requisitos de projeto, incluindo o coeficiente de segurança estabelecido, permitiu obter uma redução significativa da massa da estrutura, e constitui uma proposta economicamente viável.

KEYWORDS

Metallic structures; Mechanical design; Finite Element Method (FEM); Static analysis; Modal analysis; Refrigeration plants.

ABSTRACT

The refrigeration industry has a primary role in a variety of sectors, such as transportation, food and chemicals. The wide use of refrigeration systems leads to its evolution with the aim of introducing new technologies and improving them in terms of less environmental impact. Nowadays the refrigeration plants that utilize CO₂ as a working fluid in the transcritical regime provide an excellent response to the currently applicable legislations. Companies like RACE (host company) faced the new challenges of the refrigeration sector and made the decision to develop its own product line. Initially, a structure was developed for a refrigeration plant operating with CO₂, with the objective of offering the best product solutions to its customers. That said, the company felt the need to optimize the metal structure of its refrigeration plant.

This dissertation consisted of the study of this structure, through structural studies implementing the Finite Element Method (FEM) to the initial model of the structure, in order to present an improvement plan to this plant and thus develop, together with the company, a solution that best suits its project requirements. The structure has undergone static and modal studies under the different conditions to which it is subjected to throughout the entire process. These studies were carried out in order to optimize the structure and achieve a reduction in its mass, implement practical solutions at the technical level of the installation and benefits for better structural performance. The structure to be developed must validate the imposed safety coefficients and offer an economically appealing solution. The developed structure proved to be an advantageous and functional solution for the company and will be applied in refrigeration plants developed in the future. The final product validated the design requirements, including the established safety coefficient, allowed a significant reduction in the mass of the structure, and is seen as an economically viable option.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

3D	Três dimensões
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
AQS	Águas quentes sanitárias
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
BT	Baixa temperatura
CFC	Clorofluorcarbonetos
CM	Centro de massa
CO ₂	Dióxido de carbono
COP	Coeficiente de desempenho
EC	Eurocódigo
GNL	Gás natural liquefeito
GWP	<i>Global warming potencial</i>
HCFC	Hidroclorofluorcarbonetos
HFC	Hidrofluorcarbonetos
IIR	Instituto Internacional da Refrigeração
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MEF	Método de elementos finitos
MT	Média temperatura
ODP	<i>Ozone depletion potencial</i>
RACE	<i>Refrigeration & Air-Conditioning Engineering</i>
REAE	Regulamento de estruturas de aço para edifícios

SWOT	<i>Strengths, weaknesses, opportunities, threats</i>
------	--

UE	União Europeia
----	----------------

Lista de Unidades

€	Euros
---	-------

°C	Grau Celsius
----	--------------

GPa	Giga Pascal
-----	-------------

Hz	Hertz
----	-------

kg	Quilograma
----	------------

kg/m ³	Quilograma por metro ao cubo
-------------------	------------------------------

kW	Quilowatt
----	-----------

kWh	Quilowatt hora
-----	----------------

l/min	Litros por minuto
-------	-------------------

mm	Milímetros
----	------------

mm ²	Milímetros ao quadrado
-----------------	------------------------

mm ³	Milímetros ao cubo
-----------------	--------------------

mm/min	Milímetros por minuto
--------	-----------------------

MPa	Mega Pascal
-----	-------------

N	Newton
---	--------

N·mm	Newton milímetro
------	------------------

N/mm ²	Newton por milímetro quadrado
-------------------	-------------------------------

Lista de Símbolos

$\%$	Porcentagem
$^{\circ}$	Grau
A	Vetor global das variáveis de campo
a	Garganta efetiva do cordão de soldadura
B	Matriz transposta de deformação
b	Largura do perfil
CS_{ls}	Coefficiente de segurança das ligações soldadas
D	Matriz de elasticidade
F	Vetor global das forças nodais
f_u	Tensão última à tração
f_{ub}	Tensão última à tração dos parafusos
$F_{w,Ed}$	Esforço atuante no cordão de soldadura
$F_{w,Rd}$	Resistência da soldadura
f_y	Tensão de cedência
f_{yb}	Tensão de cedência dos parafusos
K	Matriz de rigidez global
K_e	Matriz de rigidez do elemento
$L_{w,s}$	Comprimento efetivo da solda em canto
R	Vetor global das reações
t	Espessura nominal
t_p	Espessura do perfil
V	Volume
γ_{M2}	Coefficiente parcial de segurança

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Logótipo da empresa de acolhimento [1].....	4
Figura 2: As gerações de desenvolvimento da área (adaptado de [3]).	7
Figura 3: Evolução dos fluidos frigorigéneos ao longo dos anos, representando as várias etapas da evolução (adaptado de [5]).	8
Figura 4: Previsão de centrais transcíticas de CO ₂ aplicadas até 2030 na Europa (adaptado de [16]).	11
Figura 5: COP das centrais transcítica em função da temperatura ambiente (adaptado de [17]).	12
Figura 6: Diagrama ciclo de refrigeração (adaptado de [20]).	13
Figura 7: Etapas do desenvolvimento de um produto (adaptado de [22]).	15
Figura 8: Vantagens das estruturas metálicas (adaptado de [23]).	15
Figura 9: Construção de um edifício recorrendo a uma estrutura metálica [27].	16
Figura 10: Estrutura metálica de um armazém industrial [31].	17
Figura 11: Estrutura metálica de uma linha de produção robotizada[34].	18
Figura 12: Estrutura em alumínio de linha de produção [37].	18
Figura 13: Exemplos de perfis de menor complexidade em alumínio [39].	19
Figura 14: Exemplo de perfis mais complexos em alumínio [40].	20
Figura 15: Exemplos de perfis disponíveis em aço (adaptado de [41]).	20
Figura 16: Tipos de ligações aparafusadas: a) parafuso-porca, b) parafuso-rosca e c) perne-porca (adaptado de [44]).	22
Figura 17: Comparação entre malhas a) grosseira (41 elementos) e b) refinada (192 elementos) [63].	28
Figura 18: Elementos mais comuns nos estudos estruturais [63].	29
Figura 19: Exemplo de um sistema de coordenadas e componentes de espaço de um elemento barra tridimensional de 2 nós (adaptado de [65]).	30
Figura 20: Exemplo de um ponto de concentração de tensões [66].	32
Figura 21: Evolução da empresa ao longo da sua história.	37
Figura 22: Principais produtos desenvolvidos pela empresa (adaptado de [73]).	38
Figura 23: Central frigorífica a operar com CO ₂ desenvolvida pela empresa.	39
Figura 24: Estrutura modular aplicada numa central frigorífica com CO ₂ como fluido de trabalho (adaptado de [74]).	42
Figura 25: Estrutura em chapa quinada aplicada numa central frigorífica a funcionar com CO ₂ como fluido de trabalho [76].	42

Figura 26: Central de refrigeração a funcionar com CO ₂ em regime subcrítico.	43
Figura 27: Representação da central frigorífica produzida pela empresa a funcionar com CO ₂	45
Figura 28: Estrutura metálica da central frigorífica e respetivas dimensões (mm).	46
Figura 29: Gráfico de convergência da tensão de von Mises.	48
Figura 30: Gráfico de convergência dos deslocamentos resultantes.	49
Figura 31: Resultado da tensão de von Mises da estrutura inicial (deslocamentos ampliados 100 vezes).	50
Figura 32: Resultado dos deslocamentos resultantes da estrutura inicial (deslocamentos ampliados 100 vezes).	50
Figura 33: Resultado do fator de segurança da estrutura inicial (deslocamentos ampliados 100 vezes). .	51
Figura 34: Representação do fator de segurança no local de aplicação dos pés de nivelamento (deslocamentos ampliados 100 vezes).	51
Figura 35: Resultado das deformações da estrutura inicial (deslocamentos ampliados 100 vezes).	52
Figura 36: Resultado da frequência natural de vibração local de 70,02 Hz (deslocamentos ampliados 100 vezes).	53
Figura 37: Resultado da frequência natural de vibração da estrutura de 64,20 Hz (deslocamentos ampliados 100 vezes).	53
Figura 38: Resultado da tensão de von Mises da estrutura inicial quando posicionada nos garfos do empilhador (deslocamentos ampliados 100 vezes).	54
Figura 39: Resultado dos deslocamentos resultantes da estrutura inicial quando posicionada nos garfos do empilhador (deslocamentos ampliados 100 vezes).	54
Figura 40: Resultado do fator de segurança da estrutura inicial quando posicionada nos garfos do empilhador (deslocamentos ampliados 100 vezes).	55
Figura 41: Resultado da deformação equivalente da estrutura inicial quando posicionada nos garfos do empilhador (deslocamentos ampliados 100 vezes).	55
Figura 42: Centrais frigoríficas com a aplicação de 2 estruturas diferentes: (1) Estrutura modular e (2) Estrutura de módulo único [78].	56
Figura 43: Perfil <i>Omega</i>	59
Figura 44: Central frigorífica a operar com CO ₂ , com a estrutura desenvolvida inserida.	60
Figura 45: Estrutura final e respetivas dimensões.	61
Figura 46: Representação das condições fronteira e forças aplicadas à estrutura no 1º caso de estudo. 68	
Figura 47: Representação das condições fronteira e forças aplicadas à estrutura no 2º caso de estudo. 69	
Figura 48: Modelo 3D da estrutura, realizado através da ferramenta “Análise de estrutura”.	71

Figura 49: Representação das vigas, dos nós, das cargas e condições fronteira aplicadas à estrutura (1º caso de estudo).....	71
Figura 50: Resultado da tensão do modelo para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	72
Figura 51: Resultado dos deslocamentos do modelo para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	72
Figura 52: Momentos no eixo x do modelo para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).	73
Figura 53: Momentos no eixo y do modelo para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).	73
Figura 54: Momentos no eixo z do modelo para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).	74
Figura 55: Representação das vigas, dos nós, das cargas e condições fronteira aplicadas à estrutura (2º caso de estudo).....	74
Figura 56: Resultado da tensão do modelo para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	75
Figura 57: Resultado dos deslocamentos do modelo para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	75
Figura 58: Momentos no eixo x do modelo para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).	76
Figura 59: Momentos no eixo y do modelo para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).	76
Figura 60: Momentos no eixo z do modelo para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).	77
Figura 61: Representação da configuração da malha utilizada.	78
Figura 62: Gráfico de convergência da tensão de von Mises (estrutura final).	80
Figura 63: Gráfico de convergência dos deslocamentos (estrutura final).	80
Figura 64: Resultado da tensão de von Mises para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	81
Figura 65: Resultado dos deslocamentos resultantes para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	81
Figura 66: Resultado da deformação equivalente para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	82
Figura 67: Resultado do fator de segurança para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	82

Figura 68: Resultado da frequência natural de vibração da estrutura de 39,59 Hz (deslocamentos ampliados 50 vezes).....	83
Figura 69: Resultado da frequência natural de vibração local de 64,85 Hz (deslocamentos ampliados 50 vezes).	84
Figura 70: Resultado da tensão de von Mises para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	84
Figura 71: Resultado dos deslocamentos para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	85
Figura 72: Resultado da deformação equivalente para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	85
Figura 73: Resultado do fator de segurança para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).	86
Figura 74: Representação e nomenclatura das soldaduras a dimensionar.	87
Figura 75: Representação dos suportes das válvulas e da calha de fixação da tubagem.	89
Figura 76: Vista frontal da estrutura final.	90
Figura 77: Vista isométrica da estrutura final.	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Número de sistemas de refrigeração em operação por aplicação (adaptado de [12]).	10
Tabela 2: Valores nominais de tensão de cedência, f_{yb} , e da tensão de rotura à tração f_{ub} , para parafusos (adaptado de [43]).	21
Tabela 3: Valores nominais de tensão de cedência f_y e da tensão última à tração f_u para aços estruturais (adaptado de [54]).	24
Tabela 4: Descrição dos processos de fabrico [57, 59].	25
Tabela 5: Estado de arte no projeto com recurso ao MEF.	33
Tabela 6: Características da estrutura inicial.	46
Tabela 7: Propriedades do aço aplicado à estrutura (ST 37.0) [77].	47
Tabela 8: Configurações da malha utilizada nos estudos dos elementos finitos.	48
Tabela 9: Análise SWOT da implementação da estrutura modular.	57
Tabela 10: Análise SWOT da implementação de uma estrutura de módulo único.	58
Tabela 11: Características da estrutura final.	62
Tabela 12: Propriedades do aço aplicado à estrutura desenvolvida.	62
Tabela 13: Solicitações impostas à estrutura e respetivas localizações.	63
Tabela 14: Configurações da malha utilizada nos estudos dos elementos finitos.	79
Tabela 15: Estudo de convergência efetuado para a estrutura final.	79
Tabela 16: Comparação dos resultados do pré-dimensionamento vs. dimensionamento.	86
Tabela 17: Propriedade dos materiais disponíveis para a construção da estrutura [79].	91
Tabela 18: Lista de peças e respetivos processos de fabrico.	92
Tabela 19: Custos dos materiais necessários para o fabrico da estrutura.	96
Tabela 20: Custo dos consumíveis da soldadura.	97
Tabela 21: Custos associados à construção da estrutura.	98
Tabela 22: Resultados da otimização estrutural realizada.	102

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura da dissertação	4
1.4	Empresa de acolhimento	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Indústria da refrigeração.....	7
2.1.1	Caracterização do setor.....	9
2.1.2	Aplicações dos sistemas de refrigeração.....	12
2.1.3	Sistemas constituintes.....	13
2.2	Projeto mecânico de estruturas metálicas	14
2.2.1	Projeto de estruturas exteriores	16
2.2.2	Projeto de equipamentos fabris.....	17
2.2.3	Soluções comuns de projeto	19
2.2.3.1	Perfis extrudidos	19
2.2.4	Ligações soldadas	21
2.2.5	Ligações aparafusadas.....	21
2.2.6	Outros tipos de ligações	22
2.2.7	Normalização no projeto de estruturas metálicas	22
2.2.8	Materiais utilizados	23
2.2.9	Processos de fabrico.....	25
2.3	Dimensionamento de estruturas metálicas	26
2.3.1	Ferramentas de dimensionamento	27
2.3.2	Método de Elementos Finitos (MEF)	27
2.3.2.1	Caracterização geral.....	28
2.3.2.2	Fundamentos do método	29

2.3.2.3	<i>Softwares</i> utilizados	31
2.3.3	Estado-da-arte no dimensionamento de estruturas	32
3	DESENVOLVIMENTO	37
3.1	Caracterização da empresa	37
3.2	Objetivos do projeto	38
3.3	Requisitos de projeto	40
3.4	Soluções idênticas disponíveis	41
3.4.1	Descrição de produtos concorrentes	41
3.4.2	Soluções internas na empresa.....	43
3.4.3	Análise crítica dos pontos fracos	44
3.5	Anteprojeto da estrutura	45
3.5.1	Estrutura inicial.....	45
3.5.2	Tempestade de ideias.....	56
3.5.3	Análise SWOT	57
3.5.4	Seleção das ideias a implementar	58
3.6	Projeto da estrutura.....	59
3.6.1	Descrição da estrutura final	60
3.6.2	Dimensionamento	63
3.6.2.1	Solicitações impostas	63
3.6.2.1.1	Primeiro caso de estudo	68
3.6.2.1.2	Segundo caso de estudo	69
3.6.2.2	Métodos de dimensionamento	70
3.6.2.3	Pré-dimensionamento	71
3.6.2.4	Dimensionamento pelo MEF	77
3.6.2.5	Ligações soldadas.....	87
3.6.2.6	Acabamentos	89
3.7	Desenhos de pormenor.....	90
3.8	Materiais	91

3.9	Processos de fabrico	92
3.10	Análise económica	95
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	101
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	105
6	ANEXOS.....	113
6.1	Desenhos de pormenor.....	113
6.1.1	Desenhos de pormenor da estrutura final	113
6.1.2	Desenhos de pormenor dos constituintes da estrutura final.....	113

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura da dissertação
- 1.4 Empresa de acolhimento

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O setor da refrigeração tem vindo a destacar-se pela sua evolução nos últimos anos, que se deve à introdução de novas legislações que restringem a utilização de fluidos frigorigéneos, devido ao impacto que estes têm sobre o meio ambiente. Para além da necessidade de reduzir a poluição, existem outras razões que originam o desenvolvimento deste setor, tais como a evolução dos fluidos frigorigéneos e das tecnologias implementadas nos sistemas com o objetivo de melhorar o desempenho.

Na refrigeração é disponibilizada uma vasta gama de sistemas, com a aplicação em diferentes áreas, tais como doméstica, comercial, transportes, saúde, indústria e no desporto. Esta área representa assim um papel importante na economia mundial e no consumo da energia elétrica.

Atualmente é necessário o desenvolvimento das centrais frigoríficas, de modo a aumentar o seu desempenho em condições desfavoráveis, e ainda, melhorar a qualidade destas centrais disponibilizadas no mercado, para aumento da competitividade da empresa.

1.2 Objetivos

No contexto da presente tese, o principal objetivo é a elaboração e otimização de uma estrutura metálica para aplicar numa central frigorífica a operar com dióxido de carbono no regime transcrito. De momento, estas centrais correspondem às necessidades do mercado e do setor da refrigeração. Como tal, irá ser realizada a otimização da estrutura disponibilizada pela empresa de acolhimento, para obter um produto final que corresponda às necessidades da instalação e da empresa.

Em primeiro lugar, proceder-se-á ao estudo da estrutura já existente, recorrendo à ferramenta de cálculo de elementos finitos, o que permitiu simular diferentes cenários de carga a que a estrutura é submetida. Esta análise permite recolher os pontos fundamentais para o dimensionamento de uma estrutura, analisar a estrutura e verificar se esta satisfaz os requisitos impostos pelo projeto.

Alguns dos pontos-chave a desenvolver para a estrutura são:

- Pesquisa e análise das ofertas presentes no mercado;
- Análise de materiais/perfis e soluções inovadoras;

- Resistência da estrutura com uma solução económica;
- Versatilidade para a adaptação de vários componentes;
- Garantia dos requisitos de projeto impostos;
- Facilidade de acesso para a manutenção em obra.

1.3 Estrutura da dissertação

A estrutura da tese é predominantemente constituída por quatro partes. A introdução diz respeito à contextualização do tema, apresentação dos objetivos da dissertação e respetiva estrutura, bem como indicação da empresa de acolhimento. Na revisão bibliográfica destacam-se as temáticas abordadas neste projeto, como resultado da recolha de informação relevante de artigos, revistas, livros ou outras fontes de informação que relatem os últimos desenvolvimentos e progressos. O desenvolvimento corresponde à terceira parte desta tese, onde se relata todo o processo e as etapas necessárias até alcançar a solução final do projeto. Por fim, apresenta-se a conclusão e trabalhos futuros, onde é avaliado o projeto realizado face aos objetivos propostos inicialmente, bem como a análise crítica dos resultados e trabalhos futuros.

1.4 Empresa de acolhimento

A RACE (Refrigeration & Air-Conditioning Engineering), empresa responsável pela atribuição da presente tese, encontra-se sediada em Guifões, Matosinhos, sendo o seu principal setor de atuação a Refrigeração e a Climatização. O logótipo da empresa encontra-se na Figura 1. Neste setor, a empresa é responsável por todos os processos de uma instalação, desde o seu projeto, fabrico e montagem, bem como a sua posterior manutenção. O trabalho foi realizado em âmbito empresarial, sob a orientação do departamento de projeto, que forneceu os requisitos de projeto e diversas informações necessária para o auxílio do desenvolvimento do projeto.



Figura 1: Logótipo da empresa de acolhimento [1].

O presente projeto foi apresentado pela empresa quando tomou a iniciativa de adaptar-se aos mais recentes desenvolvimentos na área da refrigeração, iniciando assim o projeto de centrais frigoríficas a funcionar com CO₂ no regime transcrito.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Indústria da refrigeração
- 2.2 Projeto mecânico de estruturas metálicas
- 2.3 Dimensionamento de estruturas metálicas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria da refrigeração

A indústria da refrigeração exerce um papel fulcral nos dias de hoje, sendo a sua aplicação de maior impacto no setor alimentar, nomeadamente na conservação e preservação dos bens alimentares. O processo de refrigeração consiste em remover calor de um corpo ou espaço [2]. A evolução deste setor é fundamentada na remoção do calor de um determinado objeto de modo mais eficaz e com menor gasto de energia.

A evolução da refrigeração destaca-se pelas quatro gerações, apresentadas na Figura 2.

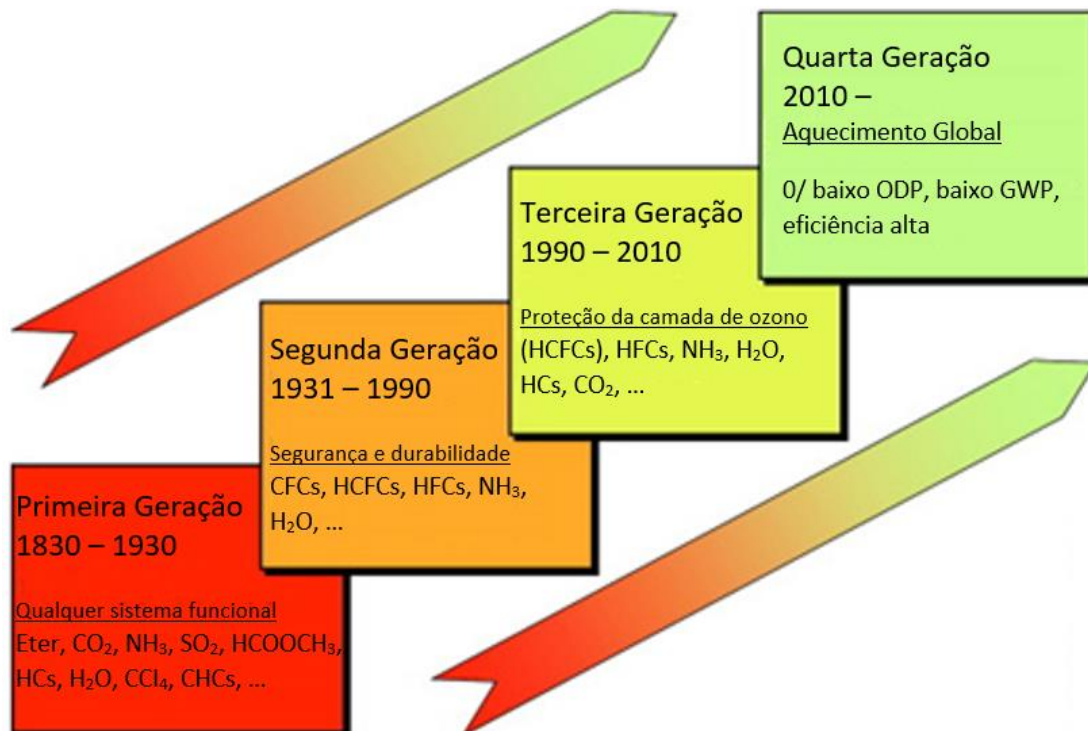


Figura 2: As gerações de desenvolvimento da área (adaptado de [3]).

Os desenvolvimentos da refrigeração ocorreram no início do século XIX, dando origem à primeira geração. Esta fase apresentou a maior duração. Com o passar dos anos, o conhecimento desta área aumentou e verificou-se que os sistemas não eram seguros e de baixa durabilidade, encerrando assim esta geração. Na primeira geração, pretendia-se que todos os sistemas funcionais e disponíveis, eram alvo de aplicação.

A segunda geração foi marcada pelos paradigmas estabelecidos, sendo a segurança e a durabilidade dos sistemas dois pontos vitais. Os fluidos frigorigêneos aplicados nesta geração foram os clorofluorcarbonetos (CFC) e os hidroclorofluorcarbonetos (HCFC) [3].

A introdução destes fluidos frigorigêneos deu azo a uma problemática ambiental, que desencadeou assim o término da segunda geração e originou a terceira geração, com o objetivo de proteger a camada de ozono. Esta geração veio substituir os fluidos CFC e HCFC por fluidos à base de hidrofluorcarbonetos (HFC), que apresentam um índice potencial de destruição da camada de Ozono (*Ozone depletion potencial* (ODP)) igual a zero [4].

A quarta geração surgiu em 2010, com o objetivo de responder às restrições impostas pela legislação, promovendo a utilização de fluidos com menor impacto ambiental, nomeadamente: baixa contribuição para a destruição da camada de ozono e para o aumento do aquecimento global. Atualmente, as centrais frigoríficas com utilização do dióxido de carbono (CO₂) como fluido de trabalho, têm sido foco de desenvolvimento devido ao seu elevado potencial de resposta às mais recentes necessidades.

No âmbito da refrigeração, alguns desafios tais como os protocolos e políticas ambientais implementaram novas regras de utilização de fluidos frigorigêneos com o objetivo de reduzir o impacto ambiental [3]. Na Figura 3 são apresentadas as quatro gerações da refrigeração e consegue-se analisar a ligação da regulamentação com o aparecimento de uma nova geração.

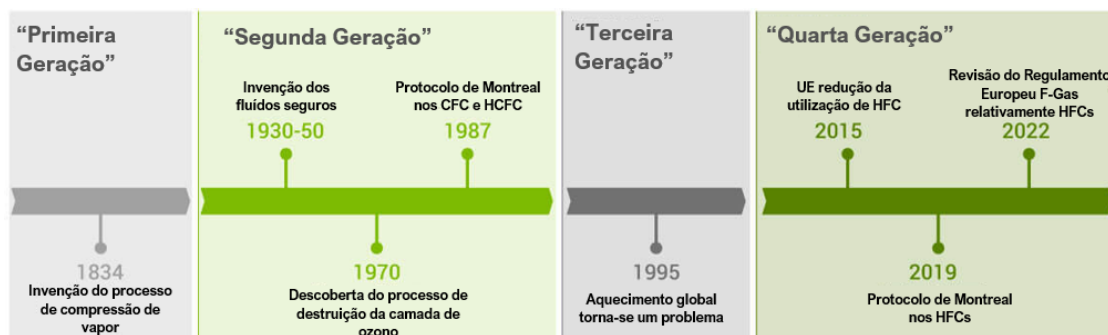


Figura 3: Evolução dos fluidos frigorigêneos ao longo dos anos, representando as várias etapas da evolução (adaptado de [5]).

O Protocolo de Montreal assinado no final da década de 80, por todos os Estados Membros da Organização das Nações Unidas (ONU), veio regulamentar o uso de certos fluidos frigorigêneos, mais concretamente daqueles que apresentam propriedades de reação com a camada de Ozono e levam à degradação da mesma. O ODP permite a quantificação do impacto destes, na camada de Ozono [6].

O valor do índice do ODP tem como referência o valor de 1 para o CFC R11. Todos os fluidos frigorigêneos que apresentem um índice superior têm um impacto negativo na camada de ozono, sendo estes abolidos de utilização. Apenas os fluidos frigorigêneos com um ODP igual a zero podem ser utilizados nos sistemas de refrigeração [4].

As alterações climáticas é uma das maiores preocupações da atualidade, e o aumento da temperatura média à superfície da terra gerou a necessidade de regular as emissões de gases. Para tal, o Protocolo de Quioto veio estabelecer limites de emissões de gases com efeito de estufa [7].

Foi introduzido um índice que caracteriza os fluidos frigorigéneos relativamente ao aumento do efeito de estufa. Este índice do potencial de aquecimento global (*Global warming potencial* ou GWP) permite a análise da contribuição dos fluidos frigorigéneos comparativamente à contribuição do CO₂, para o efeito de estufa que apresenta um índice de GWP igual a 1 [8].

Devido às preocupações ambientais cada vez mais presentes no quotidiano, a 1 de janeiro de 2015, entrou em vigor o Regulamento F-Gas, impondo certas restrições aos fluidos frigorigéneos, em função do seu valor de GWP. Numa fase inicial, o Regulamento F-Gas aplicou medidas sobre a utilização de fluidos frigorigéneos com GWP>2500. No entanto, a partir de 1 de janeiro de 2022, será proibida a instalação de centrais frigoríficas com fluidos frigorigéneos com GWP>150 [9].

A seleção de um fluido frigorigéneo está relacionada com os índices que estes apresentem, sendo necessário que o índice de ODP seja nulo e o índice de GWP inferior a 150. Para além da análise dos índices, as propriedades de maior interesse num fluido frigorigéneo são o bom desempenho nas permutas termodinâmicas, a sua não toxicidade, o facto de serem não inflamáveis ou de baixo risco de inflamação, bom desempenho em condições de utilização e o baixo custo [10]. A utilização do CO₂ (designação técnica R744) como fluido frigorigéneo na refrigeração apresenta-se como uma solução viável na resposta às propriedades desejáveis.

Atualmente, a utilização de sistemas de refrigeração é imprescindível no quotidiano e, com a evolução deste setor, vai ser possível encontrar tecnologias mais eficientes e soluções de menor impacto ambiental [11].

2.1.1 Caracterização do setor

O Instituto Internacional da Refrigeração (IIR) afirma que o setor da refrigeração representa um papel importante na economia mundial, pois representa cerca de 500 biliões de euros em vendas [12]. Atualmente, o IIR prevê que existem cerca de 5 biliões de sistemas da refrigeração instalados por todo o mundo (Tabela 1), este setor gera emprego a 15 milhões de pessoas [12]. Este setor é responsável pelo consumo de 20 % da energia elétrica mundial, o que revela a importância deste setor na economia mundial [12].

Nos próximos anos, prevê-se um crescimento do número de sistemas de refrigeração e uma evolução deste setor, para conseguir atender às preocupações ambientais [12].

Tabela 1: Número de sistemas de refrigeração em operação por aplicação (adaptado de [12]).

Aplicações	Setor	Equipamentos	Número de unidades em funcionamento
Refrigeração e Alimentação	Refrigeração doméstica	Frigoríficos e congeladores	2 mil milhões
	Refrigeração comercial	Equipamentos de refrigeração comercial (incluindo unidades de condensação e sistemas de supermercados)	120 milhões
	Refrigeração nos transportes	Veículos de refrigeração comercial (carrinhas, camiões, semi-reboques ou reboques)	5 milhões
		Contentores refrigerados	1.2 milhões
	Refrigeração de armazéns	Armazéns frigoríficos	50 000
Ar condicionado	Sistemas de ar condicionado fixos	Unidades de ar condicionado residencial	1.1 mil milhões
		Unidades de ar condicionado comercial	0.5 mil milhões
		<i>Chillers</i>	40 milhões
	Sistemas de ar condicionado móveis	Ar condicionado de veículos	1 mil milhão
Refrigeração e Saúde	Medicina	Máquinas de Imagem por Ressonância Magnética	50 000
Refrigeração na indústria	Gás natural liquefeito (GNL)	Terminais de regaseificação GNL	126
		Navios de transporte de GNL	525
Bombas de calor		Bombas de calor (residencial, comercial e equipamentos industriais)	220 milhões
Lazer e desporto		Ringues de gelo	17 000

O setor da refrigeração em Portugal apresenta um futuro promissor devido ao aumento das necessidades do retalho alimentar, prevendo-se uma rápida evolução. Os consumidores finais procuram produtos frescos e com padrões de qualidade mais elevados [13]. Os regulamentos e protocolos da utilização de fluidos frigorigéneos com impacto negativo no meio ambiente vêm reforçar a necessidade de alteração destes fluidos frigorigéneos.

Em 2016, o uso do fluido frigorigéneo R22 em Portugal era de 25%, mas este fluido frigorigéneo não verificava um ODP igual a zero, sendo abolido [14]. Nesse mesmo ano ainda não existiam centrais frigoríficas a funcionar com CO₂ instaladas em Portugal, mas existe uma tendência crescente para a introdução no mercado desses sistemas. Atualmente, o setor de refrigeração em Portugal apresenta uma tendência na procura e desenvolvimento de soluções comerciais e industriais [15]. O desenvolvimento deste permitirá a substituição dos fluidos frigorigéneos presentes nas cadeias alimentares que não satisfaçam os mais recentes requisitos impostos pelos regulamentos.

O mercado alvo da aplicação das centrais frigoríficas de CO₂ são os supermercados, pois necessitam preservar os bens alimentares em grandes quantidades. Nos dias de hoje, as empresas de refrigeração têm como principal objetivo a instalação e/ou o desenvolvimento das centrais frigoríficas de CO₂, para apresentarem sistemas mais eficientes e com menor consumo energético.

A aplicação de centrais frigoríficas a funcionar com CO₂ no regime transcrito é algo relativamente recente. Em 2018, encontram-se poucas unidades instaladas na Europa, no entanto, prevê-se que até 2030, o número das centrais instaladas tenha uma tendência crescente. Através da análise da Figura 4 é possível visualizar, conforme o cenário conservador e otimista, uma tendência de crescimento até ao ano de 2030.

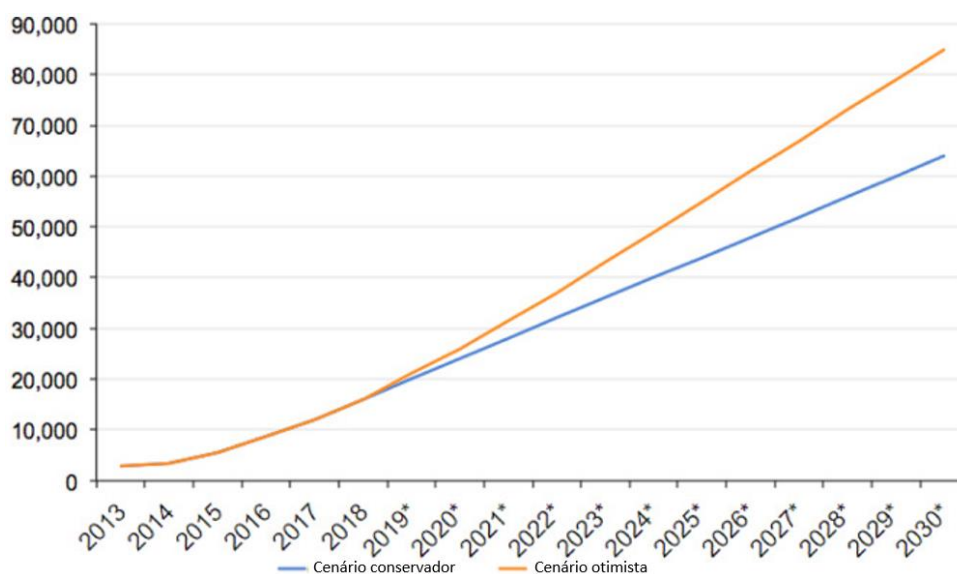


Figura 4: Previsão de centrais transcríticas de CO₂ aplicadas até 2030 na Europa (adaptado de [16]).

No início da aplicação das centrais frigoríficas a funcionar com CO₂ no regime transcrito, apresentavam limitações em climas mais quentes, reduzindo o seu mercado. Mas, nos últimos anos, os progressos apresentados possibilitaram a sua utilização nesses climas. Em climas mais frios, as centrais comprovam melhor coeficiente de desempenho (COP), como apresentado Figura 5 [16].

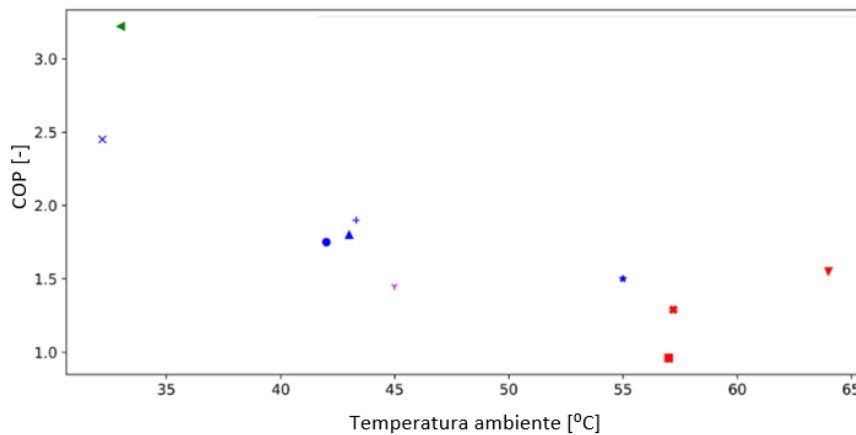


Figura 5: COP das centrais transcrito em função da temperatura ambiente (adaptado de [17]).

2.1.2 Aplicações dos sistemas de refrigeração

A indústria da refrigeração e a sua evolução permitiram progressos não só na área da refrigeração, mas também nas áreas onde a refrigeração está implementada, tais como [18]:

- Comercial: todos os sistemas implementados em supermercados e no setor da restauração;
- Doméstica: os equipamentos disponíveis nas habitações, desde o sistema de ar condicionado aos frigoríficos e congeladores;
- Transporte: a implementação neste setor permite a melhoria da qualidade de uma viagem de avião ou mesmo no carro pessoal, através do transporte de cargas que necessitam de refrigeração para manter as suas propriedades durante o mesmo;
- Sistemas de refrigeração industrial: esta área é dedicada à produção de frio em larga escala, com principal impacto na indústria química, farmacêutica e nos armazéns de bens alimentares.

A refrigeração em cada setor, disponibiliza diferentes sistemas ajustados a cada aplicação e à potência de refrigeração necessária. Os sistemas de ar condicionados têm vários equipamentos e soluções para cada aplicação. Apresentam desde soluções mais simples para a climatização de uma divisão de uma habitação até às soluções mais complexas para climatização de espaços comerciais [18].

A utilização de refrigeração no setor comercial apresenta diversos sistemas, desde aplicações de refrigeração de menores dimensões como uma máquina de vendas

automáticas até grandes aplicações como um supermercado onde é necessário a refrigeração de várias câmaras frigoríficas e expositores. Os sistemas de aplicação comercial apresentam soluções para as mais diversas gamas de potência [18].

Nas habitações estão disponíveis vários sistemas de refrigeração que constituem soluções mais simples para a refrigeração de frigoríficos e congeladores de pequenas dimensões. Os equipamentos apresentados para o mercado doméstico procuram soluções de baixo consumo energético a baixo custo [18].

O recurso da refrigeração no setor dos transportes é importante na climatização de veículos, comboios e aviões, e na refrigeração para o transporte de cargas através de contentores refrigerados. Muitas das vezes, é necessário nestes transportes o recurso a temperaturas negativas [18].

A utilização de sistemas industriais é recorrente quando se procuram soluções para elevadas gamas de potência frigorífica, como é comum nas indústrias alimentares, químicas e bioquímicas [18].

2.1.3 Sistemas constituintes

O fundamento de um sistema de refrigeração é constituído por quatro fases: compressão, condensação, expansão do fluido frigorígeno e evaporação. Os equipamentos responsáveis são, respetivamente, os compressores, condensadores, válvulas de expansão e evaporadores, como representado na Figura 6 [19]. Estes equipamentos são os principais constituintes de uma central de refrigeração.

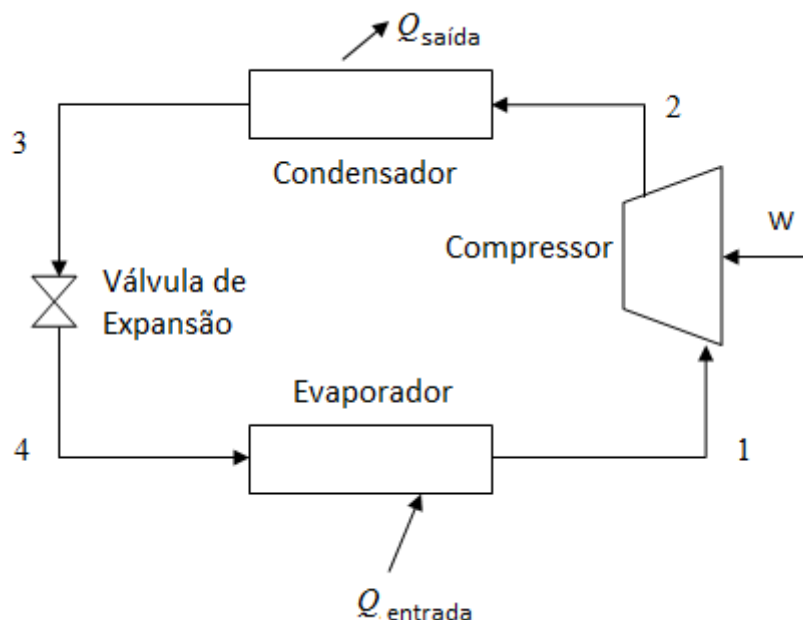


Figura 6: Diagrama ciclo de refrigeração (adaptado de [20]).

- Compressores – a principal função é o aumento da pressão do fluido possibilitando o aumento da temperatura e são responsáveis pelo bombeamento do fluido;
- Condensadores – a finalidade deste é executar a transferência de calor entre o fluido frigorígeno com outro fluido (ar ou água);
- Válvulas de expansão – permitem a regulação e a redução da pressão do fluido frigorígeno antes de ser fornecido ao evaporador;
- Evaporadores – a função deste equipamento é transferir energia na forma de calor entre o sistema de refrigeração e o espaço a refrigerar.

Para além dos equipamentos principais encontram-se ainda num sistema de refrigeração outros componentes, tais como:

- Depósito de líquido – armazena o fluido frigorígeno condensado e abastece o sistema de refrigeração;
- Separador de óleo - encontra-se depois dos compressores, com a função de separar o óleo da mistura a alta pressão;
- Depósito de óleo – armazena o óleo excedente do sistema e fornece-o aos compressores;
- Tubagem – possibilita a movimentação do fluido frigorígeno pelo sistema de refrigeração.

2.2 Projeto mecânico de estruturas metálicas

O projeto na área da engenharia é uma etapa complexa, onde o projetista procura a melhor solução técnica para um determinado produto ou problema. Este é um processo meticuloso e envolve melhorias sistemáticas, até se encontrar uma solução que responda às necessidades impostas pelos requisitos do projeto [21, 22].

O projeto mecânico envolve, assim, todos os processos necessários até à apresentação de uma proposta de solução. A recolha do máximo de requisitos é um ponto importante no início do projeto, que permitirá ao responsável adequar o projeto de maneira a corresponder às necessidades do mesmo [21]. Na Figura 7 é apresentado um esquema genérico dos diferentes procedimentos e a interação entre eles no desenvolvimento de um projeto. O projeto de estruturas metálicas não é exceção, a sua principal função é o dimensionamento da estrutura metálica para uma determinada aplicação. Um projeto é constituído por 3 fases, que passam pela criação de um esboço, e posteriormente, a recriação em *software* 3D. De seguida, será submetido a um dimensionamento com recurso às ferramentas de cálculo e de simulação, que permitirão validar o objeto em estudo para os esforços a que está sujeito. Após a elaboração de um primeiro modelo, este permite uma análise na perspetiva da melhoria do projeto e, conseqüentemente, a elaboração de um plano de melhorias. Estes processos permitem a elaboração do

produto, que responde aos requisitos de projeto com um plano do fabrico e uma análise de custos [22].

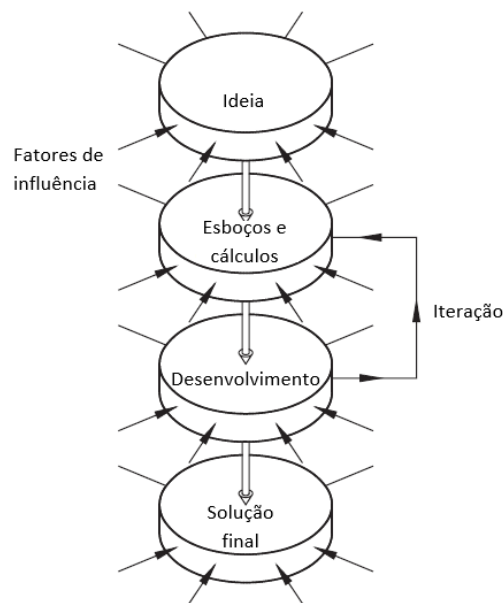


Figura 7: Etapas do desenvolvimento de um produto (adaptado de [22]).

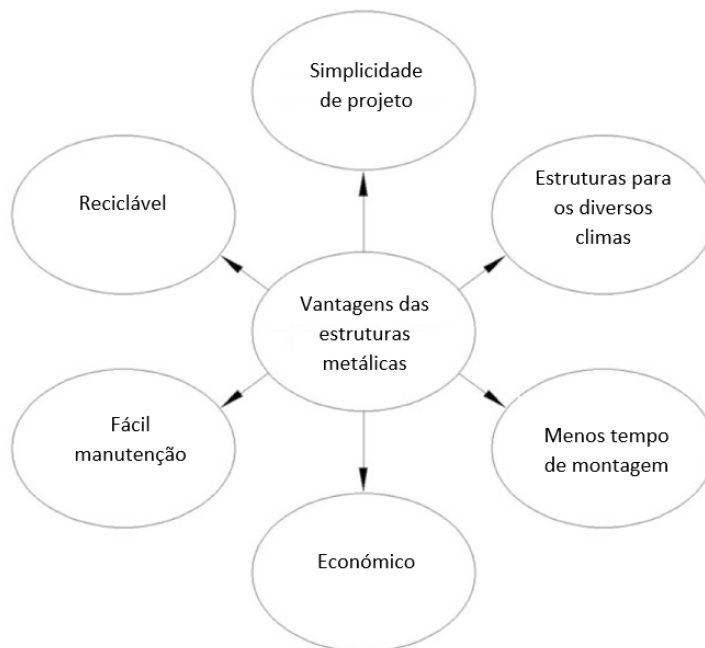


Figura 8: Vantagens das estruturas metálicas (adaptado de [23]).

As estruturas metálicas, para certas aplicações são a melhor opção, face às estruturas de betão. A Figura 8 apresenta algumas das vantagens associadas a estas, tais como, o projeto mais simples, menor tempo de fabrico e a manutenção da estrutura, ao longo da sua vida, de forma a preservá-la [23]. Com recurso a um revestimento consegue prevenir-se a corrosão provocada pelas condições ambientais.

Nas indústrias onde é necessário um ambiente de baixo risco de contaminações, a aplicação de estruturas metálicas é possível recorrendo à utilização dos aços inoxidáveis. Estas estruturas possibilitam a reciclagem e a reutilização dos materiais.

No presente, o impacto ambiental é um tema que está em todos os setores e a procura de soluções que permitam a sua redução é constante. Neste contexto, as estruturas metálicas apresentam, relativamente a outras estruturas, uma resposta mais viável. No projeto destas é necessário adotar estratégias com o propósito de prolongar a sua durabilidade, minimizar a quantidade de materiais usados, recorrer ao uso de energias renováveis e a processos mais eficientes [24].

2.2.1 Projeto de estruturas exteriores

O recurso às estruturas metálicas exteriores é comum quando se requer uma construção mais económica. Tal é vantajoso porque os componentes estruturais estão de tal forma padronizados, que o mercado apresenta disponibilidade e variedade de diferentes formatos de perfis. Estas construções apresentam um período menor de montagem, assim como um peso inferior ao das estruturas de betão [25].

As estruturas exteriores são construções comuns no quotidiano, presentes em fábricas, armazéns, pavilhões de desporto, pontes, entre outras construções [26]. São constituídas principalmente por pilares, vigas e acessórios de ligação e de reforço. Na Figura 9, pode observar-se a construção de um edifício com recurso a estruturas metálicas.



Figura 9: Construção de um edifício recorrendo a uma estrutura metálica [27].

O dimensionamento dos constituintes da estrutura depende das cargas e dos carregamentos a que a estrutura está sujeita. Normalmente, uma estrutura exterior está sujeita a forças devido ao seu peso próprio, assim como a cargas externas ou aplicações da estrutura. As cargas externas podem ter origem nas condições ambientais (vento

e/ou neve). Já a nível da aplicação de um projeto como, por exemplo, num escritório, é necessário contabilizar o peso de todo o recheio e ocupantes e no caso de uma ponte, o peso dos veículos e dos ocupantes a que a ponte está sujeita [28, 29].

As estruturas metálicas precisam de ações de manutenção mais regulares, com vista a encontrar zonas de corrosão e eliminá-las. Ações de manutenção como a limpeza dos sistemas de drenagem e operações de identificação, e tratamento de zonas com óxido de ferro permitirão o prolongamento do tempo de vida da estrutura [30]. A Figura 10 apresenta a estrutura de um pavilhão onde é necessário executar as operações de manutenção referidas.



Figura 10: Estrutura metálica de um armazém industrial [31].

2.2.2 Projeto de equipamentos fabris

O projeto de estruturas exteriores metálicas possibilita a construção de edifícios e construções de grande porte. No entanto, as estruturas metálicas apresentam também um papel essencial em diversas aplicações na indústria com soluções de menores dimensões.

O desenvolvimento da indústria impulsionou a evolução das técnicas industriais e dos equipamentos industriais, e consequentemente dos processos de produção [32]. Atualmente, os equipamentos industriais apresentam maiores velocidades de produção e processos cada vez mais precisos e complexos. Para tal ocorrer, é necessário que a estrutura onde estes estão montados responda às necessidades impostas pelo equipamento em funcionamento [33].

Na Figura 11 é apresentada uma linha de produção robotizada sob uma estrutura metálica, que deve ser apresentar rigidez suficiente para que os processos executados pelos robôs não sejam afetados.



Figura 11: Estrutura metálica de uma linha de produção robotizada[34].

O projeto das estruturas metálicas de equipamentos industriais requer uma análise metódica das cargas que podem provocar a invalidação da estrutura. Estas falhas podem ocorrer em diversas operações, como no transporte da estrutura ou mesmo durante o período de funcionamento. O projeto deve, assim, ter em conta os aspetos geométricos e os materiais que influenciam o comportamento da estrutura [35]. Só desta forma se permite averiguar o comportamento das estruturas metálicas, analisar se correspondem aos requisitos do projeto e se desempenham a sua função nos padrões de segurança [36].

Os equipamentos de aplicações industriais requerem condições restritas, para que as suas operações ocorram com a precisão prevista. Na resposta a estes requisitos, as estruturas devem apresentar robustez associada a uma solução leve e económica. Para estas estruturas, usualmente, utilizam-se perfis de aço ou de alumínio, pois estes configuram uma montagem simples, robusta e com viabilidade económica. A Figura 12 apresenta uma estrutura metálica construída com perfis de alumínio, pretendendo atingir as vantagens anteriormente referidas.



Figura 12: Estrutura em alumínio de linha de produção [37].

2.2.3 Soluções comuns de projeto

O projeto de estruturas metálicas exteriores e o de estruturas metálicas de equipamentos fabris apresentam a mesma ideologia de projeto soluções e componentes idênticos. É apenas necessário, para cada caso de projeto, adequar o material, o perfil e o tipo de ligação entre componentes.

Nas estruturas metálicas de equipamentos encontram-se algumas soluções onde não se recorre ao uso de perfis como, por exemplo, na área da injeção de plásticos onde se utilizam os moldes. Estes últimos necessitam de suportar as forças exercidas pela prensa no fecho do molde e, ainda, a pressão gerada no processo de injeção [38]. Os moldes são realizados com recurso a bloco de aço que, posteriormente, é maquinado. Após a maquinagem recorre-se à sua análise estrutural, de forma a projetá-los para as condições de serviço.

2.2.3.1 Perfis extrudidos

Os perfis extrudidos para a conceção de uma estrutura metálica apresentam uma vasta diversidade de materiais e formatos. O projeto de estruturas recorre a perfis extrudidos padronizados, assim como aos componentes de ligação entre perfis.

Os principais materiais usados nos projetos referidos anteriormente são as ligas de alumínio e ligas de aço. Cada um destes materiais apresenta as suas vantagens, adequadas aos requisitos do projeto.

Os perfis de liga de alumínio encontram-se muito presentes em estruturas de equipamentos fabris porque apresentam uma boa relação entre as propriedades mecânicas e a sua leveza. Além disso, apresentam uma boa resistência à corrosão que providencia, assim, uma estrutura com uma menor manutenção. Na Figura 13, estão expostos alguns perfis de alumínio de menor complexidade.



Figura 13: Exemplos de perfis de menor complexidade em alumínio [39].

Na Figura 14 encontram-se apresentados alguns exemplos de perfis mais complexos que estão disponíveis nas ligas de alumínio. Estes formatos são possíveis executar devido ao processo de fabrico de extrusão do alumínio.



Figura 14: Exemplo de perfis mais complexos em alumínio [40].

Os perfis extrudidos ou laminados em aço são excelentes na concepção dos diferentes projetos de estruturas metálicas. Estes apresentam uma variedade de formatos disponíveis a baixo custo, devido à sua grande produção. À semelhança dos perfis de alumínio, consegue-se encontrar tanto formatos mais simples como de maior complexidade.

Os perfis em aço são maioritariamente:

- Barras de secção circular, quadrada, retangular e hexagonal;
- Tubos de secções quadrada, retangular e circular;
- Perfis de diversas secções, em formato “C”, “L”, “Z” e “T”;
- Perfis de secção “H” e “I”.

Na Figura 15, encontram-se representados alguns dos perfis referidos.

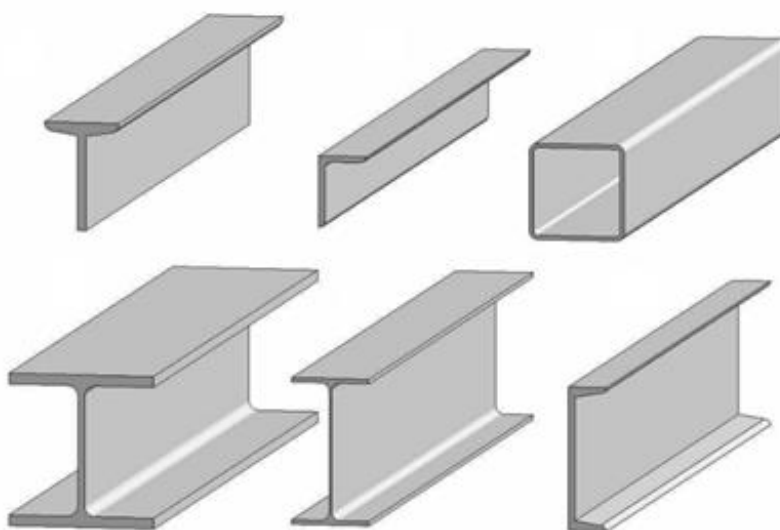


Figura 15: Exemplos de perfis disponíveis em aço (adaptado de [41]).

2.2.4 Ligações soldadas

As estruturas metálicas exteriores tanto como de equipamentos fabris são de possível montagem devido às ligações entre os componentes. As ligações soldadas apresentam inúmeras vantagens quando aplicadas em estruturas metálicas, onde se usam materiais de boa soldabilidade.

O recurso à soldadura como método de ligação permite a união permanente entre dois componentes, com elevada resistência mecânica, conseguindo-se obter um componente contínuo, mesmo em geometrias mais complexas. Após a execução deste processo de união, é necessário realizar uma inspeção na perspectiva de validar a integridade da mesma, maioritariamente, com recurso a técnicas de inspeção não destrutivas. As ligações soldadas apresentam uma resposta económica muito atrativa para o projeto de estruturas [42].

2.2.5 Ligações aparafusadas

O uso de ligações aparafusadas é comum na conceção de estruturas e apresentam algumas vantagens que não estão presentes em ligações soldadas.

As ligações aparafusadas são ligações amovíveis, e vantajosas, pois permitem o transporte de estruturas de maiores dimensões em componentes de menores dimensões. A aplicação de ligações aparafusadas na montagem de uma estrutura em condições de trabalho menos favoráveis, permite ao operador executar uma ligação concêntrica entre dois componentes, ou seja, com um alinhamento perfeito entre eles.

A seleção dos parafusos a utilizar numa ligação, é feita com base nas tensões de resistência à tração e de corte a que o parafuso está sujeito. Na Tabela 2, apresentam-se as classes dos parafusos e as respetivas tensões a que estes se encontram sujeitos.

Tabela 2: Valores nominais de tensão de cedência, f_{yb} , e da tensão de rotura à tração f_{ub} , para parafusos (adaptado de [43]).

Classe do parafuso	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

A Figura 16 apresenta três tipos de ligações aparafusadas mais recorrentes.

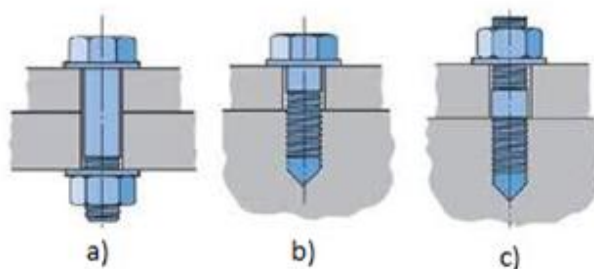


Figura 16: Tipos de ligações aparafusadas: a) parafuso-porca, b) parafuso-rosca e c) perne-rosca (adaptado de [44]).

2.2.6 Outros tipos de ligações

No projeto de estruturas metálicas, as ligações mais comuns são as ligações soldadas e aparafusadas, no entanto, é possível encontrar ligações adesivas e rebitadas.

As ligações adesivas permitem a união entre componentes do mesmo material ou mesmo de materiais diferentes, dependem do tipo de adesivo utilizado. Nas ligações adesivas encontram-se disponíveis ligações de rápida execução e ligações geometricamente mais complexas. O adesivo pode apresentar características de vedação em algumas das aplicações [22].

As ligações rebitadas são uma solução muito competitiva em relação aos parafusos, pois são mais económicas e o processo de ligação é mais rápido de executar [22]. Em contrapartida, os parafusos permitem o processo de desmontagem sem a destruição destes. Já numa ligação rebitada, para a desmontagem dos componentes é necessário remover os rebites, e posteriormente aplicar rebites novos.

O recurso a uma ligação mista, adesiva e rebitada, apresenta algumas vantagens. Existe uma melhor resistência mecânica, maior resistência à fadiga e maior rigidez, sendo que o processo de rotura apenas ocorre quando há rotura conjunta do adesivo e do rebite [45].

2.2.7 Normalização no projeto de estruturas metálicas

A verificação do projeto e do seu desempenho para uma determinada função deve ser executada através de normas, que disponibilizam ao utilizador obter auxílio para o desenvolvimento de um produto.

Nos últimos anos, as normas têm adquirido um papel importante no projeto de estruturas, sendo alvo de constantes atualizações. A normalização veio permitir que os projetos mecânicos garantam valores de qualidade, segurança, uniformização de técnicas e métodos de desenvolvimento de produtos [46, 47].

Os Eurocódigos (EC) auxiliam o projeto e podem ser divididos em duas vertentes: numa primeira vertente, a análise estrutural, na qual se verificam os esforços internos, os momentos fletores e torsores a que a estrutura irá estar sujeita; e, numa segunda

vertente a análise e o dimensionamento da estrutura e das ligações [48]. Relativamente ao projeto de estruturas, o Eurocódigo disponibiliza as seguintes normas [49]:

- EN 1990 Eurocódigo: base de projeto;
- EN 1991 Eurocódigo 1: ações em estruturas;
- EN 1992 Eurocódigo 2: projeto de estruturas de betão;
- EN 1993 Eurocódigo 3: projeto de estruturas de aço;
- EN 1994 Eurocódigo 4: projeto de estruturas mistas aço-betão;
- EN 1995 Eurocódigo 5: projeto de estruturas de madeira;
- EN 1996 Eurocódigo 6: projeto de estruturas de alvenaria;
- EN 1997 Eurocódigo 7: projeto geotécnico;
- EN 1998 Eurocódigo 8: projeto de estruturas resistentes aos sismos;
- EN 1999 Eurocódigo 9: projeto de estruturas de alumínio.

No desenvolvimento de uma estrutura metálica é necessário recorrer à norma EN 1993 EC3, com o propósito de adotar regras e métodos de dimensionamento [49]. O EC 3 aplica-se no projeto de estruturas de aço e está dividido em partes, sendo que cada uma delas permite ao utilizador dimensionar os membros da estrutura com um excelente grau de confiança.

Para o projeto de estruturas metálicas encontram-se disponíveis outras normas. No caso do projeto de estruturas metálicas exteriores é apresentado pelo Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações (MOPTC) o regulamento de estruturas de aço para edifícios (REAE) [50].

O REAE aborda todos os pontos necessários no projeto de estruturas metálicas de edifícios: materiais, perfis, ligações, espessuras mínimas da estrutura, reforços (contraventos), ligações (aparafusadas, soldadas e rebitadas), critérios para verificação da segurança da estrutura e das ligações, regras de montagem e periodicidade das manutenções [50].

O Instituto Americano de Construções em Aço (*American Institute of Steel Construction* ou AISC) disponibiliza, a norma ANSI/AISC 360-16 que contém as especificações para realizar todo o processo de projeto de edifícios em aço estrutural; a norma ANSI/AISC 341 que permite o projeto de edifícios em aço estrutural para provisões sísmicas, e a norma ANSI/AISC 358 para a elaboração de projetos de ligações nas estruturas sujeitas a atividades sísmicas, entre outras normas [51].

2.2.8 Materiais utilizados

No projeto mecânico, uma das fases vitais é a seleção dos materiais que pode ser limitada pelos pré-requisitos do projeto. O projetista responsável pelo desenvolvimento deste tem de verificar os materiais que mais se adequam ao projeto e, posteriormente, selecionar o material com as melhores propriedades em conformidade com os

requisitos. Os aços encontram-se divididos conforme as suas aplicações, e cada um apresenta uma letra que permite diferenciar as suas classes:

- Aço para reforço de betão (B);
- Aço para chapas ou conformação a frio (D);
- Aço de construções mecânicas (E);
- Aço de alta resistência (H);
- Aço estrutural (S);
- Aço usado em aplicações de pré-tensão (Y).

No dimensionamento de uma estrutura, geralmente procura-se um material com bom desempenho nas seguintes propriedades: excelente resistência mecânica, boa ductilidade, boa soldabilidade e baixo custo. Contudo, perante os parâmetros do projeto poderá haver propriedades de maior importância do que as referidas anteriormente [52].

Os aços estruturais têm uma grande aplicabilidade nas estruturas visto que apresentam elevada rigidez permitindo reduzir a flexão da estrutura, uma boa resistência mecânica, que leva a um dimensionamento da estrutura para carregamentos mais elevados e a baixo custo. Na Tabela 3, encontram-se alguns dos aços estruturais disponíveis, assim como os respetivos valores de tensão [53].

Tabela 3: Valores nominais de tensão de cedência f_y e da tensão última à tração f_u para aços estruturais (adaptado de [54]).

Norma e classe de aço	Espessura nominal t do componente da secção [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470
S 450	440	550	410	550

No projeto de estruturas metálicas podem encontrar-se outras soluções para além dos aços. É o caso das ligas de alumínio que oferecem um conjunto de propriedades de especial interesse como, por exemplo: baixa massa volúmica, elevada resistência mecânica e resistência à corrosão. Além disso, devido à fácil extrusão conseguem obter-se diversos perfis [55].

As estruturas metálicas realizadas em alumínio, comparativamente às estruturas em aço, permitem obter uma estrutura significativamente mais leve (cerca de um terço) a baixo custo e sem necessidade de uma manutenção tão regular e minuciosa [55].

O ferro fundido está disponível em diversas ligas utilizadas no projeto de estruturas metálicas quando se procura um material com boa resistência mecânica, boa maquinabilidade e resistência térmica [56].

2.2.9 Processos de fabrico

Os processos de fabrico são um conjunto de etapas que possibilitam a transformação de matéria-prima num produto final [57]. O processo de fabrico é composto por três fases:

- Recolha de matéria-prima;
- Processo primário (primeira transformação da matéria-prima);
- Produção da peça final (pode estar associada a vários processos de fabrico) [58].

Na transformação da matéria-prima ou produto inicial, alguns dos processos disponíveis passam pela fundição, processamento de plásticos, deformação plástica, técnicas de corte, maquinagem e processos de união [57].

A otimização dos processos de fabrico é um aspeto relevante na adequação do processo à geometria ou ao material da peça e na produção de determinado número de peças, com o intuito de promover processos mais eficientes e de menor impacto ambiental [58]. Na Tabela 4 é apresentada uma breve descrição dos processos de fabrico.

Tabela 4: Descrição dos processos de fabrico [57, 59].

Processo de Fabrico	Descrição
Fundição	Processo que permite a obtenção de peças por vazamento de materiais metálicos em estado líquido, num molde, possibilitando obter peças de geometrias complexas e de elevada rentabilidade em grandes produções.
Processamento de plásticos	Na produção de produtos em plástico, o processo mais recorrente é a injeção de polímeros em moldes que permite obter peças de geometrias complexas com uma elevada precisão e uma elevada cadência de produção, tornando-o muito rentável em grande escala.

Deformação plástica	Os processos que permitem a obtenção de componentes por deformação plástica, são: laminagem, forjamento, corte, puncionamento, extrusão, quinagem e embutidura. São processos muito rentáveis para produção em larga escala.
Maquinagem	Este processo permite a obtenção de componentes nas mais diversas geometrias por arranque de aparas. Encontram-se disponíveis diversas operações como o torneamento, a fresagem, a retificação, a maquinagem a laser e a eletroerosão com fio. A estes processos estão associados custos elevados.
Processos de ligação	Processo que permite a união entre componentes, viabilizando a obtenção de estruturas complexas e a baixo custo. Nesta área encontram-se as ligações soldadas, aparafusadas, rebitadas e adesivas.

Na produção de uma estrutura metálica recorre-se a produtos finais como os perfis extrudidos. No entanto, estas estruturas são alvo de diferentes processos de fabrico como, o corte, a perfuração, os processos de união e de revestimento da superfície contra a corrosão. Após estas operações, a estrutura é sujeita a uma inspeção para localizar eventuais imperfeições e, numa fase final é realizado um controlo de qualidade [28].

2.3 Dimensionamento de estruturas metálicas

O dimensionamento de estruturas metálicas contempla um conjunto de processos focados em determinar os cenários mais desfavoráveis para as estruturas, que permitirá efetuar uma análise para determinar as tensões, os deslocamentos ou outros dados relevantes para o projeto.

No projeto de estruturas metálicas, é necessário conhecer as tensões impostas na estrutura, para adequar-se o dimensionamento e/ou redimensionamento. No processo de redimensionamento pode-se recorrer a um aumento ou redução das dimensões do perfil da estrutura, ou mesmo dimensionar alguns dos elementos da estrutura. O processo de otimização das estruturas metálicas ocorre quando se faz uma alteração à estrutura inicial, no sentido de melhorar o seu desempenho. Na otimização de uma estrutura, pode ser inserido um elemento de reforço na perspetiva de reduzir as suas tensões e/ou deslocamentos nessa zona, ou pode ser alterada a sua geometria.

A estrutura metálica pode ser dimensionada com recurso a normas, utilizando métodos simplificados, tabelados ou métodos numéricos (MEF).

2.3.1 Ferramentas de dimensionamento

Os projetistas encontram disponíveis várias ferramentas que permitem a análise de diferentes opções de dimensionamento, apoiando a tomada de decisões e a otimização das estruturas.

Primeiro, no dimensionamento de estrutura, executa-se uma análise prévia com o objetivo de localizar as zonas críticas. Após esta análise, recorre-se aos critérios de resistência para impor um limite de tensão ou deformação para os pontos críticos. Caso um dos pontos críticos da estrutura ultrapasse o limite imposto pelos critérios é necessário efetuar o redimensionamento.

Os critérios de resistência mais frequentes no dimensionamento são [60]:

- Critério de Tresca: verifica se a tensão tangencial máxima do ponto crítico ultrapassa a tensão tangencial máxima prevista para um provete num ensaio à tração, na iminência de rotura. No caso de o valor da tensão tangencial máxima do ponto em estudo ser superior ao do provete, deve-se redimensionar a estrutura;
- Critério de von Mises: compara a energia específica de distorção do ponto em estudo, e se esta for superior à energia de distorção de um provete no ensaio à tração no instante de cedência, é necessário executar o redimensionamento.

Para além dos critérios referidos anteriormente, pode recorrer-se às normas estipuladas para o projeto de estruturas metálicas. As normas estabelecem parâmetros e critérios que possibilitam o dimensionamento de estruturas metálicas para contemplar os requisitos do projeto. As normas específicas para cada estrutura estabelecem limites e processos, para que os projetistas, ao desenvolverem a estrutura, consigam obter a solução mais adequada conforme os requisitos de projeto.

Para o dimensionamento de estruturas metálicas, pode investir-se em métodos empíricos, que se apoiam/baseiam na recolha de informações de estruturas projetadas anteriormente ou na recolha de dados de casos de estudo efetuados [61]. A utilização deste método requer especial atenção, pois tem de ser uma tomada de decisões racional, fundamentada e muitas vezes com base na experiência. No dimensionamento de estruturas encontram-se disponíveis ainda ferramentas numéricas, como o MEF, abordado no capítulo seguinte. O MEF com o recurso à aplicação dos critérios possibilita a obtenção dos campos de tensões e deslocamentos.

2.3.2 Método de Elementos Finitos (MEF)

Na área da engenharia, a procura pela verificação e validação de projetos é importante para dar resposta a um correto dimensionamento da estrutura e componentes em projeto. Com esta finalidade, o MEF é um método que permite executar uma simulação muito próxima da real.

O recurso a ferramentas matemáticas e a critérios de dimensionamento, por vezes, não permitem o dimensionamento mais adequado para projetos de origem mais complexa. Neste contexto, o MEF é uma ferramenta que, aliada ao dimensionamento por critérios de resistência, permitirá encontrar uma solução mais adequada à problemática [62].

O MEF é utilizado em diversas áreas da Engenharia e é aplicado em diversos contextos de análise e projeto, tais como [62]:

- Estruturas de Engenharia Civil;
- Estruturas de Engenharia Aeronáutica;
- Estudos térmicos e transferência de calor;
- Estudo de operações em contexto de Engenharia Geotécnica;
- Análise dos recursos hídricos;
- Estudo de reservatórios submetidos a pressão e temperaturas;
- Projeto de componentes mecânicos;
- Projeto de próteses e outros componentes da Engenharia Biomédica;
- Estudo de sistemas de elétricos e eletromagnéticos.

2.3.2.1 Caracterização geral

O MEF é baseado na criação de uma malha de elementos finitos, constituída por nós e elementos para uma determinada geometria. A correta seleção do elemento de malha é um fator relevante para alcançar uma solução aproximada da exata [63].

O MEF permite o cálculo das tensões para os nós dos elementos. A refinação da malha é o processo de diminuição do tamanho do elemento de malha, que por consequência conduz a um aumento do número de nós e de elementos. A utilização de uma malha mais refinada permite uma melhor cobertura de toda a geometria e as suas irregularidades, como apresentado na Figura 17.

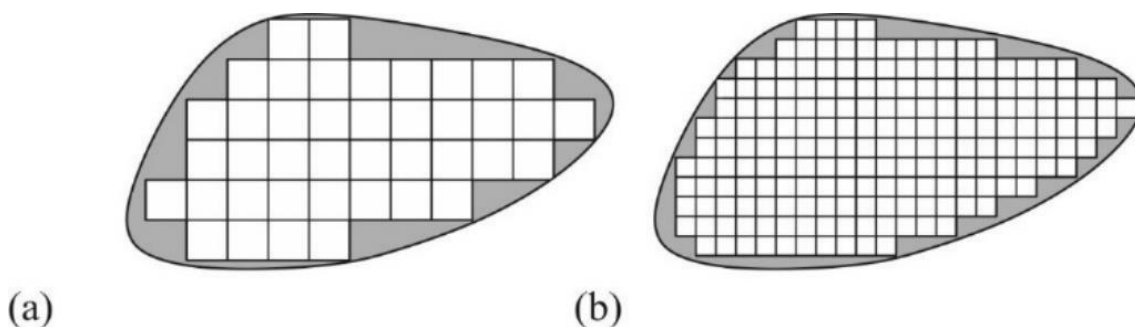


Figura 17: Comparação entre malhas a) grosseira (41 elementos) e b) refinada (192 elementos) [63].

O principal objetivo de uma análise de MEF aplicada a uma estrutura é a obtenção dos valores de tensões e deslocamentos, e é constituída por 3 fases [63]:

- Pré-processamento: processo de seleção do elemento de malha mais adequado para a modelação do problema, que permitirá a obtenção de uma solução mais

próxima da exata. Na Figura 18 são apresentados alguns dos elementos mais comuns;

- Obtenção da solução: o *software* gera o sistema de equações globais, a partir das matrizes rigidez de cada elemento da malha;
- Pós-processamento: após a obtenção de resultados, é necessário analisar e avaliar se estes correspondem aos previstos.

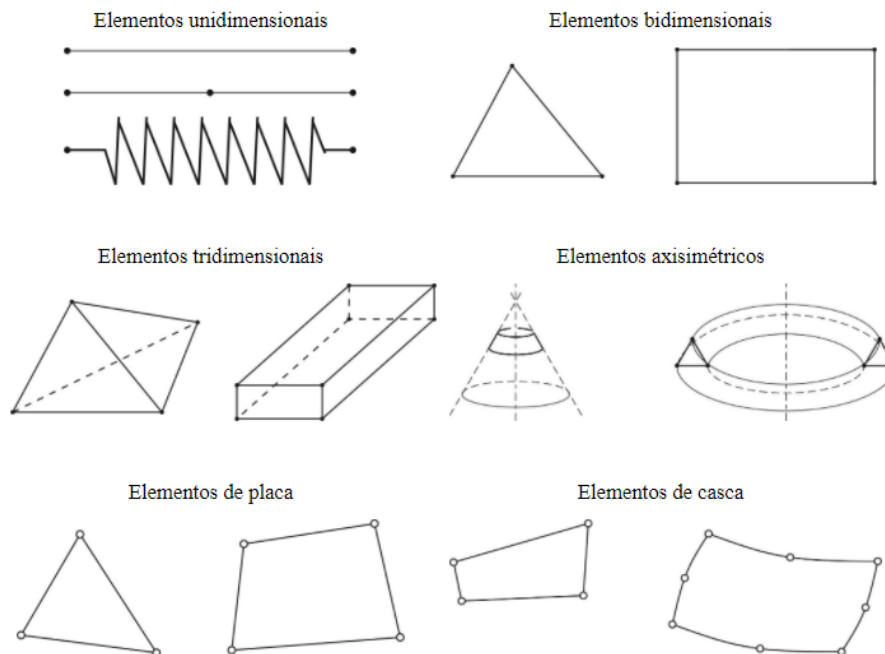


Figura 18: Elementos mais comuns nos estudos estruturais [63].

O MEF, aplicado nos mais diversos problemas, fornece ao utilizador inúmeras vantagens [64]:

- Facilidade de obtenção dos resultados para geometrias irregulares e complexas;
- Inserção de diferentes esforços;
- Estudo de estruturas que apresentam diferentes materiais na sua constituição;
- Inserção de diversas condições fronteira;
- Facilidade na alteração dos parâmetros do estudo;
- Estudo de cargas dinâmicas;
- Estudo do comportamento de estruturas para materiais não lineares.

2.3.2.2 Fundamentos do método

O MEF permite o estudo tanto de geometrias mais simples como de maior complexidade. Para cada uma destas geometrias, a resolução passa pela escolha dos elementos que mais se adequam ao caso em estudo.

A discretização permite realizar a divisão em elementos da zona em estudo, sendo associado um nó a cada vértice do elemento [64]. Após a discretização, a próxima etapa

é a análise e estudo de cada elemento, com intuito de obter a matriz de rigidez do elemento (k_e).

De modo geral, a análise de uma estrutura é iniciada pela seleção do formato do elemento. Estes elementos são constituídos por nós e cada nó é caracterizado pelas suas coordenadas (x, y, z), os seus componentes de espaço (u, v, w) e pelas forças nodais, como apresentado na Figura 19.

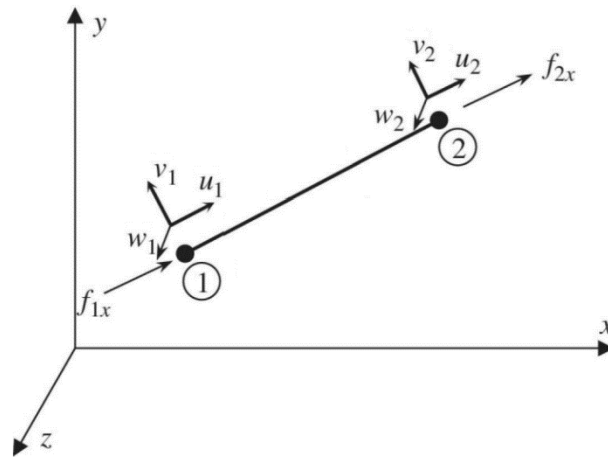


Figura 19: Exemplo de um sistema de coordenadas e componentes de espaço de um elemento barra tridimensional de 2 nós (adaptado de [65]).

De acordo com Campilho [63], a Equação (1) obtém-se a matriz rigidez do elemento (k_e) calculada em função do integral de domínio V (volume do elemento de malha) da matriz transposta de deformação (B), pelo produto da matriz de elasticidade (D) e da matriz de deformação (B)

$$k_e = \int_V B^T D B dv. \quad (1)$$

Após a obtenção das matrizes rigidez dos elementos da estrutura e a transformação para coordenadas globais, realiza-se a construção da matriz de rigidez global (K).

Através da Equação (2) verifica-se a multiplicação da matriz de rigidez global (K) com o vetor global das variáveis de campo (A), igual à soma do vetor global das reações (R) com o vetor global das forças nodais (F) da estrutura

$$KA = R + F. \quad (2)$$

O MEF, com a obtenção da Equação (2), permite ao *software* a apresentação dos resultados da estrutura disponibilizando, entre outros, os dados de tensões, deslocamentos, deformações e coeficientes de segurança.

2.3.2.3 *Softwares utilizados*

O MEF é uma ferramenta com grande aplicabilidade em diversas áreas da engenharia e permite o desenvolvimento de inúmeros projetos. A sua utilização é cada vez mais recorrente e, como tal, são apresentados no mercado diversos *softwares*, tais como: *Ansys*®, *Solidworks*®, *Abaqus*®, *Inventor*®, entre outros [63]. Estes *softwares* contêm diversos estudos que permitem a simulação de vários projetos desde os mecânicos aos térmicos.

Nos últimos anos, a utilização destes *softwares*, como ferramenta de projeto, tem sido cada vez mais comum. Estes estão em constante melhoria com objetivo de obter soluções mais precisas e mais rápidas. Alguns destes *softwares* não só possibilitam o projeto com recurso a elementos finitos como também apresentam ferramentas de modelação.

Estes *softwares*, como ferramentas computacionais, disponibilizam diversas utilidades no desenvolvimento do projeto, sendo elas:

- Desenvolvimento do modelo;
- Montagem de um conjunto de elementos e restrição de movimentos;
- Estudo do componente ou conjunto por elementos finitos;
- Atribuição do material;
- Inserção das condições fronteira;
- Seleção de ligações entre componentes;
- Inserção das cargas e esforços;
- Definição de malha e das suas propriedades;
- Simulação do estudo;
- Exibição dos resultados.

Os *softwares* de elementos finitos possibilitam ao utilizador efetuar uma análise do projeto relativa ao comportamento do objeto em estudo, face às condições de carregamento a que está sujeito. Os *softwares* permitem a visualização da faixa dos valores de tensões, deslocamentos e entre outras propriedades que possibilitam assim averiguar pontos de melhoria no objeto em estudo.

A análise estática permite estudar o comportamento da estrutura ou componente proveniente de esforços constantes. Esta análise possibilita a determinação das diferentes zonas de tensões na estrutura em estudo e permite, ainda, prever os pontos de concentração de tensões e de deslocamentos, como exemplificado na Figura 20. O fator de segurança é calculado a partir da tensão de cedência do material sobre as tensões previstas ao longo da estrutura. Através dos *softwares*, é possível a visualização de um espectro que espelha os fatores de segurança, permitindo verificar as zonas onde ocorre o colapso da estrutura, assim como, a verificação de zonas onde o fator de segurança é baixo [63, 66].

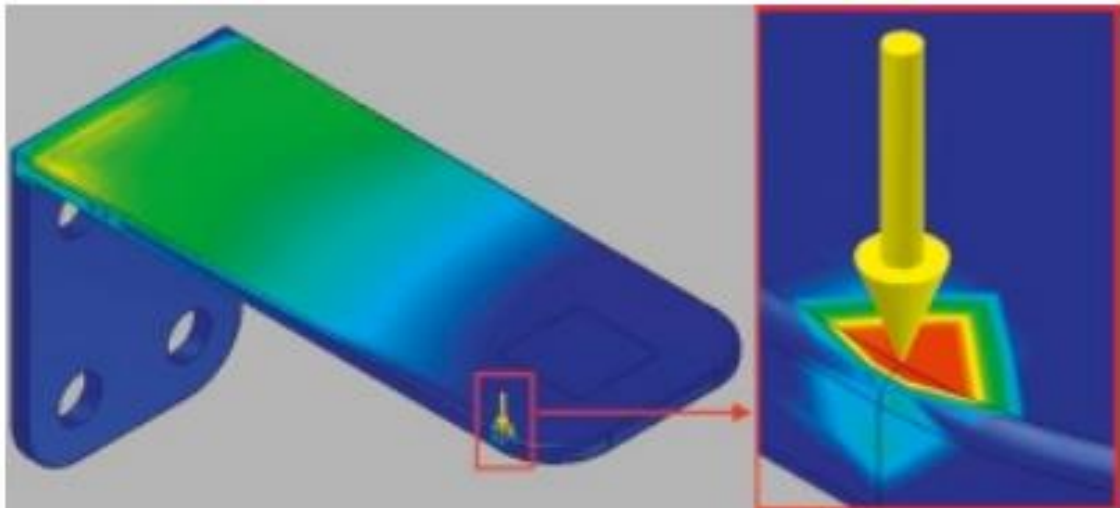


Figura 20: Exemplo de um ponto de concentração de tensões [66].

A análise nodal permite verificar os modos naturais de vibração impostos pela geometria, pelo peso e pelas restrições da estrutura e, a partir dos seus resultados, conseguem-se distinguir as frequências naturais da estrutura das vibrações impostas pelos componentes em funcionamento [66]. O recurso a este estudo permite a otimização da estrutura, na perspetiva de minimizar as suas vibrações quando se encontra em funcionamento, evitando assim o colapso [63].

Os *softwares* disponibilizam estudos dinâmicos que permitem uma análise do comportamento e das tensões quando as estruturas estão sujeitas a cargas dinâmicas e/ou acelerações [63].

2.3.3 Estado-da-arte no dimensionamento de estruturas

Ao longo dos últimos anos, o MEF tem sido alvo de melhorias, tornando-se uma ferramenta interessante para a área da engenharia. Este método demonstra-se como uma ferramenta versátil e competente no desenvolvimento de projetos. Este associado aos fundamentos de dimensionamento das diferentes vertentes da engenharia que possibilita desenvolver diversos projetos.

O objetivo deste é fornecer resultados que possibilitem aos projetistas o dimensionamento e a melhoria do produto final. Na Tabela 5 são apresentados alguns estudos que demonstram a importância do MEF no desenvolvimento de um produto ou solução.

Tabela 5: Estado de arte no projeto com recurso ao MEF.

Referências Bibliográficas	Descrição do Trabalho
Kushwah, et al. [67]	O objetivo deste trabalho é a otimização da mola de um sistema de suspensão de um veículo ligeiro, com recurso aos métodos analíticos e dos elementos finitos. Neste trabalho, optou-se pelo uso de um elemento de malha tetraédrico e a introdução de diferentes materiais. Conclui-se que a substituição do material para ASTM A-228 permite obter um melhor compromisso económico e fornecer melhor desempenho para a lotação máxima do veículo.
Gautam, et al. [68]	O artigo apresenta o estudo e otimização de um <i>chassi</i> de um carro de fórmula 1, através da utilização do <i>software</i> de MEF executou-se a análise do seu impacto e de torsão a que o carro está sujeito durante as curvas. Verificou-se que o AISI 1020 é um material adequado para ser empregue no <i>chassi</i> de um carro de fórmula 1. Após o estudo, verificou-se que a utilização deste material permite o desenvolvimento de um <i>chassi</i> mais resistente e mais leve, que melhora tanto a segurança do carro, como o seu desempenho.
Nandhakumar, et al. [69]	Este estudo pretende otimizar o <i>chassi</i> de um autocarro elétrico, diminuindo o seu peso, com recurso a um <i>software</i> de simulação baseado no MEF. Foram aplicadas ligas de alumínio em detrimento do aço estrutural utilizado nestas estruturas, permitindo uma redução de cerca de 60% do peso da estrutura inicial, e responde às necessidades estruturais. Esta substituição favorece a eficiência do veículo.
Santos, et al. [70]	Neste artigo foi desenvolvido um equipamento para a indústria têxtil, recorrendo-se à utilização do MEF para o estudo da estrutura recorrendo aos elementos viga, visto que a estrutura apresenta perfis esbeltos. Esta necessita de ser robusta na medida de possibilitar o processo de fabrico de acessórios têxteis com a devida precisão. Como resultado foi apresentada uma estrutura 30% mais leve que a inicial.

Benabdelaziz, et al.
[71]

O trabalho pretende desenvolver um modelo que permita o arrefecimento de uma bateria de um veículo elétrico. Este estudo recorreu ao MEF para simular a transferência de calor da bateria para os canais de refrigeração. Face à necessidade de baixar a temperatura da bateria, simularam-se vários padrões de canais de refrigeração até ser apresentado o padrão com a maior eficiência de refrigeração e uma distribuição de temperatura mais uniforme na bateria.

Zhang, et al. [72]

Neste artigo analisou-se o desempenho do conjunto permutador-ventilador numa central de refrigeração de CO₂. Utilizou-se o MEF para executar um estudo da transferência de calor, na qual, foram aplicados elementos de malha hexaédricos. Concluindo desta forma, em condições de velocidade constante obtém-se um melhor desempenho do permutador de calor e, consequentemente, o aumento eficiência da central.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Caracterização da empresa
- 3.2 Objetivos do projeto
- 3.3 Requisitos de projeto
- 3.4 Soluções idênticas disponíveis
- 3.5 Anteprojeto da estrutura
- 3.6 Projeto da estrutura
- 3.7 Desenhos de pormenor
- 3.8 Materiais
- 3.9 Processos de fabrico
- 3.10 Análise económica

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Caracterização da empresa

A RACE é uma empresa dedicada aos setores de refrigeração e climatização que, maioritariamente, oferece os seus produtos e serviços para o mercado nacional. Esta empresa encontra-se sediada em Guifões e foi fundada em 1985 com o nome de Selfrio, SA, com o objetivo de prestar serviços de assistência técnica, conceção, fabrico e construção de instalações de refrigeração. Em 1992, é criada a empresa Sistavac, SA, direcionada para instalações de ar condicionado. No ano 2014, ocorre a fusão entre a Selfrio e a Sistavac, passando a empresa a designar-se Sistavac, SA. Em 2017, há um *rebranding* da denominação da empresa para RACE, SA. Na Figura 21, está representada a evolução da empresa até à atualidade. A RACE representa uma experiência com mais de 35 anos de projeto e fabrico de instalações de refrigeração assim como sistemas de climatização.



Figura 21: Evolução da empresa ao longo da sua história.

Com o objetivo de alcançar todo o mercado nacional e de prestar os serviços com a maior eficácia e eficiência, para além do pessoal sediado em Guifões e dos escritórios em Sacavém, dispõe ao longo de todo o território continental, subsidiárias disponíveis 24 horas por dia, que realizam serviços de manutenção a todas as instalações a encargo pela empresa. Para além do mercado nacional a empresa desenvolve também projetos para o mercado internacional, nomeadamente para o Brasil, Roménia e entre outros.

Os trabalhos realizados pela empresa estão vocacionados para oferecerem aos seus clientes projetos personalizados, ou seja, adequado às suas necessidades com uma solução inovadora, competitiva, sustentável conforme as normas de segurança e qualidade. A empresa, ao longo da sua história, tem desenvolvido projetos aplicados às mais diversas instalações tais como, indústrias de carnes, indústrias de bebidas,

superfícies comerciais (minis mercados, supermercados e hipermercados), centros comerciais, hospitais, hotéis, entre outras instalações.

A RACE oferece aos seus clientes uma vasta gama de produtos nas suas áreas de projeto tais como, refrigeração, AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), eficiência energética, produção e pós-venda, como apresentado na Figura 22.



Figura 22: Principais produtos desenvolvidos pela empresa (adaptado de [73]).

A empresa, na área da refrigeração projeta, produz e instala os mais diversos sistemas de refrigeração. Na área do AVAC, é oferecida uma vasta experiência nas mais variadas instalações, aplicadas nos diversos espaços. Na eficiência energética, é oferecido um serviço com o intuito de desenvolver a melhor solução para a climatização e automação de edifícios. A produção é responsável pela parte técnica do fabrico e da montagem dos diversos sistemas. Por último, no setor de pós-venda é realizado todo o acompanhamento das instalações, disponibilizando serviços de manutenção e assistência técnica.

A RACE apresenta mais de 35 anos de experiência e mais de 5000 instalações realizadas. Ao longo de todo o território nacional emprega cerca de 300 colaboradores e apresenta 3.950.000,00€ de capital social.

3.2 Objetivos do projeto

A indústria da refrigeração tem sido alvo de evolução com o objetivo de minimizar o impacto ambiental. Assim, as empresas recorrem às mais recentes tecnologias disponíveis, como as centrais frigoríficas a funcionar com CO₂ como fluido frigorigéneo.

Na Figura 23 encontra-se a central frigorífica a funcionar com CO₂ desenvolvida pela empresa. Este modelo apresentado é a estrutura a desenvolver e a otimizar ao longo desta tese. Encontram-se ainda numerados na Figura 23, os principais equipamentos de uma instalação deste tipo, tais como quadro elétrico (1), compressor em paralelo (2), compressores média temperatura (MT) (3), compressores baixa temperatura (BT) (4), depósito de líquido (5), depósito de óleo (6), grupo de emergência (7), permutadores de águas quentes sanitárias (AQS) e do compressor em paralelo (8) e, por último, o separador de óleo que não está representado na Figura 23 mas encontra-se a atrás do depósito de óleo na orientação em que se encontra a figura.

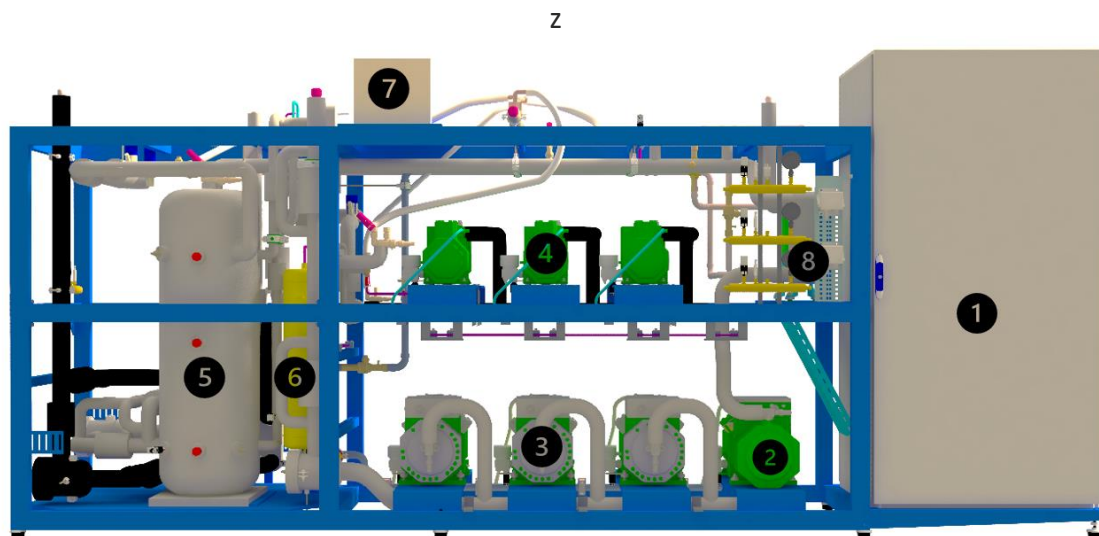


Figura 23: Central frigorífica a operar com CO₂ desenvolvida pela empresa.

A empresa produziu a sua primeira central frigorífica com CO₂ como fluido de trabalho em regime transcrito e encontra-se em funcionamento desde julho do ano passado. A estrutura introduzida na central foi projetada pela empresa com base nos conhecimentos de realização de estruturas para outras centrais. Devido a esta estrutura apresentar uma solução diferente das anteriormente desenvolvidas pela empresa, constatou-se que em alguns pontos não foram alcançados os resultados esperados.

Esta estrutura desempenha a sua função com êxito, mas não cumpriu a sua função com distinção. A título de exemplo, o quadro elétrico foi introduzido numa base que foi posteriormente soldada à estrutura e que durante o transporte demonstrou alguma instabilidade outro aspeto menos positivo foi a massa da solução final.

O projeto a desenvolver visa a otimização e estudo de uma estrutura metálica a aplicar nas centrais frigoríficas a funcionar com CO₂, com vista à certificação do produto. A estrutura aplicada anteriormente apresentou algumas limitações estruturais, como no seu manuseio e transporte. Assim, a empresa decidiu desenvolver uma estrutura que apresente melhorias não só a nível estrutural, mas também a nível da disposição de alguns componentes.

O processo de otimização da estrutura a projetar nasce com base numa pesquisa de algumas soluções empregues pela empresa e por fabricantes concorrentes, é objeto de estudo inicial e posteriormente destacam-se possíveis pontos de melhoria. Após esta análise é elaborado um plano de melhorias que será apresentado para discussão.

De modo a avaliar o desempenho da estrutura inicial, são realizados 2 estudos estáticos: um para analisar a estrutura depois de aplicada no local da instalação; e outro para averiguar o seu comportamento durante as ações de transporte e manuseio. É, ainda, realizado um estudo modal que permita averiguar as frequência e modos naturais de vibração da estrutura.

Após a delineação das alterações que eventualmente teriam de ser efetuadas, é necessário fazer uma avaliação e seleção das alterações mais promissoras. Estas serão avaliadas consoante as melhorias que oferecerem para a estrutura, sem comprometer a instalação e os componentes da central frigorífica.

O objetivo deste projeto é oferecer uma solução que se adeque aos parâmetros impostos para empresa, com uma solução final inovadora. A solução final deve, principalmente, apresentar melhorias a nível estrutural da central frigorífica, validando a sua segurança.

3.3 Requisitos de projeto

O projeto a desenvolver apresenta alguns aspetos relevantes que não podem ser ignorados. Estes requisitos permitem assim desenvolver a estrutura mais adequada para a aplicação desejada. Os requisitos a considerar no projeto da estrutura são:

- Estrutura resistente e rígida com o compromisso de uma solução leve;
- Solução económica;
- Estrutura que permita aos técnicos aceder aos componentes mais afastados da periferia da estrutura;
- A estrutura deve apresentar suportes e meios de fixação para as tubagens e válvulas, minimizando assim as folgas entre os componentes, evitando fugas, vibrações ou fissuras nas tubagens. Uma anomalia nas tubagens pode provocar a libertação do CO₂ para o meio envolvente e atingir altas concentrações, num espaço fechado, e eventualmente causar asfixia aos ocupantes;
- A construção da estrutura deve recorrer a perfis de tubo quadrado ou retangular, pois estes facilitam todo o processo de montagem e um correto posicionamento dos tubos entre si;
- Estrutura padronizada para uma gama de potência;
- A montagem da estrutura deve ser efetuada pelos principais processos de fabrico, de modo a agilizar o processo de montagem da estrutura e por consequente da central frigorífica;
- A estrutura tem de conseguir suportar os seguintes equipamentos: 3 compressores de MT (3×190 kg), 3 compressores de BT (3×50 kg), 1 compressor em paralelo (215 kg), 1 depósito de líquido de 150 litros (200 kg), quadro elétrico (350 kg), 1 depósito de óleo (28 kg) e 1 separador de óleo (47 kg);
- Recorrer aos aços como material a aplicar na estrutura;
- No local de instalação, a estrutura não pode apresentar um deslocamento superior a 2 mm;
- O fator de segurança da estrutura final tem que ser superior a 2, quando esta se encontra no local de instalação.

3.4 Soluções idênticas disponíveis

No desenvolvimento deste projeto, com o compromisso de obter os melhores resultados perante os requisitos de projeto, foi realizada uma pesquisa referente a algumas soluções disponibilizadas no mercado. Neste capítulo são apresentadas algumas estruturas desenvolvidas pelos fabricantes concorrentes e, ainda, a solução utilizada na empresa para as centrais a operar com CO₂ como fluido frigorigéneo, no regime subcrítico.

3.4.1 Descrição de produtos concorrentes

Para executar a otimização estrutural mais adequada para a central frigorífica em estudo, efetuou-se uma pesquisa relativamente às soluções que os fabricantes concorrentes integram nas suas estruturas. Verificou-se que os fabricantes concorrentes apresentam soluções muito peculiares conforme os seus critérios de projeto, e verificou-se que optam, maioritariamente, por estruturas rígidas e\ou modulares.

A estrutura apresentada na Figura 24 é uma solução comum disponibilizada por alguns fabricantes (por exemplo: Teko e Green Cooling) e é constituída por 3 módulos:

- Módulo esquerdo (1), onde está montado o depósito de CO₂ e a respetiva tubagem;
- Módulo central (2), onde estão presentes os principais componentes da central frigorífica (compressores, permutadores e depósito de óleo);
- Módulo da direita (3) que aloja o quadro elétrico.

A solução presente nesta estrutura é especialmente benéfica no seu manuseio durante a montagem da central e, ainda, quando é necessário introduzir um equipamento diferente. Deste modo, é apenas necessário analisar e modificar o módulo que sofre alterações.

Os perfis dos módulos são ligados entre si com recurso a ligações soldadas, e a união entre módulos é efetuada através de ligações aparafusadas. Para o suporte dos compressores são utilizados perfis *ómega* (perfil de secção aberta - perfil em “U” com 2 abas largas nas suas extremidades), pois estes apresentam bom desempenho estrutural e permitem fácil acesso aos parafusos de fixação dos compressores. Na solução desenvolvida por este fabricante, foram utilizados pés de nivelamento antivibráticos de modo a regular altura, nivelar a estrutura no local de instalação e, ainda, reduzir as vibrações provocadas pelos compressores.

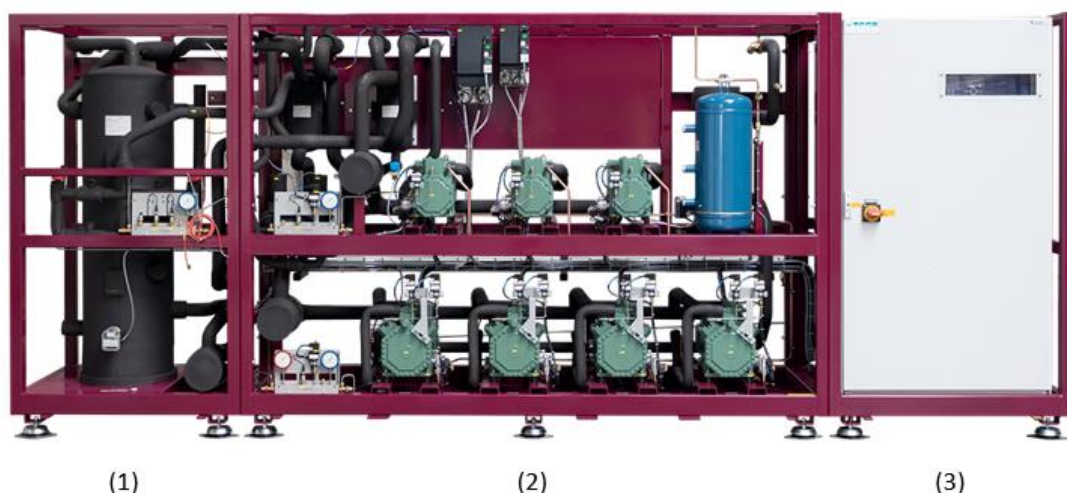


Figura 24: Estrutura modular aplicada numa central frigorífica com CO₂ como fluido de trabalho (adaptado de [74]).

O fabricante seguinte (EPTA) comercializa uma estrutura com uma solução menos comum perante as outras centrais presentes no mercado, mas é, também, utilizada pelo fabricante TEWIS. Na Figura 25 a estrutura apresenta algumas características distintas da anterior, tais como estrutura rígida, construção em chapa de aço quinada e ligações entre as chapas através de rebites de aço de alta resistência e parafusos [75]. Esta central, à semelhança da anterior, apresenta perfis *omega* para os suportes dos compressores e os pés de nivelamento antivibráticos. Ao contrário do fabricante analisado anteriormente, este dispensou a introdução do quadro elétrico na estrutura, sendo este acoplado à estrutura com recurso a outro módulo.



Figura 25: Estrutura em chapa quinada aplicada numa central frigorífica a funcionar com CO₂ como fluido de trabalho [76].

3.4.2 Soluções internas na empresa

A empresa encontra-se estabelecida no setor da refrigeração há vários anos. Como tal, devido à evolução natural dos fluidos frigorígenos utilizados, foram desenvolvidas diversas soluções para as centrais frigoríficas, mas as estruturas dimensionadas apresentavam a mesma solução, sendo apenas adaptadas para o número de equipamentos necessários introduzir

A central frigorífica apresentada na Figura 26 tem como fluido de trabalho o CO₂ no regime subcrítico e é construída com recurso a perfis em “C” e quadrados. Os perfis em “C” são aplicados na base da estrutura, apresentando um excelente desempenho estrutural e, possibilitando ainda o acesso aos parafusos de fixação dos compressores, aspeto importante na realização de ações de manutenção.

Nesta solução, foi adotada uma estrutura mais robusta na base, produzida com recurso a perfis em “C”. Na parte superior, foram introduzidos perfis quadrados para cobrir e delimitar o equipamento e, ainda, suportar a cobertura. A empresa nestas centrais introduz pés de nivelamento antivibráticos, mas não estão presentes na Figura 26, uma vez que apenas são montados no local de instalação da central.



Figura 26: Central de refrigeração a funcionar com CO₂ em regime subcrítico.

Nesta solução está presente uma subestrutura, muitas vezes aplicada quando é necessário proteger a central frigorífica de condições meteorológicas, protegendo-a de eventuais acidentes que possam provocar anomalias no seu funcionamento.

A estrutura apresentada tem como principal função suportar a massa dos compressores, do depósito de líquido, do depósito do óleo, e fornecer meios de fixação para os componentes. Na montagem da estrutura foram aplicadas ligações soldadas, para efetuar as uniões entre perfis, e ligações aparafusadas, para conectar a cobertura à estrutura. Desta forma, é possível remover a cobertura durante as ações de manutenção e/ou de inspeção.

3.4.3 Análise crítica dos pontos fracos

No início do projeto é vantajoso realizar uma pesquisa referente às centrais frigoríficas que se encontram no mercado, e executar a análise das soluções que cada disponibiliza. Assim, consegue cruzar-se os resultados relativos à pesquisa e efetuar a seleção das soluções que melhor se adequam aos critérios de projeto impostos.

A utilização de módulos para a montagem da estrutura é vantajosa na medida em que, cada módulo é projetado para os esforços a que vai estar sujeito. No entanto, para cada módulo é necessário construir a sua estrutura independente, o que traduz um maior consumo de materiais, tornando assim esta solução menos viável economicamente. Um exemplo deste tipo de estrutura é apresentado na Figura 24. Esta central é constituída por diversos módulos durante o processo de montagem, mas como produto final é apresentada num único elemento, sendo transportada nesta configuração. As ligações entre os módulos precisam de ser resistentes e de não apresentar folgas, evitando o movimento entre módulos. A existência de movimentos pode causar tensões nas soldaduras da tubagem do CO₂ e originar fissuras, provocando fugas do fluido frigorigénico.

A estrutura em módulo único apresentada na Figura 25 é uma solução alternativa que permite suprimir algumas desvantagens da estrutura modular. No entanto, esta contém algumas desvantagens, tais como perfis personalizados onde é necessário equipamento para quinar as chapas ou produzir os perfis através de terceiros, o que encarece o processo.

Nesta estrutura, o recurso a parafusos e rebites para a ligação de perfis permite uma ligação amovível. No entanto, é necessário que os furos sejam concêntricos entre os perfis para possibilitar o correto alinhamento durante a montagem. Por outro lado, é ainda necessária uma ligação sem folgas entre os perfis, para evitar movimentos entre os mesmos e obter uma estrutura rígida.

A estrutura aplicada pela empresa (Figura 26) é uma solução de fácil produção com baixos custos envolvidos. Caso não seja incluída a cobertura, a instalação como referido anteriormente, encontra-se exposta e apresenta menos meios para a fixação de tubagem e acessórios.

3.5 Anteprojeto da estrutura

A realização do anteprojeto tem como objetivo a recolha de algumas informações e soluções que, posteriormente, são debatidas e analisadas consoante os requisitos do projeto. Visto que a empresa já desenvolveu uma estrutura, o objetivo é identificar os seus pontos fracos e propor as respetivas medidas corretivas. Neste capítulo são referidas algumas soluções a implementar na estrutura a desenvolver.

3.5.1 Estrutura inicial

Até ao momento, a empresa apenas fabricou um modelo de estrutura aplicado na central de refrigeração a operar com CO₂ em regime transcrito, mas apresenta algumas soluções para a construção de estruturas diferenciadas oferecidas pelos seus concorrentes.

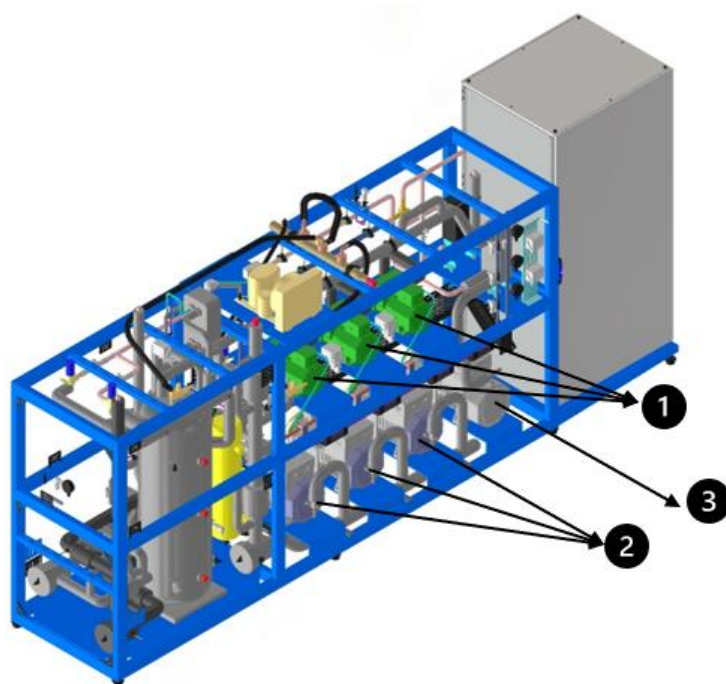


Figura 27: Representação da central frigorífica produzida pela empresa a funcionar com CO₂.

A central frigorífica apresentada na Figura 27 é o modelo atualmente disponível, foi dimensionada para fornecer cerca de 25 kW de potência à instalação de BT e 130 kW de potência de refrigeração para a MT. Assim, foi necessário introduzir 3 compressores de BT (1), 3 compressores de MT (2) e 1 compressor em paralelo (3).

O trabalho a desenvolver é referente à estrutura metálica da central frigorífica a funcionar com CO₂, em regime transcrito. Na Figura 28 encontra-se o modelo da estrutura inserida na primeira central frigorífica produzida pela empresa e foi o ponto de partida para realizar as melhorias estruturais conducentes a uma estrutura otimizada.

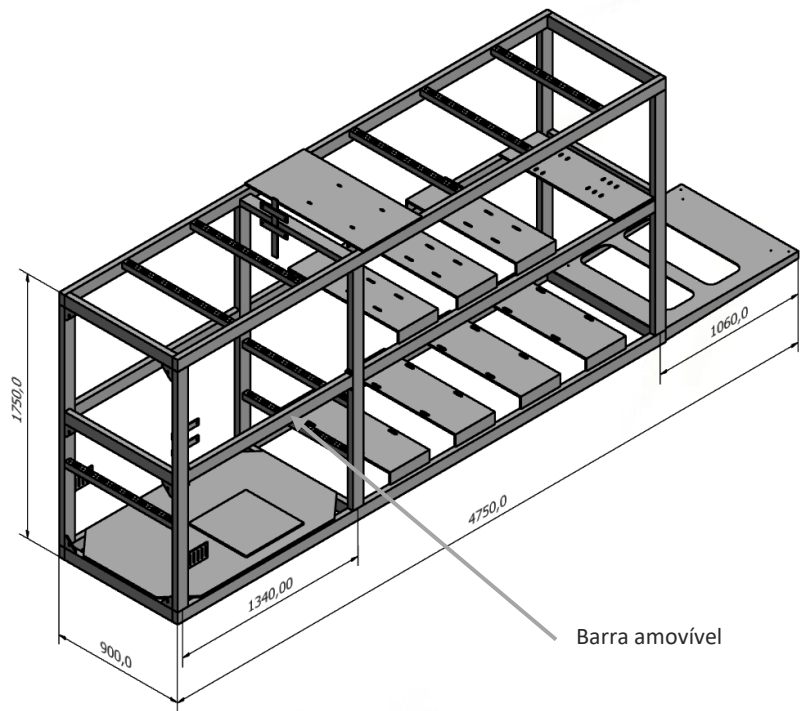


Figura 28: Estrutura metálica da central frigorífica e respetivas dimensões (mm).

No modelo da estrutura apresentado na Figura 28, a empresa optou por inserir uma estrutura de módulo único na sua central e, para o quadro elétrico, recorreu à utilização de uma extensão soldada à restante estrutura. A estrutura apresentada é fabricada com recurso a perfis retangulares unidos entre si, através das ligações soldadas. Foi também necessário introduzir uma barra amovível na estrutura (identificada na Figura 28), para possibilitar a inserção do depósito de líquido.

Para finalizar a contextualização da estrutura, são apresentadas na Tabela 6 as suas principais características.

Tabela 6: Características da estrutura inicial.

Características	Valores	Unidades
Massa	520,4	[kg]
Dimensões	4750×900×1750	[mm ³]
Material	ST 37.0	[-]
Perfil	Retangular	[-]
Dimensões do perfil	80×40×2	[mm ³]

O material aplicado na estrutura é o aço ST 37.0, semelhante ao aço estrutural S235, cuja principal característica é a boa absorção de energia na zona plástica, o que se traduz numa maior tensão de cedência. Na Tabela 7 são apresentadas as propriedades do aço aplicado na estrutura.

Tabela 7: Propriedades do aço aplicado à estrutura (ST 37.0) [77].

Propriedades	Valores	Unidades
Massa volúmica	7850	[kg/m ³]
Coeficiente de Poisson	0,28	[-]
Módulo de Young	212	[GPa]
Módulo de corte	82	[GPa]
Tensão de cedência	235	[MPa]
Tensão de rotura	350	[MPa]

Na estrutura inicial foram executados alguns estudos de modo a averiguar o desempenho da estrutura quando está sujeita aos esforços dos equipamentos. Para a execução dos estudos, recorreu-se ao *software* de elementos finitos da Autodesk Inventor® Professional versão 2020.

Com base na estrutura, foram selecionados 2 tipos de elementos: de casca e sólidos. Com o resultado destes 2 tipos de malha, obtêm-se assim uma malha mista.

Na Tabela 8 são apresentados todos os parâmetros de malha aplicados à estrutura em estudo, cujos significados mais relevantes são descritos (parâmetros adimensionais):

- Tamanho médio do elemento – é a cota média entre os nós dos elementos da malha. O valor apresentado é a fração da cota maior do modelo em estudo;
- Tamanho mínimo do elemento – é a distância mínima entre os nós dos elementos de malha, e o valor apresentado é uma fração do valor obtido no tamanho médio do elemento;
- Ângulo máximo dos elementos das superfícies curvas – este valor possibilita obter uma malha mais refinada nas superfícies curvas do modelo (por exemplo, nos furos). Quanto menor o ângulo introduzido, maior o número de elementos obtidos.

Tabela 8: Configurações da malha utilizada nos estudos dos elementos finitos.

Tipo de malha	Mista com elementos de malha curva
Elementos de sólidos utilizados	Tetraedros parabólicos
Elementos de casca utilizados	Triângulos parabólicos
Tamanho médio dos elementos	0,019
Tamanho médio do elemento de casca	0,009
Tamanho mínimo dos elementos	0,053
Número de nós	7071046
Número de elementos	4678679

Para a estrutura inicial foram realizados estudos de convergência da malha para permitir a obtenção de resultados fidedignos nas análises numéricas subsequentes. A execução do estudo de convergência teve por base a seleção de uma malha inicial grosseira, que foi progressivamente refinada de forma a verificar as variáveis de interesse em função do número mínimo de elementos. Em cada estudo com diferentes configurações de malha, foi recolhida a tensão de von Mises e os deslocamentos presentes num ponto da estrutura. O ponto selecionado encontra-se, a contar do quadro elétrico, no centro do segundo suporte do compressor de MT.

Os resultados obtidos, em termos de tensão de von Mises, encontram-se representados na Figura 29. A malha foi refinada 14 vezes e, no ponto em estudo, verifica-se que o valor da tensão tende para 30 MPa.

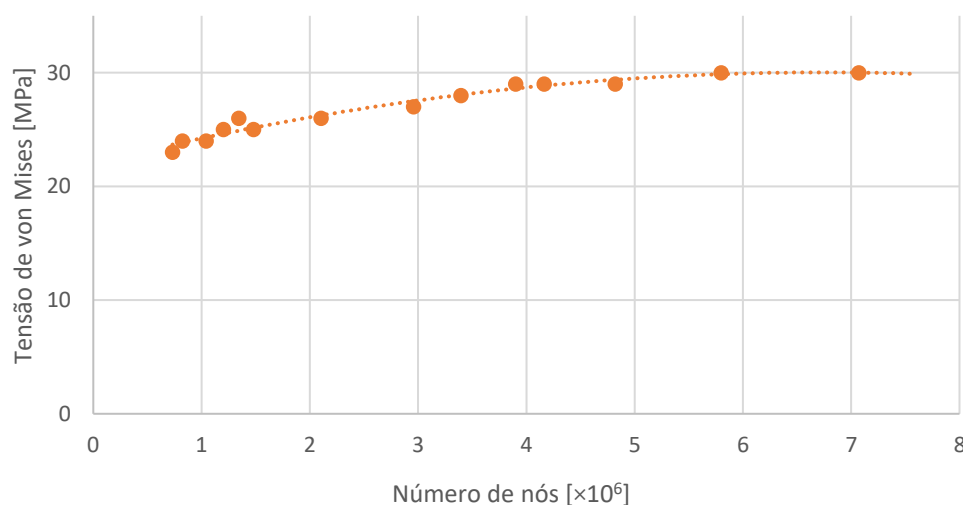


Figura 29: Gráfico de convergência da tensão de von Mises.

À semelhança do estudo de convergência anteriormente apresentado, foram também recolhidos os deslocamentos resultantes para o ponto de estudo. Na Figura 30 é possível verificar que o deslocamento do ponto em estudo converge para 3,016 mm.

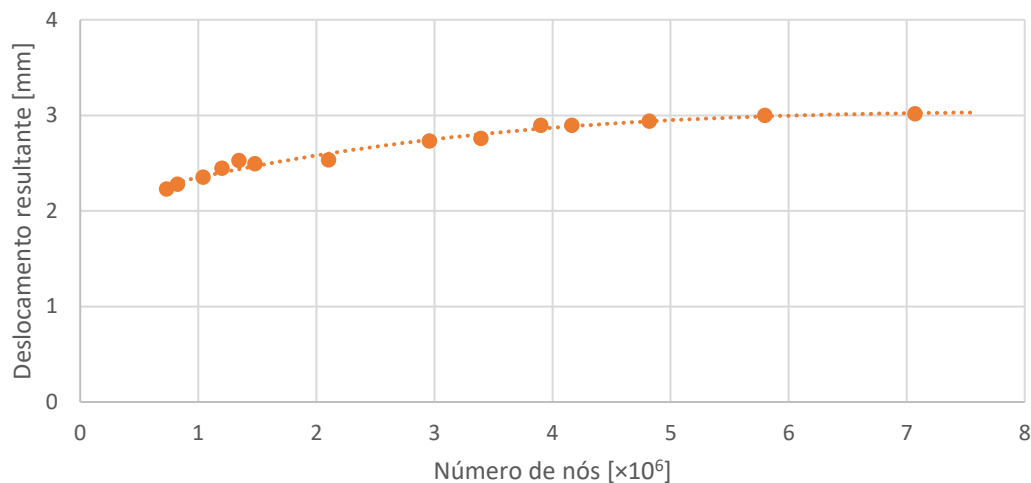


Figura 30: Gráfico de convergência dos deslocamentos resultantes.

No anteprojecto, foram realizados estudos numéricos para averiguar o comportamento da estrutura inicial e para comparar a estrutura inicial com a final. Desta forma, é possível avaliar se a optimização da estrutura foi efectuada com sucesso. A estrutura inicial foi submetida a diversos estudos: uns para averiguar o seu comportamento quando se encontra no local de instalação; e, outros para avaliar a estrutura aquando do seu manuseamento com os garfos do empilhador.

No primeiro estudo executado foram inseridas as massas dos equipamentos da central frigorífica e, no caso específico dos depósitos, foram inseridas as massas dos equipamentos e a sua capacidade máxima de carga. Neste estudo foram inseridas as condições fronteiras nos furos onde se encontram os pés de nivelamento antivibráticos, foi introduzida uma condição fronteira fixa num dos apoios e nos restantes foi inserido um apoio duplo, que permite o movimento no plano da estrutura.

No segundo caso, foi realizada uma análise da estrutura quando esta se encontra apoiada nos garfos do empilhador, inserindo apenas a massa de todos os equipamentos que compõe a central frigorífica. As condições fronteiras impostas neste estudo encontram-se na superfície de contacto estrutura/garfos do empilhador. Foi inserido um apoio fixo num dos garfos e, no outro, um apoio duplo que permite o deslocamento da estrutura no plano durante o seu manuseamento.

De seguida, são apresentados os resultados obtidos pelo *software*, nas condições a que a estrutura está sujeita no local de instalação. Na Figura 31 são visíveis os resultados obtidos para a tensão de von Mises. Apesar das tensões obtidas, ao longo da estrutura serem de ordem baixa, são apresentados pontos de concentração de tensões, que se

devem à fixação dos pés de nivelamento ser efetuada através de um furo nos perfis da base da estrutura.

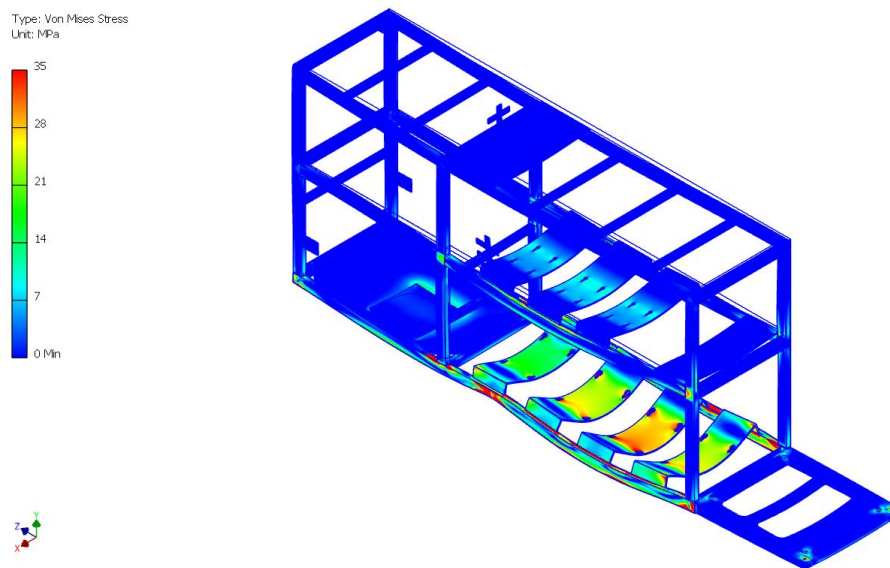


Figura 31: Resultado da tensão de von Mises da estrutura inicial (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Na Figura 32 são apresentados os deslocamentos resultantes da estrutura. O deslocamento máximo foi de 3,121 mm, obtido no suporte do compressor de MT. Na estrutura inicial, os deslocamentos de maior ordem estão presentes nos suportes dos compressores.

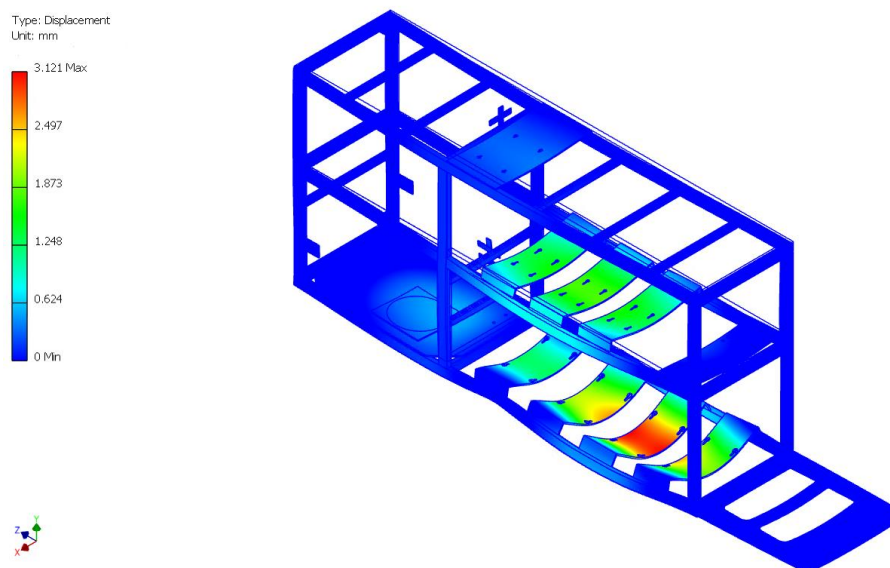


Figura 32: Resultado dos deslocamentos resultantes da estrutura inicial (deslocamentos ampliados 100 vezes).

O fator de segurança obtido para a estrutura apresenta uma larga faixa de valores. É possível visualizar na Figura 33, que grande parte da estrutura apresenta um fator de segurança entre 12,4 e 15. Por outro lado, para os suportes dos compressores do patamar inferior, este valor está compreendido entre 7,2 e 12,4. Na estrutura inicial, os

valores inferiores encontram-se na ligação dos suportes dos compressores com os perfis da base, assim como ao longo dos perfis da base.

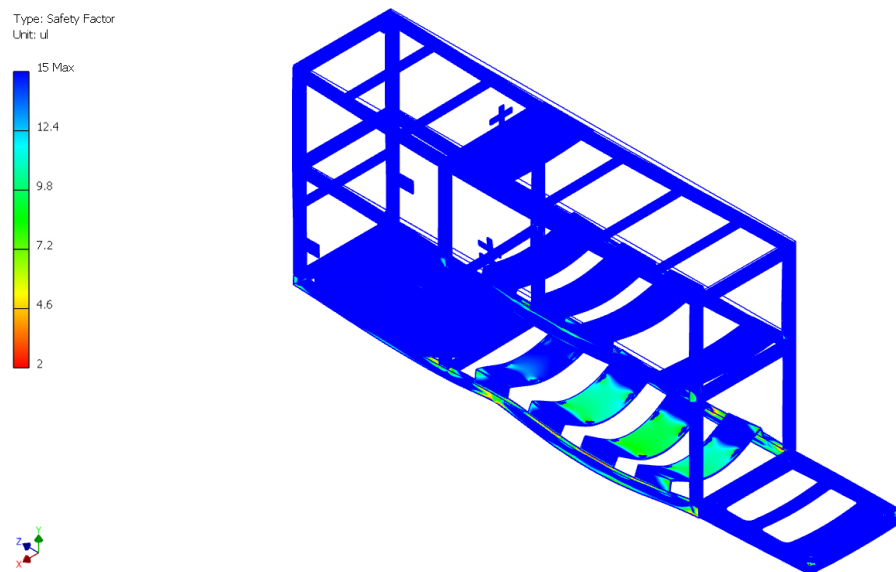


Figura 33: Resultado do fator de segurança da estrutura inicial (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Devido aos pontos de concentração de tensões dos apoios da estrutura, estes apresentam os menores valores do fator de segurança, apresentados na Figura 34.

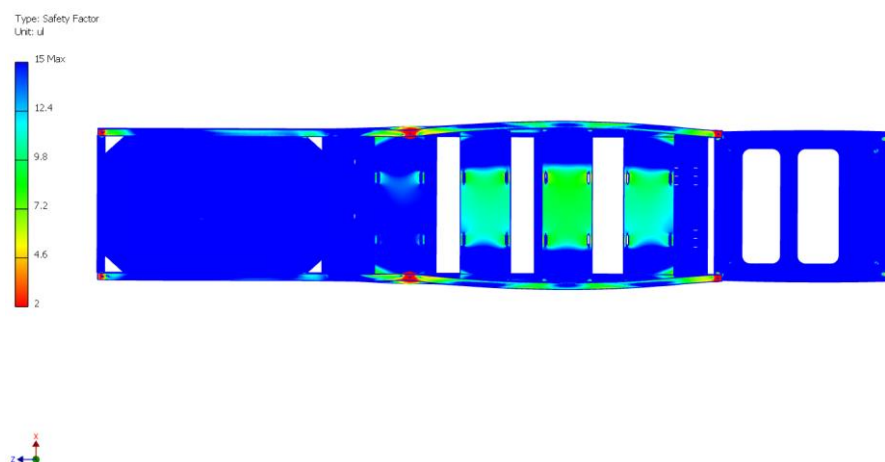


Figura 34: Representação do fator de segurança no local de aplicação dos pés de nivelamento (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Ao longo de toda a estrutura encontra-se uma deformação equivalente, representada na Figura 35. As deformações presentes na estrutura encontram-se principalmente nos perfis da base, nas uniões dos perfis e nos suportes dos compressores.

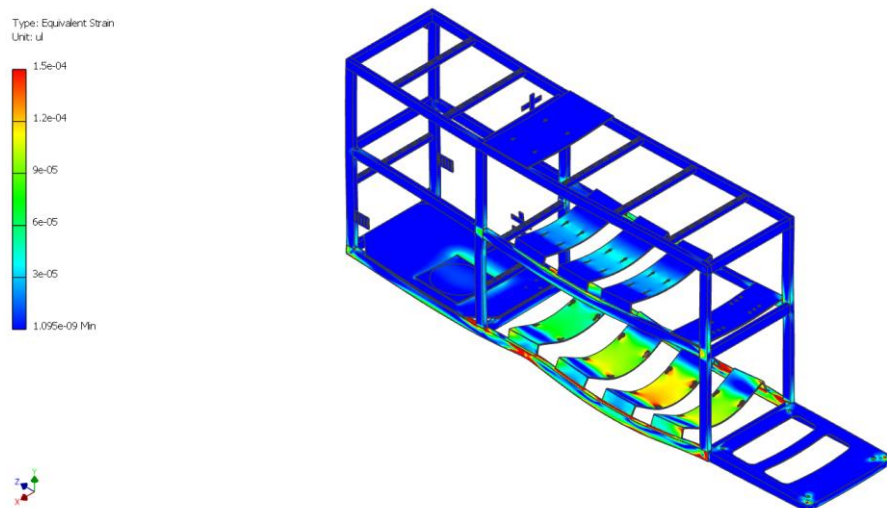


Figura 35: Resultado das deformações da estrutura inicial (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Para finalizar o estudo da estrutura inicial quando esta se encontra no local de instalação, foi realizado um estudo modal para averiguar os modos naturais de vibração da estrutura. Este estudo foi realizado com as mesmas condições aplicadas na análise estática. A estrutura foi analisada para as frequências de 0 a 100 Hz, visto que a central se encontra em funcionamento entre 30 e 70 Hz, frequências a que os compressores com variador de velocidade operam.

O estudo modal teve como resultados 38 frequências naturais de vibração para a estrutura inicial: 4,12 Hz; 12,20 Hz; 18,08 Hz; 21,64 Hz; 25,58 Hz; 26,69 Hz; 33,19 Hz; 35,22 Hz; 38,33 Hz; 38,40 Hz; 40,38 Hz; 46,24 Hz; 47,96 Hz; 51,44 Hz; 52,72 Hz; 53,36 Hz; 54,76 Hz; 54,83 Hz; 58,48 Hz; 59,75 Hz; 60,13 Hz; 61,07 Hz; 61,27 Hz; 61,53 Hz; 64,20 Hz; 70,02 Hz; 71,22 Hz; 71,38 Hz; 74,78 Hz; 75,22 Hz; 79,11 Hz; 88,28 Hz; 88,35 Hz; 88,79 Hz; 91,41 Hz; 97,19 Hz; 98,52 Hz e 98,76 Hz.

Após a análise do estudo modal, verificou-se que a estrutura apresentava frequências naturais de vibração que afetavam apenas alguns componentes da estrutura como suportes dos compressores ou elementos de dimensões reduzidas. Como tal, estas frequências foram categorizadas como frequências naturais de vibração locais. Para o estudo realizado foram encontradas 8 destas frequências (52,72 Hz; 54,76 Hz; 54,83 Hz; 58,48 Hz; 60,13 Hz; 70,02 Hz; 71,22 Hz e 91,41 Hz).

A Figura 36 exemplifica os deslocamentos resultantes (em mm) da estrutura quando esta é sujeita à frequência de 70,02 Hz.

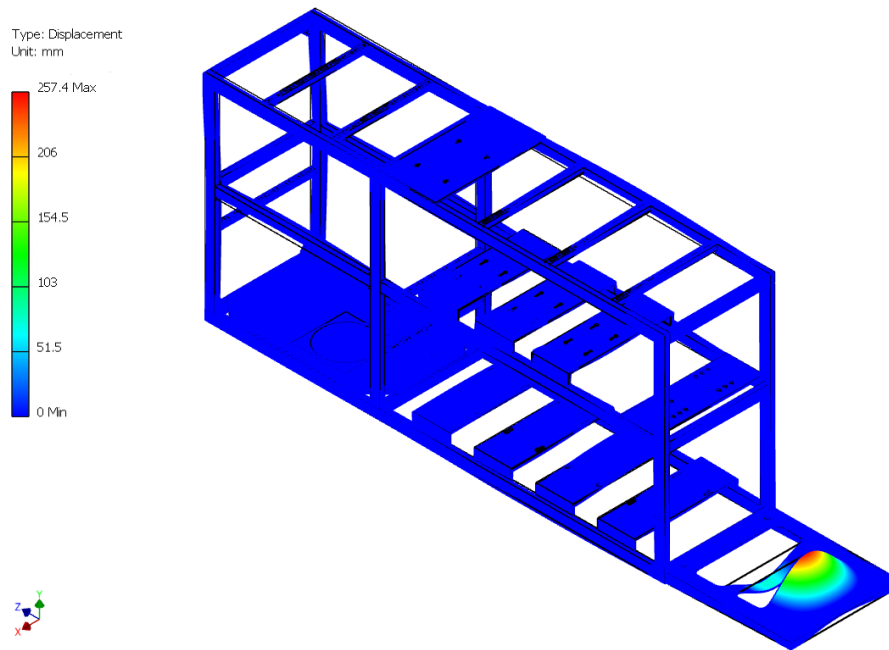


Figura 36: Resultado da frequência natural de vibração local de 70,02 Hz (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Referidas as frequências naturais de vibração locais, as restantes são frequências estruturais que afetam a estrutura, e consequentemente, o funcionamento da central frigorífica. Na otimização da estrutura, para além da redução dos deslocamentos, das tensões e do aumento do fator de segurança, é ainda necessário, desenvolver uma estrutura com o menor número de modos de vibração. Estes modos de vibração tem uma extrema relevância no dimensionamento, para que a estrutura não afete o desempenho da central. Assim, é fulcral o dimensionamento de uma estrutura com o menor número de modos de vibração para a faixa de frequências de funcionamento da central frigorífica. A Figura 37 ilustra os deslocamentos resultantes (mm) da estrutura, quando se encontra sujeita à frequência de 64,20 Hz.

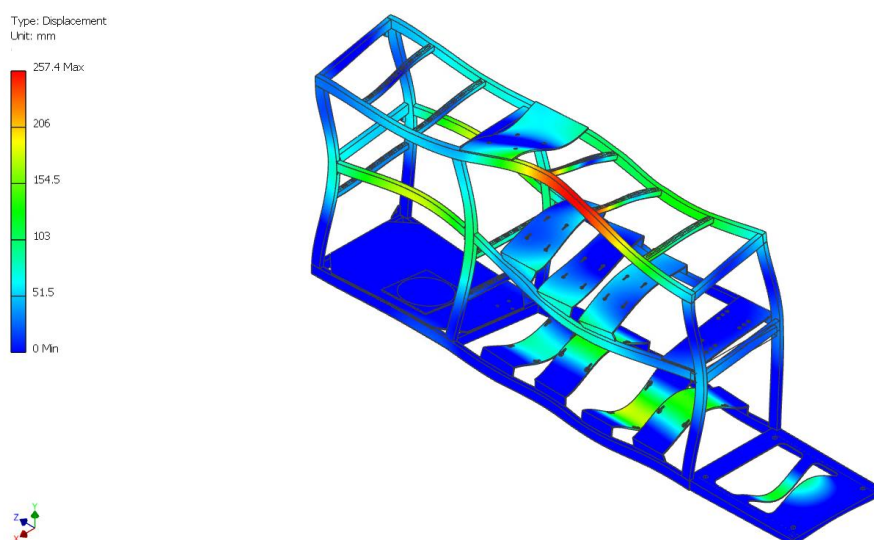


Figura 37: Resultado da frequência natural de vibração da estrutura de 64,20 Hz (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Realizadas as análises da estrutura inicial para as condições impostas no local de instalação, é executado o estudo da estrutura para as condições a que está sujeita durante o seu manuseio.

Na Figura 38 são apresentadas as tensões de von Mises para a estrutura inicial. Neste caso, é visível uma maior concentração de tensões nas uniões dos perfis e nos perfis da base, assim como nas zonas vizinhas do posicionamento dos garfos do empilhador. As tensões presentes na estrutura são devidas às superfícies de reduzidas dimensões de contacto nos apoios dos garfos do empilhador, o que leva a uma maior concentração de tensões, e ainda gera momentos fletores nos elementos da estrutura devido ao carregamento.

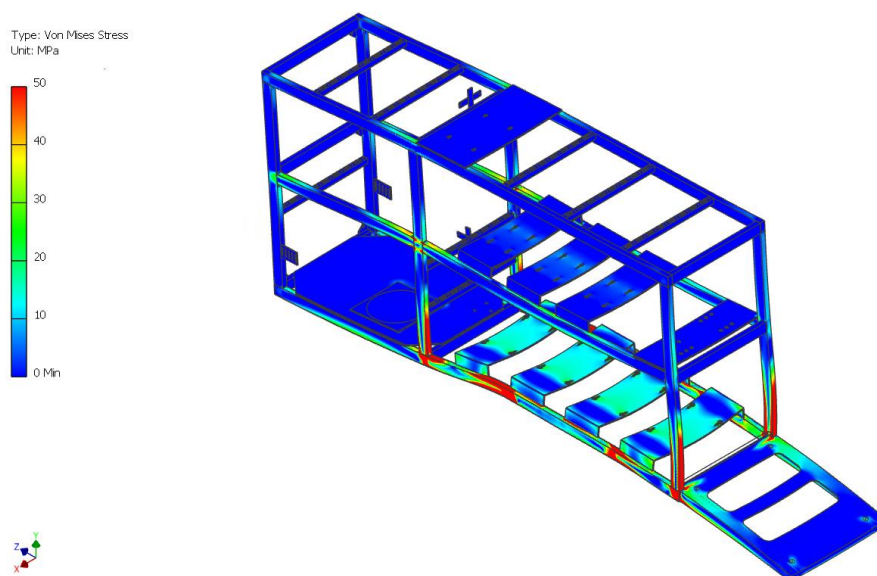


Figura 38: Resultado da tensão de von Mises da estrutura inicial quando posicionada nos garfos do empilhador (deslocamentos ampliados 100 vezes).

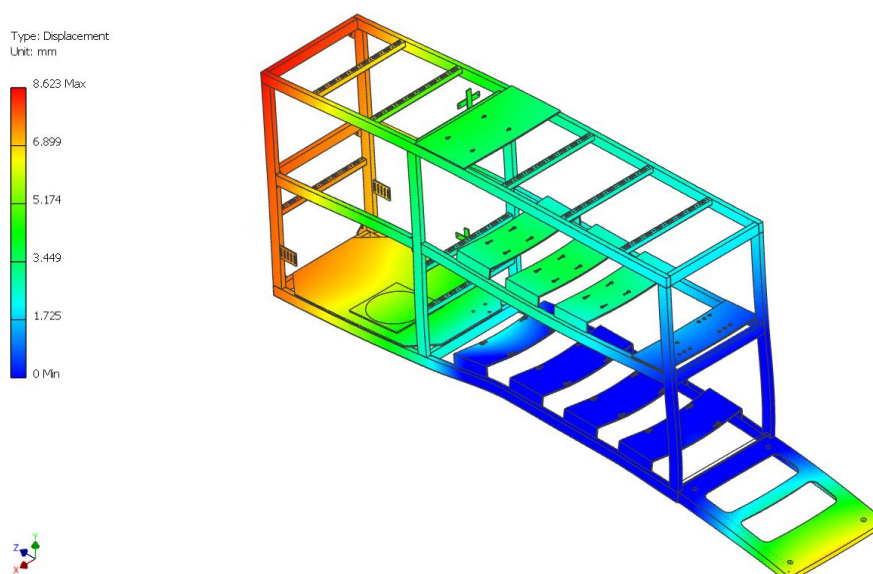


Figura 39: Resultado dos deslocamentos resultantes da estrutura inicial quando posicionada nos garfos do empilhador (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Para os deslocamentos da estrutura é expectável que as extremidades da estrutura apresentem maiores deslocamentos, devido a estas zonas não se encontrarem apoiadas e, ainda, estarem a uma maior distância (comparado com a restante estrutura) da zona apoiada pelos garfos do empilhador (Figura 39).

Como referido anteriormente, as tensões equivalentes de von Mises mais elevadas presentes na estrutura para este caso encontram-se nos perfis da base e nas suas respectivas uniões. Deste modo, é expectável que nestas zonas o fator de segurança seja menor, como está visível na Figura 40.

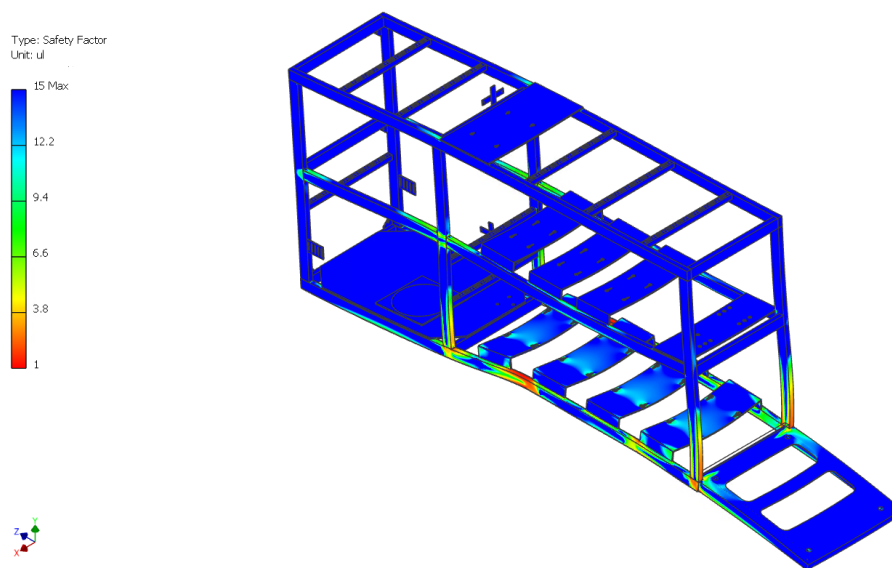


Figura 40: Resultado do fator de segurança da estrutura inicial quando posicionada nos garfos do empilhador (deslocamentos ampliados 100 vezes).

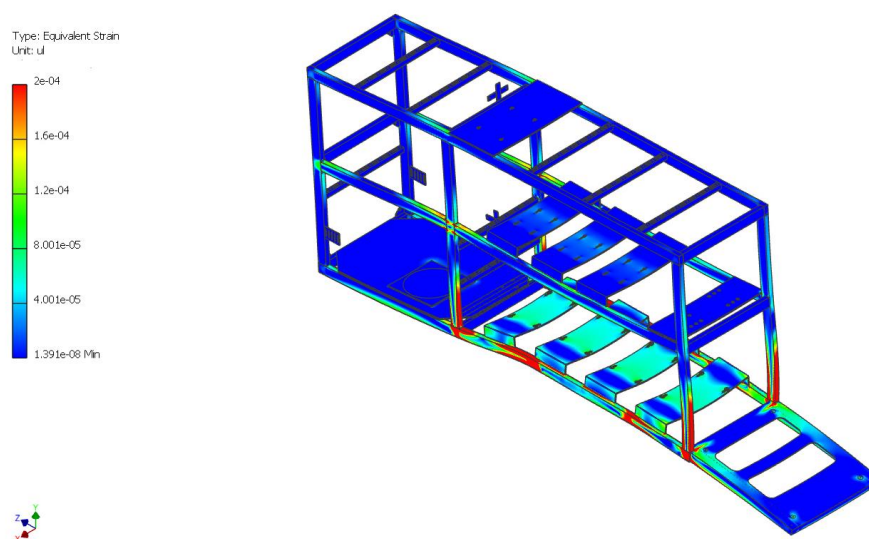


Figura 41: Resultado da deformação equivalente da estrutura inicial quando posicionada nos garfos do empilhador (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Na Figura 41 é apresentado o resultado da deformação equivalente presente na estrutura inicial. É possível notar uma deformação acentuada nos perfis da base e

verticais da estrutura, assim como, nas uniões dos perfis e nos suportes para os compressores.

Pela análise dos resultados obtidos, é possível afirmar que a estrutura inicial necessita de otimização em diversos aspetos, como a minimização da flecha presente nos suportes dos compressores quando a central se encontra instalada, ou a minimização das frequências naturais de vibração para a janela de frequências de trabalho da central.

Para o manuseamento da estrutura por meio dos garfos do empilhador é necessário executar alterações estruturais para reduzir os deslocamentos presentes na estrutura, assim como minimizar as tensões presentes nos perfis das bases, o aumentando o fator de segurança da estrutura.

3.5.2 Tempestade de ideias

Após a pesquisa efetuada relativamente às soluções incorporadas nas estruturas das centrais frigoríficas dos fabricantes concorrentes, e com base nas soluções de instalações realizadas anteriormente na empresa, foi possível proceder à discussão das ideias a analisar para implementação de melhorias na estrutura.

No capítulo anterior são referidos alguns dos pontos fracos das soluções oferecidas pelos concorrentes e pela empresa. Após apresentadas estas soluções para discussão com a empresa, as ideias que melhor se adequam e fornecem mais vantagens face aos requisitos de projeto são:

- Estrutura modular (1- Figura 42): a implementação desta solução permitirá uma maior versatilidade, visto que a divisão da estrutura por secções facilita o processo de dimensionamento e permite ainda a implementação de diferentes módulos conforme as necessidades dos equipamentos a inserir;
- Estrutura de módulo único (2- Figura 42): esta solução apresenta diversas vantagens para a empresa, visto que já se encontram familiarizados com todo o processo de montagem da central. Para além disto, após o fabrico e pintura, a estrutura fica completa para a introdução dos equipamentos.

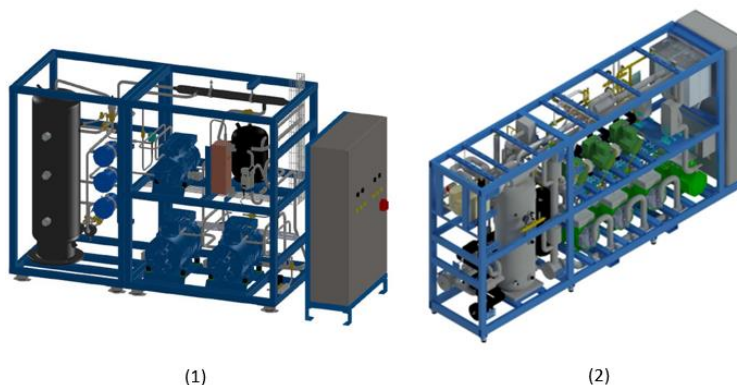


Figura 42: Centrais frigoríficas com a aplicação de 2 estruturas diferentes: (1) Estrutura modular e (2) Estrutura de módulo único [78].

3.5.3 Análise SWOT

Após a apresentação das ideias é necessário prosseguir com a tomada de decisões. Para este efeito, analisou-se a melhor opção para o projeto pretendido. Na Tabela 9 e Tabela 10 são apresentadas as análises SWOT às estruturas em estudo, onde são detalhados os pontos fortes e fracos, e ainda, as oportunidades e ameaças que cada solução enfrenta. Na Tabela 9 é apresentada a análise SWOT referente à aplicação da solução modular na estrutura alvo de estudo.

Tabela 9: Análise SWOT da implementação da estrutura modular.

S (Forças) trengths •Versatilidade no dimensionamento; •Compartimentação da estrutura; •Facilidade de transporte dos módulos; •Módulos com menor massa.	W (Fraquezas) eaknesses •Possibilidade de folgas entre módulos; •Aumento de tarefas de montagem; •Necessidade de um correto alinhamento ente módulos; •Compromisso da integridade dos perfis; •Maior massa do conjunto final.
O (Oportunidades) pportunities •Diversas opções de módulos; •Maior número de apoios para equipamentos e tubagem.	T (Ameaças) hreats •Defeito nos perfis aplicados; •Incumprimento dos testes das soldas.

Na Tabela 10 é apresentada a análise SWOT da solução com uma estrutura de módulo único.

Tabela 10: Análise SWOT da implementação de uma estrutura de módulo único.

S (Forças) trengths • Menor consumo de material; • Menor impacto das tensões nas tubagens; • Menor número de tarefas durante a montagem.	W (Fraquezas) eaknesses • Necessidade de perfis de maior robustez; • Dificuldade no manuseio da central; • Necessidade de ligações soldadas mais resistentes.
O (Oportunidades) pportunities • Estrutura dimensionada para diversas gamas de centrais; • Padronização da estrutura em função dos equipamentos necessários.	T (Ameaças) hreats • Defeito nos perfis aplicados; • Incumprimento dos testes de soldadura.

3.5.4 Seleção das ideias a implementar

Realizadas as análises SWOT e ponderadas as soluções apresentadas perante os requisitos de projeto, a utilização de uma estrutura de módulo único é a solução que melhor se adequa aos requisitos de projeto. De facto, no fim da sua produção, esta solução apresentará maior leveza e será economicamente mais atrativa. A introdução desta solução é benéfica para a empresa, visto que, uma vez implementada com sucesso, torna-se mais fácil e rápida a padronização de tarefas.

Com o resultado da análise SWOT e os estudos efetuados à estrutura inicial, tornou-se possível selecionar os pontos fortes de cada estrutura, com o objetivo de obter uma solução mais vantajosa para a central frigorífica.

Referido isto, é necessário introduzir melhorias na estrutura em desenvolvimento, nomeadamente nos suportes de compressores, no suporte do quadro elétrico e reduzir a massa da estrutura final. Contudo, deve ter-se em consideração que estas melhorias não podem comprometer as ações de manutenção e os equipamentos acoplados à estrutura.

Na estrutura é necessário introduzir novas soluções nos apoios dos compressores, como a utilização de perfis *omega* (Figura 43), que possibilita uma boa fixação à estrutura e melhor distribuição dos esforços, estas melhorias devem-se à existência no perfil das abas e da abertura que permite o acesso aos parafusos de fixação dos compressores.

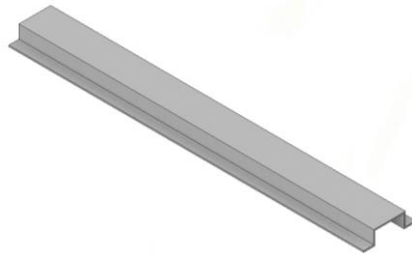


Figura 43: Perfil *Omega*.

Os suportes dos compressores desenvolvidos pela empresa para a central frigorífica, apresentados no capítulo anterior, são uma solução funcional, uma vez que permitem a passagem da tubagem por baixo dos compressores sem complicações de estrangulamento e fácil acesso às mesmas. No entanto, esta solução necessita de melhorias com o objetivo de reforçar o suporte e, ainda, diminuir a sua massa.

Neste projeto é necessário explorar algumas hipóteses referentes às soluções a aplicar no quadro elétrico, tais como:

- A hipótese a estudar, encontra-se aplicada na estrutura inicial (Figura 28), onde o quadro elétrico é suportado por uma base, fixa à estrutura com recurso a ligações soldadas. Esta solução permite uma boa fixação do quadro elétrico e possibilita a passagem dos cabos pela parte inferior do suporte. No entanto, é necessário executar algumas melhorias a nível estrutural, diminuindo os deslocamentos deste suporte quando sujeito ao transporte;
- Para suportar o quadro elétrico uma solução a explorar é a extensão dos perfis da base da estrutura de modo a envolver o quadro elétrico. Em suma, esta solução permite desenvolver uma estrutura de um módulo único com rigidez.

Na perspetiva de melhoria da estrutura inicial, é fulcral realizar uma redução da massa, que desencadeará uma solução com um menor consumo de material, tornando-se economicamente mais atrativa. Nomeadamente nas chapas de suporte dos equipamentos, pois apresentam grandes dimensões e uma espessura de 10 mm. A sua substituição por perfis *omega* traduz-se numa boa redução de massa, e, ainda, numa solução mais atrativa a nível estrutural, com um custo inferior.

3.6 Projeto da estrutura

Após a realização do anteprojeto e da recolha de informação referente às soluções apresentadas no mercado, conseguiu desenvolver-se a estrutura final. No seu desenvolvimento foram consultados os engenheiros responsáveis pelo projeto da instalação e, em conjunto com o desenhador da empresa, desenvolveu-se uma estrutura que permitiu a inserção de todos os equipamentos, e é descrita neste capítulo.

3.6.1 Descrição da estrutura final

Recolhida a informação relevante para o projeto da estrutura e feita uma reflexão relativamente a cada solução disponível, foi utilizada uma estrutura de módulo único, devido às características que apresenta se enquadrarem mais com os requisitos de projeto. A estrutura final, em comparação com a inicial, sofreu algumas alterações a fim de melhorar a eficiência estrutural e, ainda, algumas alterações referentes à parte da instalação e à disposição dos componentes a suportar pela estrutura.

A empresa, na central frigorífica anterior, optou por um quadro elétrico de maior dimensão, que incluía no interior os variadores de velocidade. Na central a desenvolver foi selecionada uma solução mais compacta para o quadro elétrico, onde os variadores de velocidade foram colocados na estrutura, na periferia do quadro elétrico.

Na Figura 44 é apresentada a central frigorífica com a implementação da estrutura desenvolvida, onde foram aplicados perfis retangulares com uma espessura de 2 mm, e onde a união entre perfis foi realizada através de ligações soldadas. A estrutura na base conta com a utilização de perfis retangulares ($100 \times 40 \times 2 \text{ mm}^3$), devido aos equipamentos de maior massa se encontrarem na base. Estes perfis estão sujeitos a uma maior flexão durante o transporte, a utilização destes traduziu-se na diminuição da exposição da tubagem existente na parte inferior. Na restante estrutura, foi utilizado o perfil retangular com dimensão $80 \times 40 \times 2 \text{ mm}^3$.

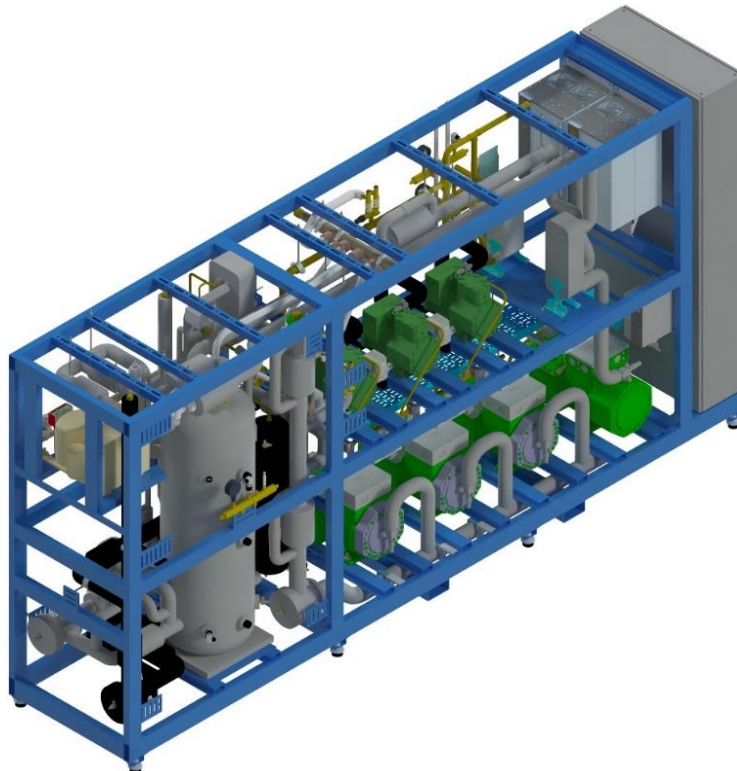


Figura 44: Central frigorífica a operar com CO_2 , com a estrutura desenvolvida inserida.

Nesta estrutura foram retiradas as chapas de suporte do depósito de líquido e do grupo de emergência, utilizadas na estrutura inicial (Figura 28), substituindo-as por perfis. Esta alteração foi efetuada com o intuito de reduzir a massa da estrutura.

Para o quadro elétrico, como referido anteriormente, utilizou-se uma solução mais compacta, de forma a permitir a fixação aos perfis da base da estrutura. Isto permitiu obter uma solução completa (com todos os equipamentos) sem haver necessidade de introduzir um módulo para o quadro elétrico.

Na Figura 45 é apresentada a estrutura desenvolvida e as suas respetivas dimensões. Em comparação com a estrutura inicial, teve uma redução de 100 mm na largura e 666 mm no seu comprimento, apesar do aumento na altura de 258 mm. O aumento desta cota foi resultado da decisão tomada pela empresa, onde a estrutura deve acompanhar a cota do quadro elétrico.

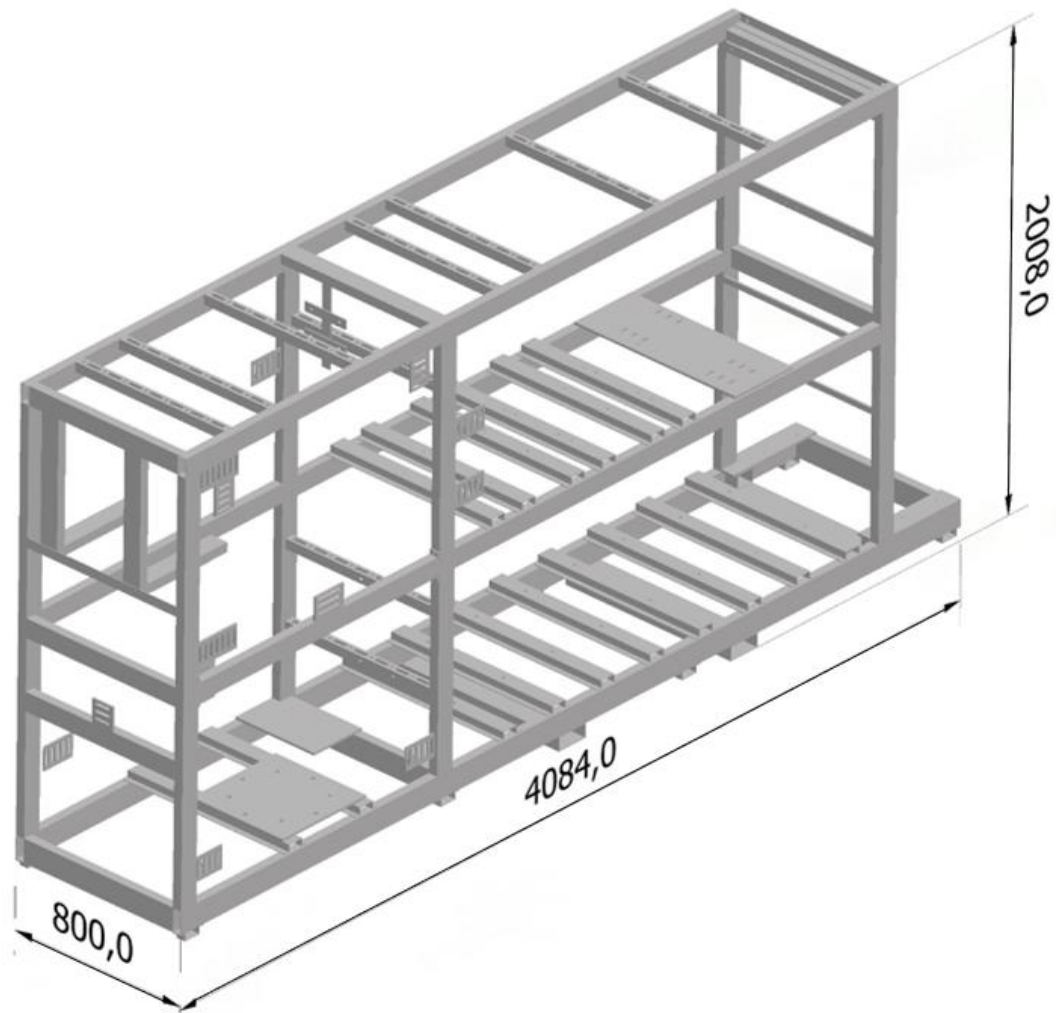


Figura 45: Estrutura final e respetivas dimensões.

Na Figura 45, espelham-se algumas soluções implementadas nesta estrutura, tais como a inserção dos perfis *omega* para os suportes dos compressores e para o suporte do depósito de líquido. Estes perfis foram também introduzidos sob os perfis retangulares

da base da estrutura, com o objetivo de permitir a inserção dos pés de nivelamento antivibráticos e possibilitar a sua regulação. Foram ainda inseridos dois perfis retangulares ($140 \times 60 \times 3 \text{ mm}^3$), para possibilitar a introdução dos garfos do empilhador sem ocorrer o escorregamento da estrutura durante o transporte. Estes perfis foram inseridos no centro de gravidade da central frigorífica, que se traduz numa maior estabilidade durante o manuseamento da central. Nesta estrutura foi mantida a barra amovível na secção do depósito de líquido, para facilitar a sua instalação durante a montagem da central frigorífica.

A solução final apresenta uma massa de 317,3 kg e o material utilizado foi o aço estrutural S235JR. Estas informações estão disponíveis na Tabela 11.

Tabela 11: Características da estrutura final.

Características	Valores	Unidades
Massa	317,3	[kg]
Dimensões	4084×800×2008	[mm ³]
Material	S235JR	[-]
Perfil	Retangular e <i>Omega</i>	[-]

O material aplicado na estrutura, como referido na Tabela 11, é o aço “S235JR” e as suas propriedades são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Propriedades do aço aplicado à estrutura desenvolvida.

Propriedades	Valores	Unidades
Massa volúmica	7850	[kg/m ³]
Coefficiente de Poisson	0,3	[-]
Módulo de Young	210	[GPa]
Módulo de corte	81	[GPa]
Tensão de cedência	235	[MPa]
Tensão de rotura	360	[MPa]

3.6.2 Dimensionamento

Depois de apresentada a estrutura desenvolvida, esta será alvo de dimensionamento. Todo o processo será apresentado e detalhado neste capítulo, desde a enumeração das cargas a que a estrutura está sujeita, até aos resultados obtidos no dimensionamento numérico.

3.6.2.1 Solicitações impostas

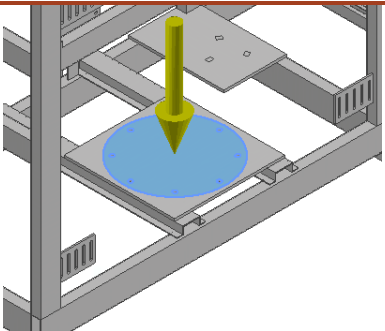
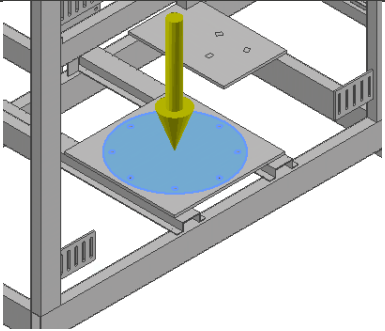
A estrutura desenvolvida será estudada para a utilização em dois cenários distintos:

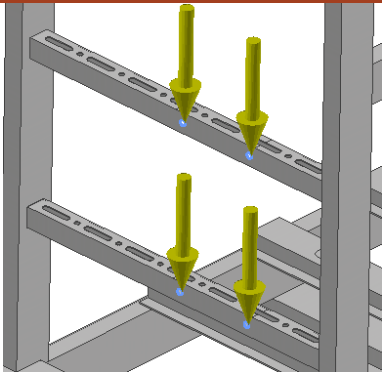
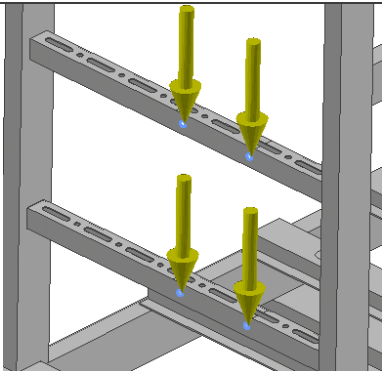
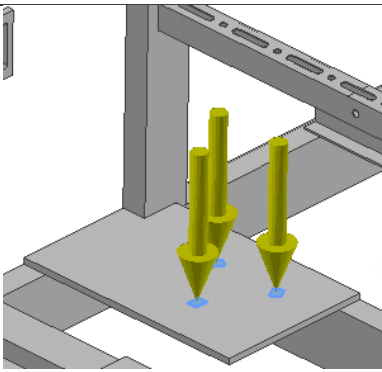
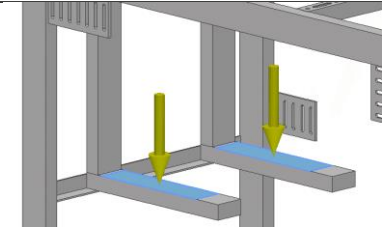
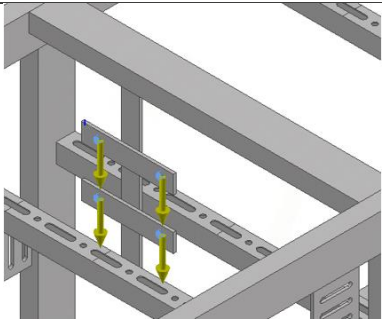
- A central no local de instalação, onde estão inseridos todos os equipamentos e onde será realizada uma análise para a condição mais desfavorável (quando o depósito de líquido se encontra no seu nível máximo);
- Quando movimentada com o empilhador e encontra-se sujeita às forças resultantes da massa dos componentes. Durante o transporte, a central frigorífica não contém a carga fluido de trabalho.

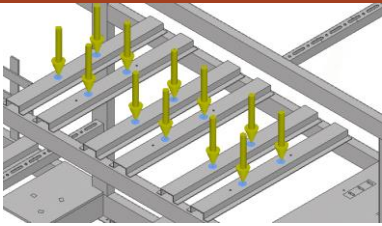
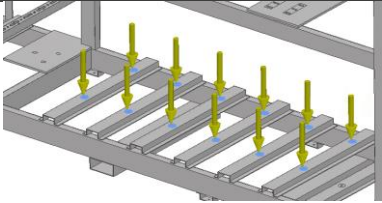
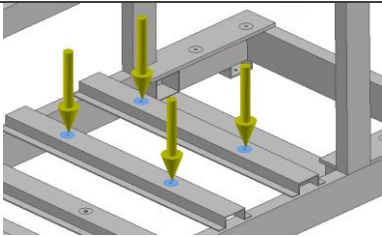
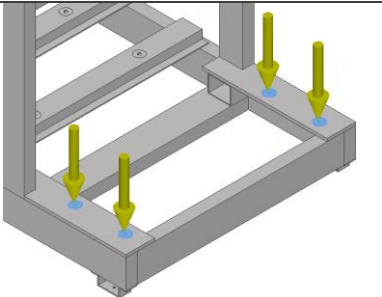
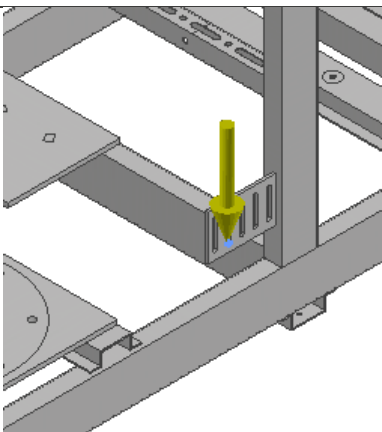
Neste projeto é, ainda, efetuado um estudo modal para determinar as frequências naturais de vibração. Esta análise é realizada no cenário em que a estrutura se encontra no local de instalação.

Para a realização do dimensionamento da estrutura é necessário averiguar as forças a que a estrutura está sujeita, descritas na Tabela 13.

Tabela 13: Solicitações impostas à estrutura e respetivas localizações.

Equipamento	Massa (kg)	Força (N)	Localização
Depósito de líquido	200	1962	
Depósito de líquido (incluindo a capacidade máxima de CO ₂)	308	3021,5	

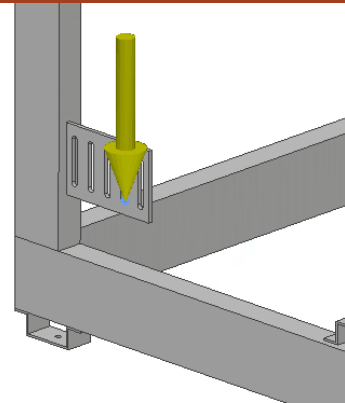
Depósito de óleo	28	274,7	
Depósito de óleo (incluindo a capacidade máxima de óleo)	41	402,2	
Separador de óleo	47	461,1	
Grupo de emergência	23	225,6	
Permutador do grupo de emergência	22,6	221,7	

Conjunto: Compressor de BT e regulador de óleo	3 Conjuntos 151,2	1483,2	
Conjunto: Compressor de MT e regulador de óleo	3 Conjuntos 571,2	5603,4	
Conjunto do compressor em paralelo e regulador de óleo	214,4	2103,3	
Quadro elétrico	275	2697,8	
Filtro de aspiração para a MT	4,55	44,6	

Filtro de aspiração
para a BT

4,4

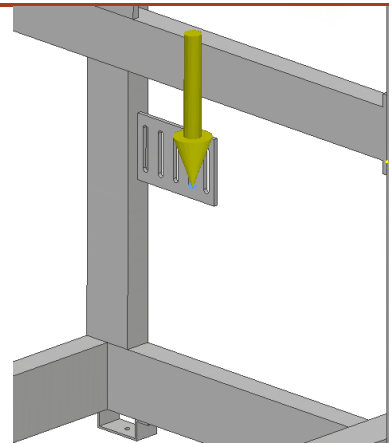
43,2



Filtro de aspiração
de líquido

4,35

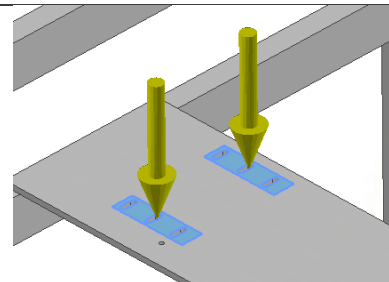
42,7



Permutador de AQS

21,2

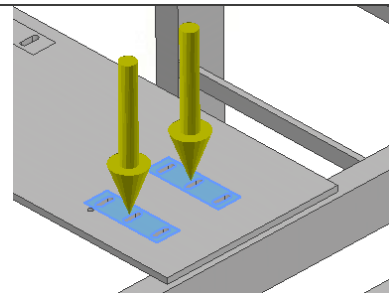
208,0



Permutador de
compressor em
paralelo

10,9

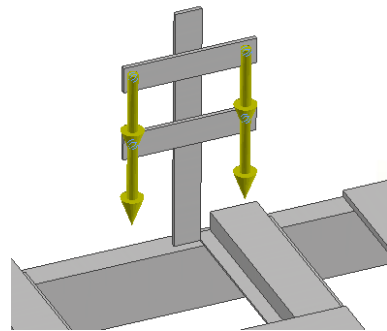
106,9



Permutador

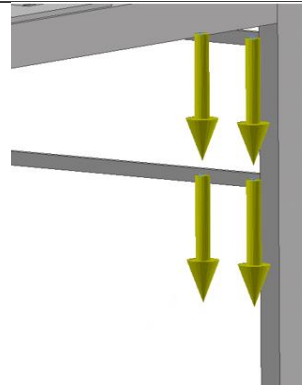
6

58,9

Variador de
velocidade do
compressor de BT

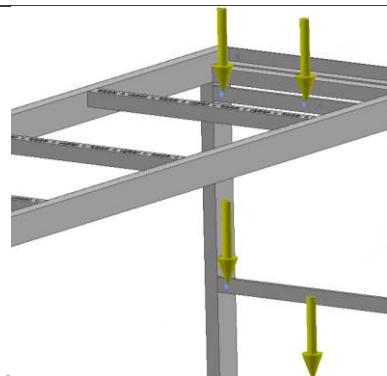
6,6

64,7

Variador de
velocidade do
compressor de MT

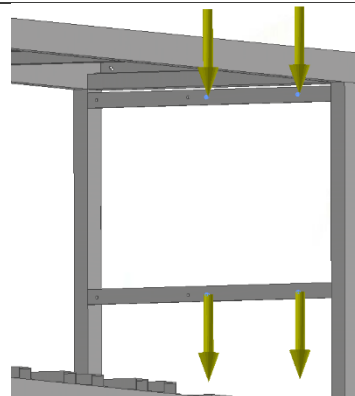
35

343,4

Variador de
velocidade do
compressor em
paralelo

35

343,4



3.6.2.1.1 Primeiro caso de estudo

Neste primeiro caso de estudo, a estrutura encontra-se no local de instalação com todos os equipamentos inseridos. São aplicadas todas as forças referentes às massas dos componentes e, para os depósitos de líquido e de óleo, são introduzidas as massas dos equipamentos, em conjunto com as massas das cargas máximas de fluido.

A simulação deste estudo foi realizada para averiguar o desempenho da estrutura quando esta se encontra no local da instalação. Nesta situação, a estrutura já se encontra com os pés de nivelamento antivibráticos inseridos. Como tal, no sítio onde estes se encontram foi introduzida uma condição fronteira fixa num dos apoios e, nos restantes, foi inserido um apoio que permite o movimento da estrutura no plano.

Na Figura 46 são apresentas as condições impostas. As setas a amarelo representam as cargas e as condições fronteira impostas estão representadas pelo quadrado branco (restrição fixa) e pelas setas a azul, que representam os apoios aplicados para restringir a estrutura e permitir o movimento no plano. Os parâmetros referidos anteriormente são, também, aplicados na realização de um estudo modal à estrutura.

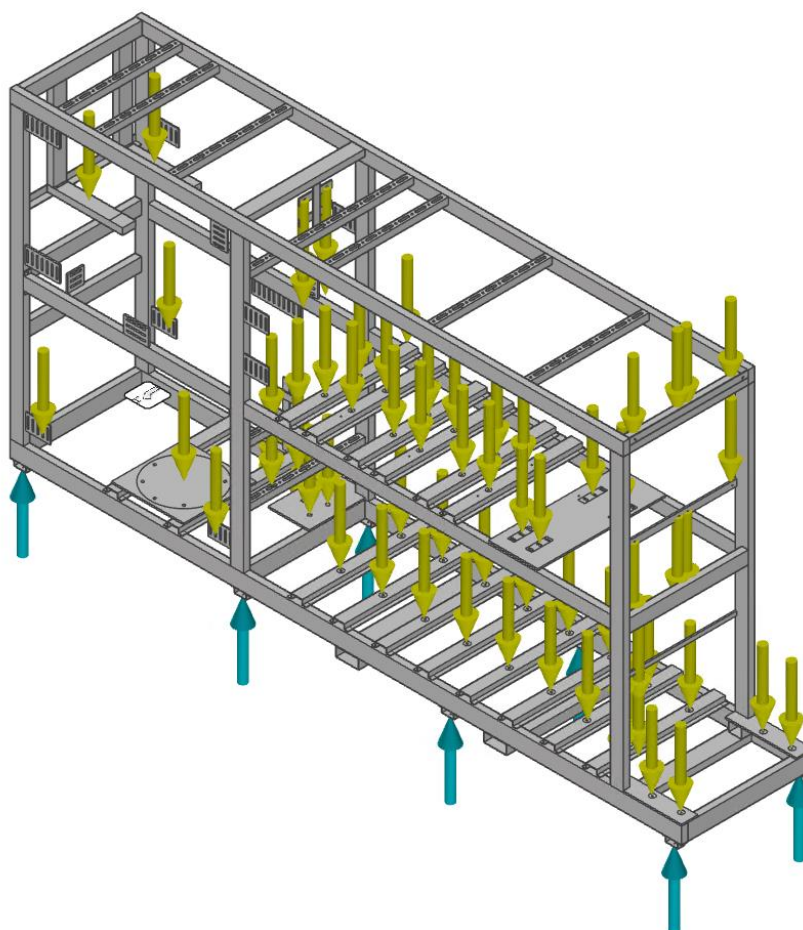


Figura 46: Representação das condições fronteira e forças aplicadas à estrutura no 1º caso de estudo.

3.6.2.1.2 Segundo caso de estudo

A realização deste estudo ocorre com o intuito de analisar a estrutura quando é finalizado todo o processo de montagem da central frigorífica, ou seja, quando se encontra com todos os equipamentos inseridos, pronta a transportar para o local de instalação. Nesta análise, as forças aplicadas quer pelo depósito de líquido, quer pelo depósito de óleo é apenas referente às respetivas massas dos equipamentos. Para que o manuseio da estrutura seja efetuado com segurança, foi realizado o cálculo do centro de massa da central, tendo em conta a massa dos equipamentos e da estrutura. Este processo foi realizado com recurso a uma folha de cálculo.

O cálculo do centro de massa (CM) ($\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$), definido pelas Equações (3), foi realizado através do produto da massa de cada equipamento (m) e as suas respetivas coordenadas absolutas (x , y , z), sobre a massa do conjunto

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad \bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3)$$

Depois do cálculo do CM da central frigorífica, foram introduzidos os perfis de guiamento dos garfos do empilhador à mesma distância do CM obtido, aplicados para evitar o escorregamento da estrutura durante o manuseio e para equilibrar a central.

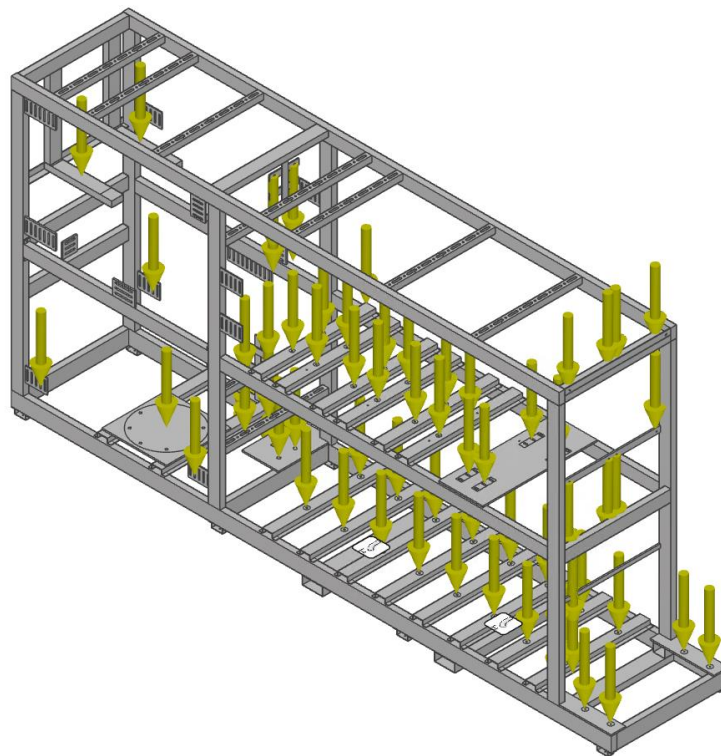


Figura 47: Representação das condições fronteira e forças aplicadas à estrutura no 2º caso de estudo.

No segundo caso de estudo, os perfis de guiamento dos garfos do empilhador são onde aplicadas as condições fronteira fixas. Na Figura 47 encontram-se representadas as solicitações impostas para este caso de estudo.

3.6.2.2 Métodos de dimensionamento

Ao longo do desenvolvimento, a estrutura sofreu diversas alterações. Para cada uma destas modificações, foram realizados estudos para analisar as melhorias introduzidas, sendo avaliadas consoante os resultados obtidos pelo MEF.

Para o dimensionamento desta estrutura, o MEF apresenta ser a ferramenta com maior potencial, pois permite o desenvolvimento da estrutura através de um modelo virtual e submete-a a métodos numéricos. Realizado o estudo de cada uma das hipóteses de melhoria, consegue tomar-se uma decisão relativamente às soluções de maior interesse para o desempenho estrutural do modelo. O MEF permite o desenvolvimento desta estrutura, sem a necessidade de recorrer a métodos experimentais e com um menor custo para o projeto.

O *software* utilizado para o dimensionamento por MEF foi o Autodesk Inventor Professional®, versão 2020. Este *software*, para além de ferramentas de métodos numéricos, oferece uma vasta gama de ferramentas para o desenvolvimento do modelo. A realização do dimensionamento da estrutura foi submetida a duas ferramentas deste *software*:

- Análise da estrutura – realizada para efetuar o pré-dimensionamento da estrutura. Esta análise aplica o MEF com recurso aos elementos de viga;
- Análise de tensão – aplicada para o dimensionamento da estrutura. Nesta análise foram efetuadas as análises estáticas e o estudo modal do modelo. Esta ferramenta é utilizada após a construção do modelo 3D da estrutura, através de elementos de malha sólidos e de casca.

Para o desenvolvimento da estrutura, através do MEF, foram analisados os resultados obtidos para cada caso de estudo, tais como a tensão de von Mises, os deslocamentos, o fator de segurança, a deformação equivalente e as frequências naturais de vibração.

A verificação da segurança da estrutura foi efetuada com recurso aos resultados obtidos em cada simulação. Para o dimensionamento da estrutura final foram assumidos alguns valores limites impostos pela empresa, como o deslocamento máximo aceitável de 1,5 mm (estrutura no local da instalação) e um fator de segurança mínimo de 2. A empresa impôs, para este projeto, que a estrutura representasse uma solução leve e robusta, e ainda, uma diminuição das frequências naturais de vibração para a janela de funcionamento da estrutura, 30 a 70 Hz.

3.6.2.3 Pré-dimensionamento

Com a ferramenta de análise de estrutura do *software*, é necessário recriar o modelo alvo de estudo através de um esboço, onde os perfis são representados por linhas e nós. Depois de criado o modelo 3D através de linhas e pontos, o *software* disponibiliza uma biblioteca de perfis, e assim se procede à montagem do modelo (Figura 48).

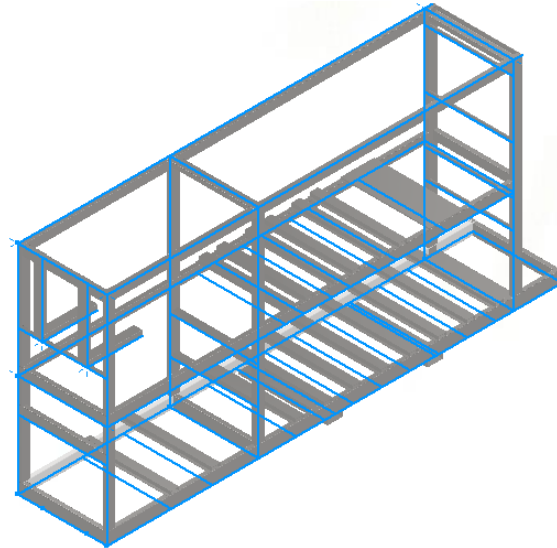


Figura 48: Modelo 3D da estrutura, realizado através da ferramenta “Análise de estrutura”.

Posteriormente ao desenho do modelo, são inseridas as condições fronteira e as forças a que a estrutura está sujeita para cada caso em estudo. No primeiro caso de estudo, é simulado o cenário em que a estrutura se encontra no local de instalação. Na Figura 49 é apresentada a estrutura composta por elementos e nós, onde também se podem observar as cargas e as condições fronteira aplicadas.

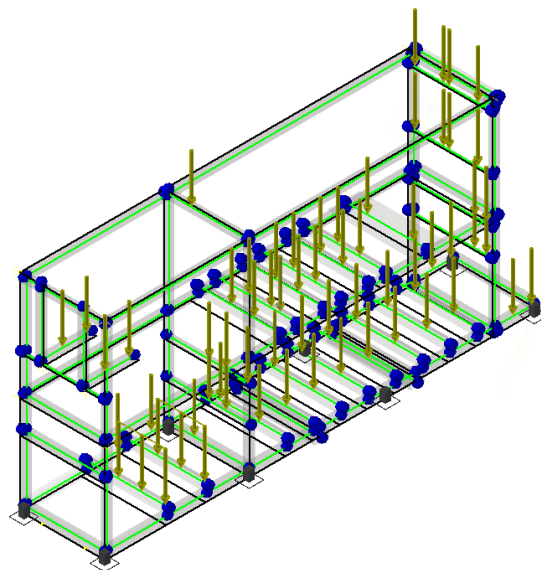


Figura 49: Representação das vigas, dos nós, das cargas e condições fronteira aplicadas à estrutura (1º caso de estudo).

De seguida, são apresentados os resultados obtidos na análise da estrutura por elementos de viga. Na Figura 50 são apresentadas as tensões presentes na estrutura do primeiro caso. É possível verificar que algumas vigas se encontram à compressão, com um valor máximo de 2,11 MPa. Consegue, ainda, visualizar-se algumas zonas da estrutura onde a tensão é próxima da máxima (33,61 MPa).

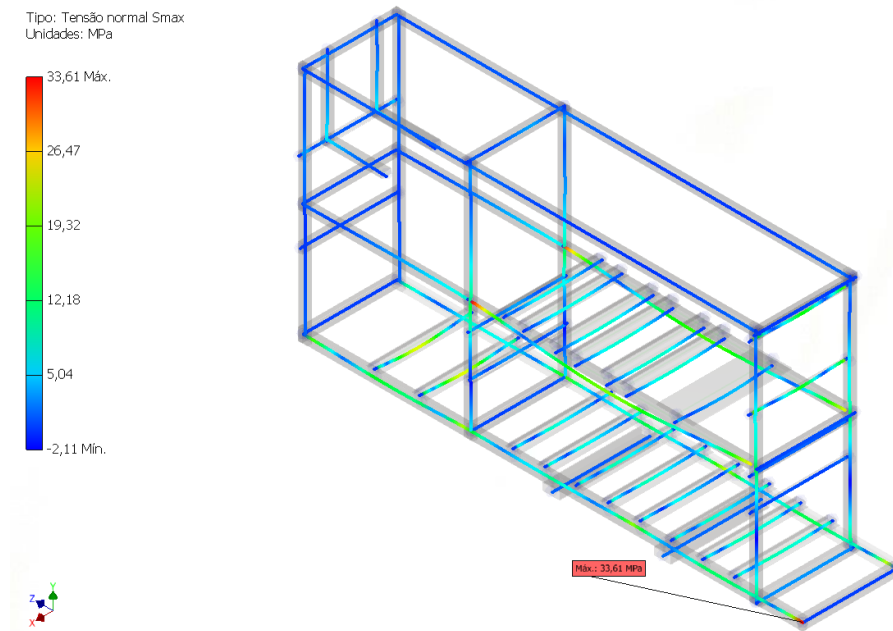


Figura 50: Resultado da tensão do modelo para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Para o primeiro caso de estudo foram determinados os deslocamentos, sendo que o máximo (aproximadamente 1 mm) está presente no patamar superior da estrutura, onde se encontram os compressores de BT (Figura 51).

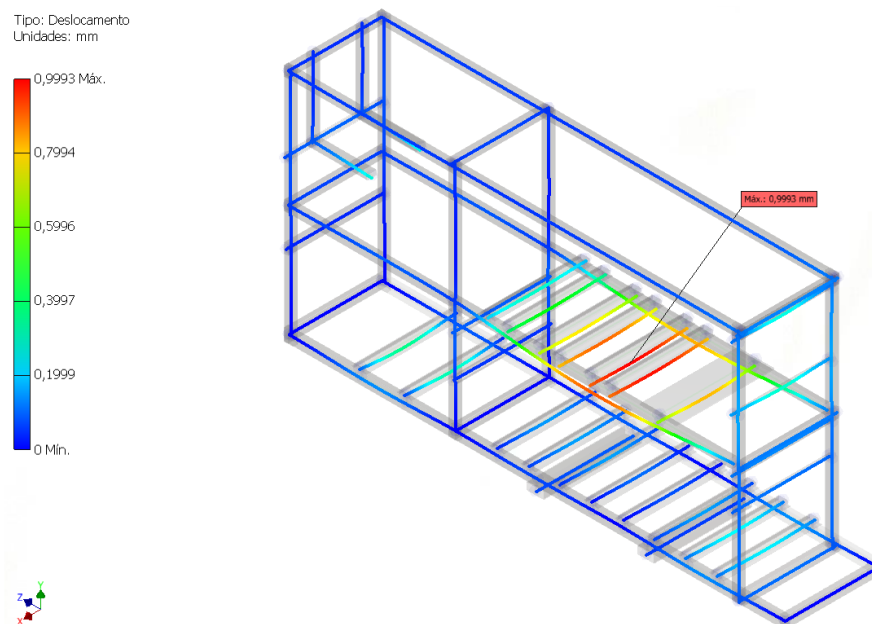


Figura 51: Resultado dos deslocamentos do modelo para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Para realizar um dimensionamento mais adequado, recolheram-se os momentos presentes na estrutura do primeiro caso de estudo. Na Figura 52 são apresentados os momentos em torno do eixo x e verifica-se que diversas secções na estrutura estão sujeitas à faixa mais elevada dos momentos.

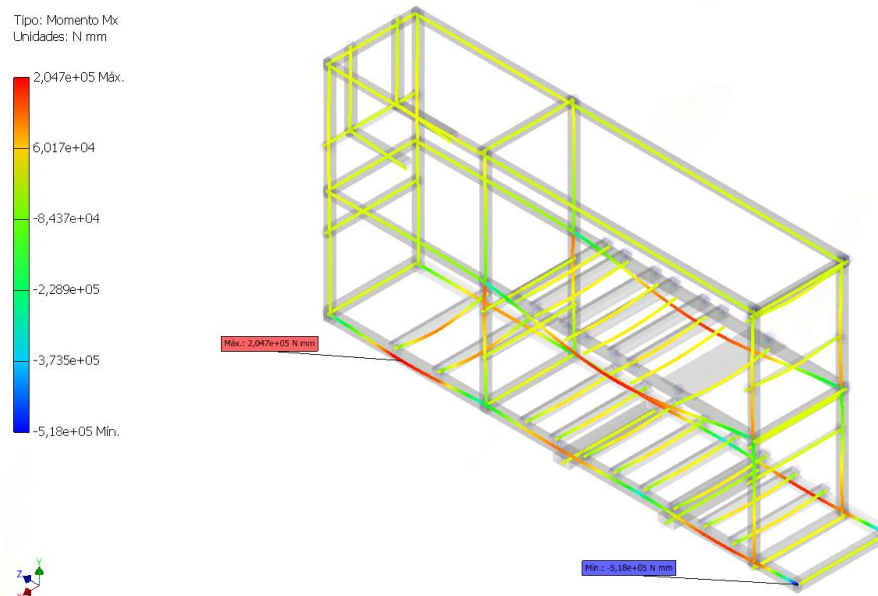


Figura 52: Momentos no eixo x do modelo para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Na Figura 53 são apresentados os momentos obtidos em torno do eixo y. Observa-se que o momento máximo presente na estrutura é de 40412 N·mm.

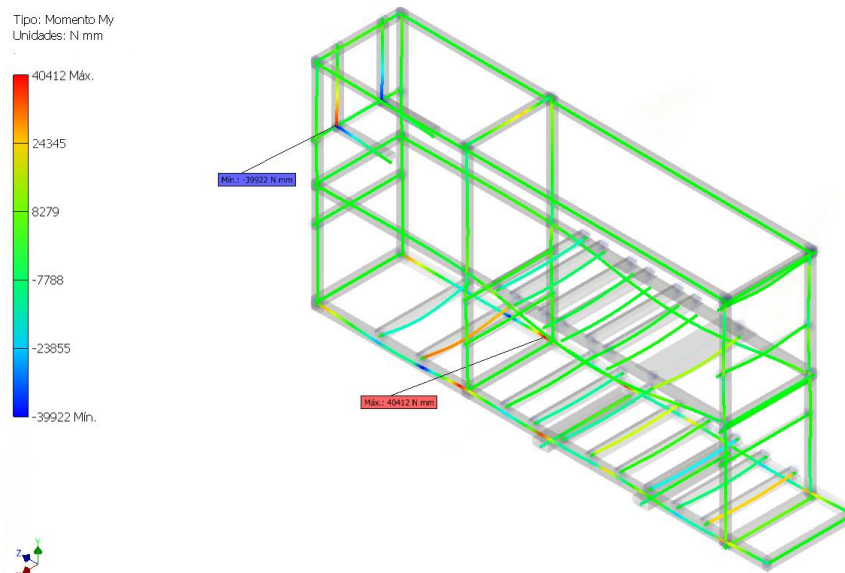


Figura 53: Momentos no eixo y do modelo para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Para o eixo z, os momentos a que a estrutura está sujeita no primeiro caso de estudo são apresentados na Figura 54, e o momento máximo em termos absolutos é de 78618 N·mm.

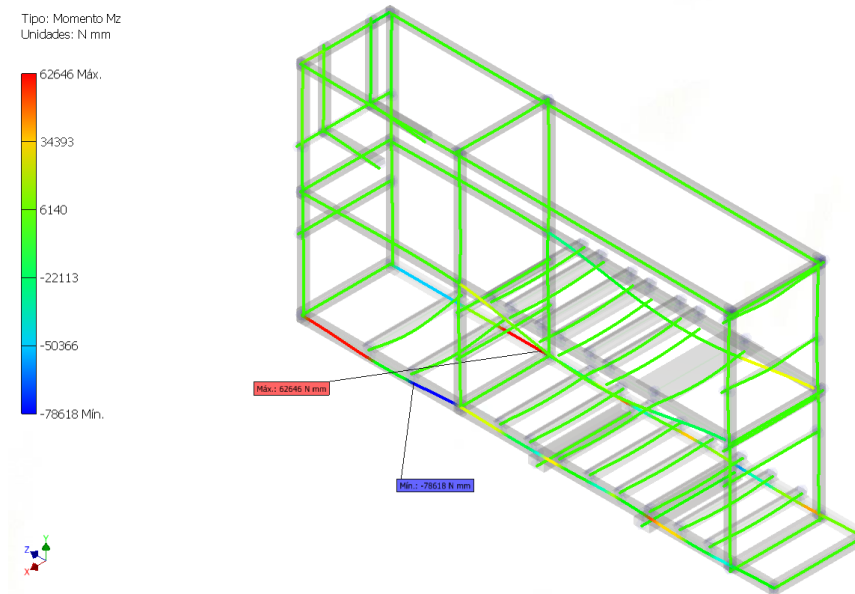


Figura 54: Momentos no eixo z do modelo para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).

No segundo caso de estudo foi realizada a análise da estrutura, quando esta se encontra posicionada nos garfos do empilhador e com todos os equipamentos da central montados nas respetivas posições. A Figura 55 representa o modelo com as suas respetivas forças e condições fronteira impostas no local onde estão posicionados os garfos do empilhador.

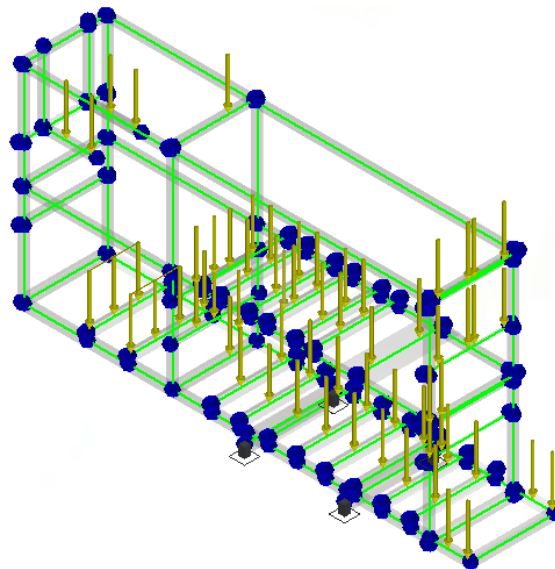


Figura 55: Representação das vigas, dos nós, das cargas e condições fronteira aplicadas à estrutura (2º caso de estudo).

A estrutura apresenta, assim, uma tensão maior que a obtida no caso de estudo anterior. Na Figura 56 são apresentadas as tensões do modelo da estrutura. Obteve-se uma tensão máxima à tração de 120,2 MPa, e à compressão de 4,2 MPa.

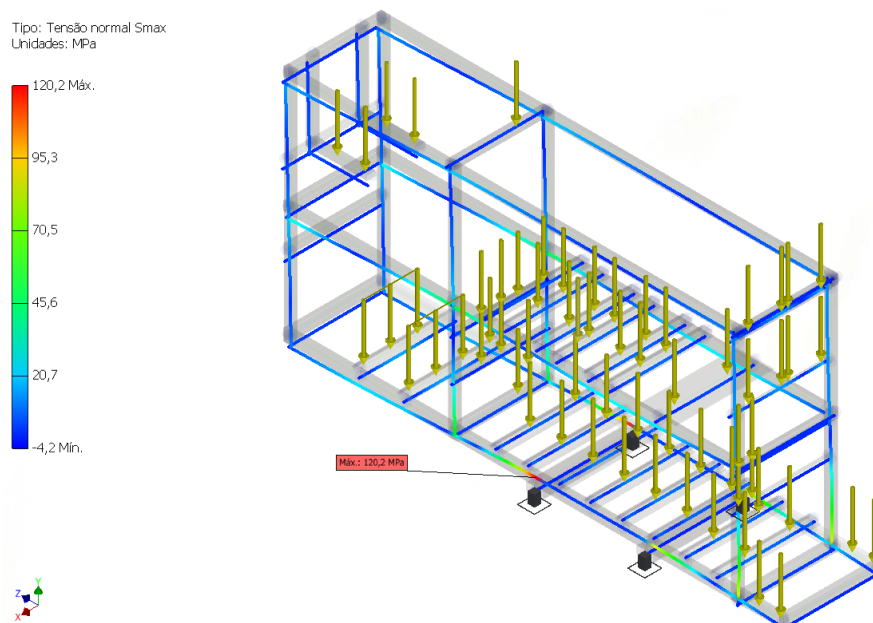


Figura 56: Resultado da tensão do modelo para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Quando se encontra apoiada nos garfos do empilhador, a estrutura apresenta um deslocamento maior nas extremidades da estrutura, devido a estas não se encontrarem apoiadas. Na Figura 57 são apresentados os deslocamentos da estrutura, onde se pode observar que o deslocamento máximo obtido foi de 4,023 mm.

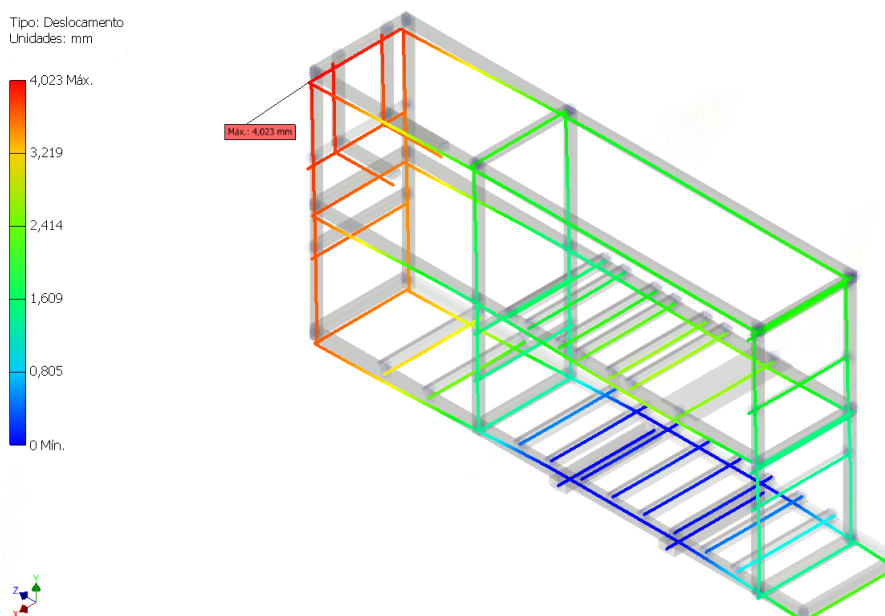


Figura 57: Resultado dos deslocamentos do modelo para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Os momentos em torno do eixo x encontram-se representados na Figura 58, mostrando o momento máximo de $-1,859 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}$.

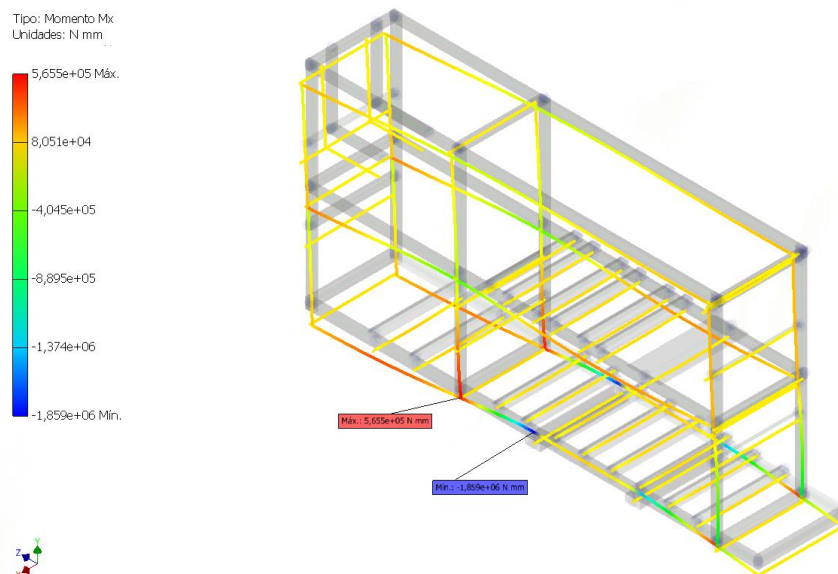


Figura 58: Momentos no eixo x do modelo para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Na Figura 59 são apresentados os momentos obtidos em torno do eixo y. O momento máximo presente foi de 53807 N·mm.

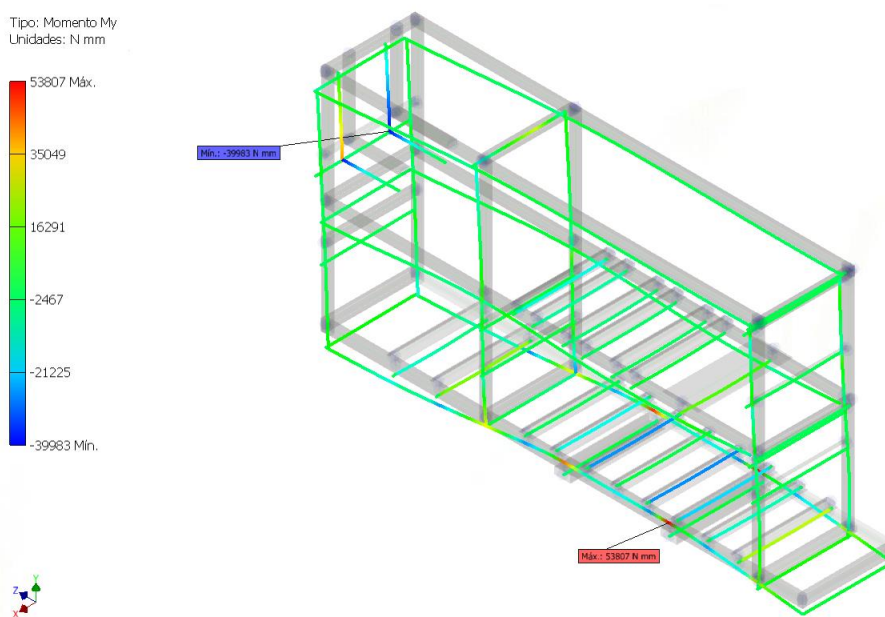


Figura 59: Momentos no eixo y do modelo para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).

A Figura 60 mostra os momentos no eixo z e o valor máximo obtido foi de 50562 N·mm.

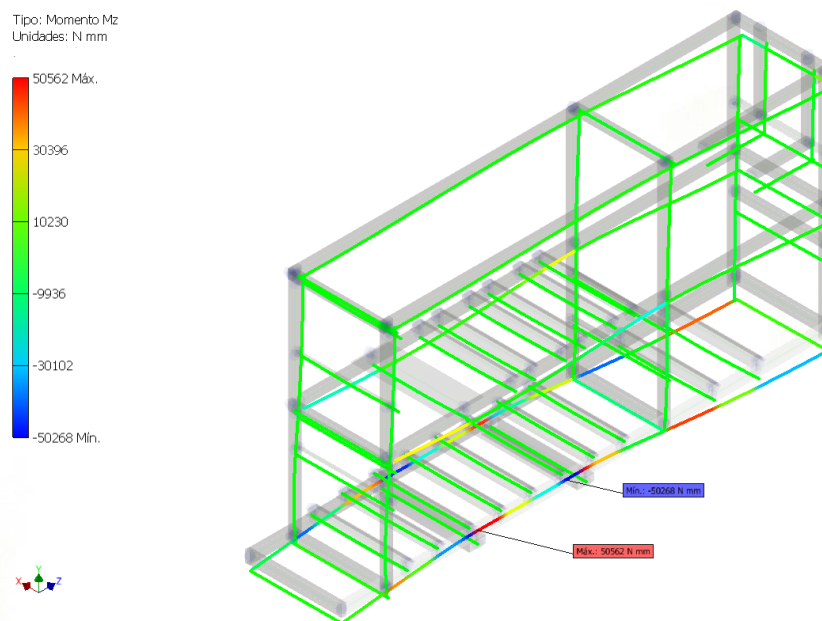


Figura 60: Momentos no eixo z do modelo para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 100 vezes).

Realizada a análise do pré-dimensionamento da estrutura final, consegue avaliar-se os componentes que apresentam as maiores tensões e deslocamentos. Ao longo de todo o processo de dimensionamento são analisados cautelosamente averiguando se satisfazem os requisitos de resistência e rigidez.

Para o primeiro caso de estudo, o deslocamento máximo obtido foi de aproximadamente 1 mm, valor considerado aceitável, mas que será validado no dimensionamento. Por outro lado, as tensões presentes na estrutura encontram-se muito abaixo da tensão de cedência do material, o que demonstra que a estrutura se encontra em segurança.

No segundo caso de estudo, é observável que os perfis da base da estrutura se encontram com a maior solicitação, devido à massa de todos os equipamentos se encontrar sobre estes, traduzindo-se em níveis de tensões mais elevados. A estrutura, neste caso, apresenta um deslocamento máximo de aproximadamente 4 mm, valor que reflete um ganho positivo em comparação à estrutura inicial.

Em suma, os resultados obtidos do pré-dimensionamento da estrutura final demonstram haver uma melhoria da estrutura quando comparada com a estrutura inicial. No entanto, esta comparação será executada com mais detalhe e rigor, no dimensionamento da estrutura apresentado de seguida.

3.6.2.4 Dimensionamento pelo MEF

No pré-dimensionamento a estrutura apenas contém os principais perfis, enquanto no dimensionamento a estrutura contém todos os perfis, esta foi estudada com maior rigor e detalhe. O *software* utilizado foi o referido anteriormente no estudo da estrutura inicial.

Devido à geometria e aos componentes inseridos na estrutura, foram selecionados dois tipos de elementos de malha: uma malha com base nos elementos de casca e outra malha com a utilização de elementos sólidos, o que conduziu assim a uma malha mista. Na Figura 61 encontra-se a estrutura com a aplicação da configuração da malha. Os componentes que se encontram a amarelo foram introduzidos como elementos de casca, enquanto nos restantes foram aplicados elementos sólidos.

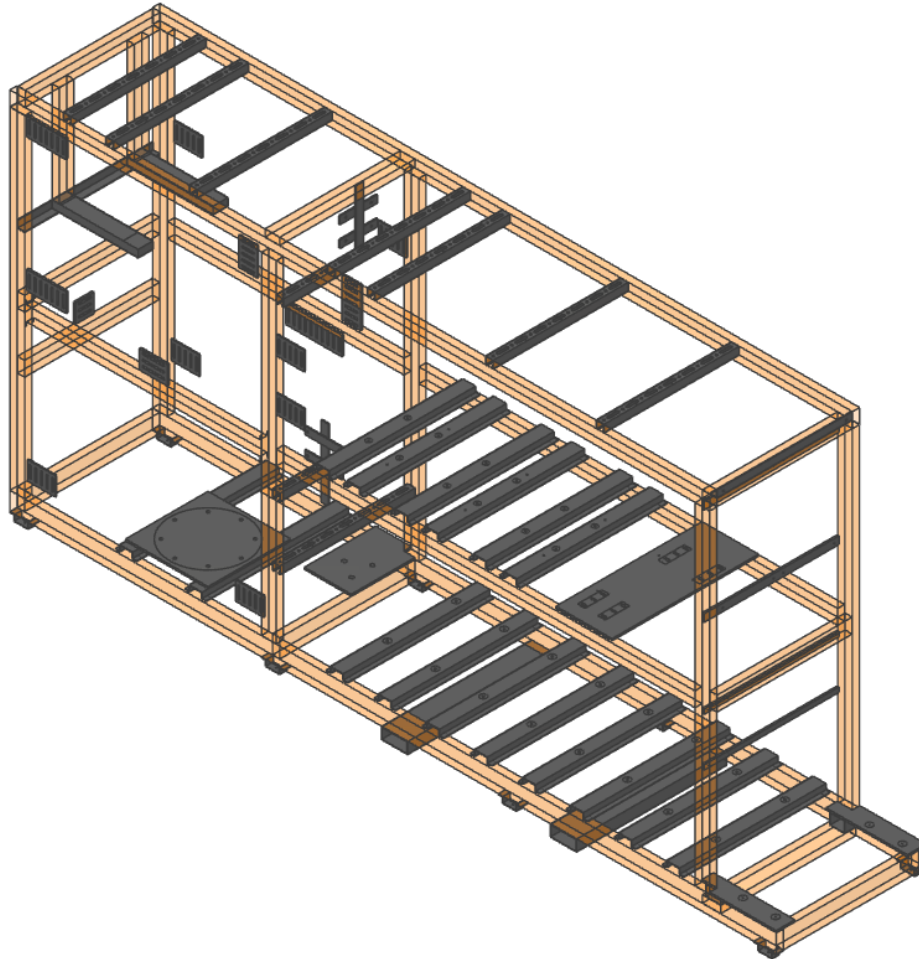


Figura 61: Representação da configuração da malha utilizada.

Na estrutura, foram inseridos elementos de casca nos componentes, que apresentam uma relação entre o comprimento sobre a espessura das peças superior a 100. Os restantes componentes que não satisfazem esta condição, são considerados elementos sólidos. Na Tabela 14 são apresentadas todas as propriedades da malha aplicada à estrutura em estudo. Todos os parâmetros da malha foram explicitados anteriormente no capítulo 3.5.1.

Tabela 14: Configurações da malha utilizada nos estudos dos elementos finitos.

Tipo de malha	Mista com elementos de malha curva
Elementos de sólidos utilizados	Tetraedros parabólicos
Elementos de casca utilizados	Triângulos parabólicos
Tamanho médio dos elementos	0,017
Tamanho médio do elemento em cascas	0,008
Tamanho mínimo dos elementos	0,035
Número de nós	10513433
Número de elementos	6858763

Tabela 15: Estudo de convergência efetuado para a estrutura final.

Estudo	Número de nós	Número de elementos	Tensão de von Mises do ponto de convergência (MPa)	Deslocamentos do ponto de convergência (mm)
1	246763	164543	12	0,571
2	1760386	1064931	13	0,616
3	1871023	1126495	13	0,618
4	2032053	1226818	13	0,639
5	2239675	1354069	13	0,642
6	2584758	1578894	13	0,654
7	3617219	2272863	13	0,66
8	4787612	3047716	13	0,665
9	5242747	3442542	13	0,666
10	5993965	3959983	13	0,671
11	6563424	4303359	13	0,67
12	7916806	5157861	14	0,675
13	10513433	6858763	14	0,675

Para averiguar a adequabilidade da malha e dos resultados obtidos, foi realizado um estudo de convergência da malha para a estrutura final (Tabela 15). Para a realização deste processo, foi considerada, inicialmente, uma malha mais grosseira e, seguidamente, de forma gradual, foi-se incrementando os parâmetros da malha

(refinamento da malha). Este processo é executado até se obter uma convergência da tensão de von Mises e dos deslocamentos de um ponto selecionado para estudo. Este ponto encontra-se no suporte do primeiro compressor de MT, executada uma convergência dos valores com maior exatidão.

A convergência de malha foi realizada para o primeiro caso de estudo e, para o ponto de estudo, a tensão de von Mises tende a estabilizar em 14 MPa (Figura 62). Com as limitações do *software*, não foi possível recolher valores com maior resolução para as tensões de von Mises. Para o último refinamento de malha no ponto de estudo, obteve-se um deslocamento de 0,675 mm e, pelos resultados apresentados anteriormente e pela Figura 63, consegue afirmar-se que esse ponto tende para 0,675 mm.

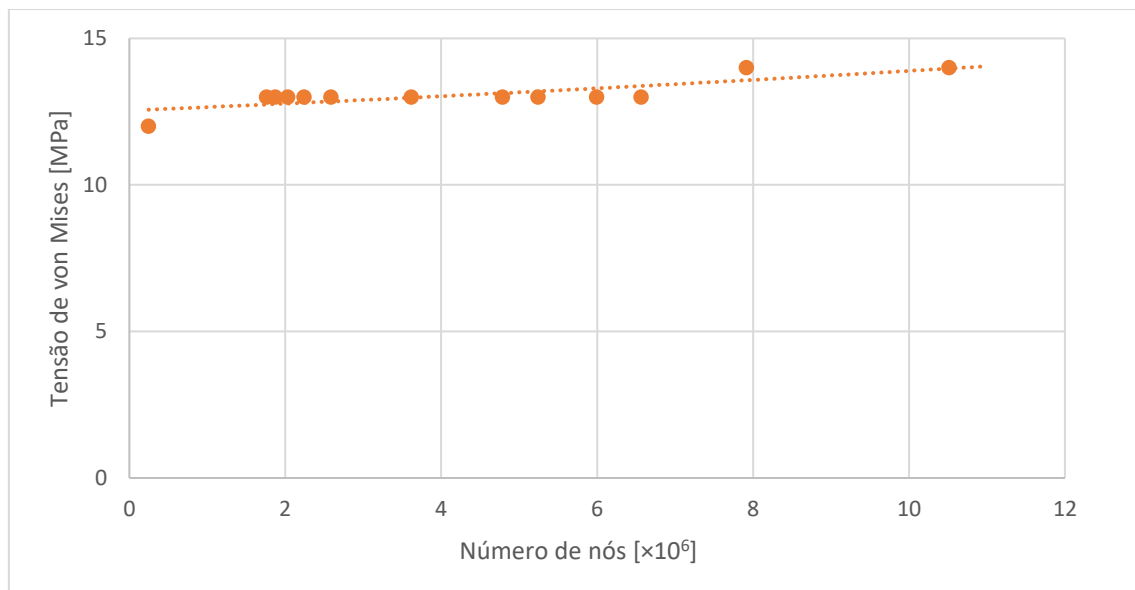


Figura 62: Gráfico de convergência da tensão de von Mises (estrutura final).

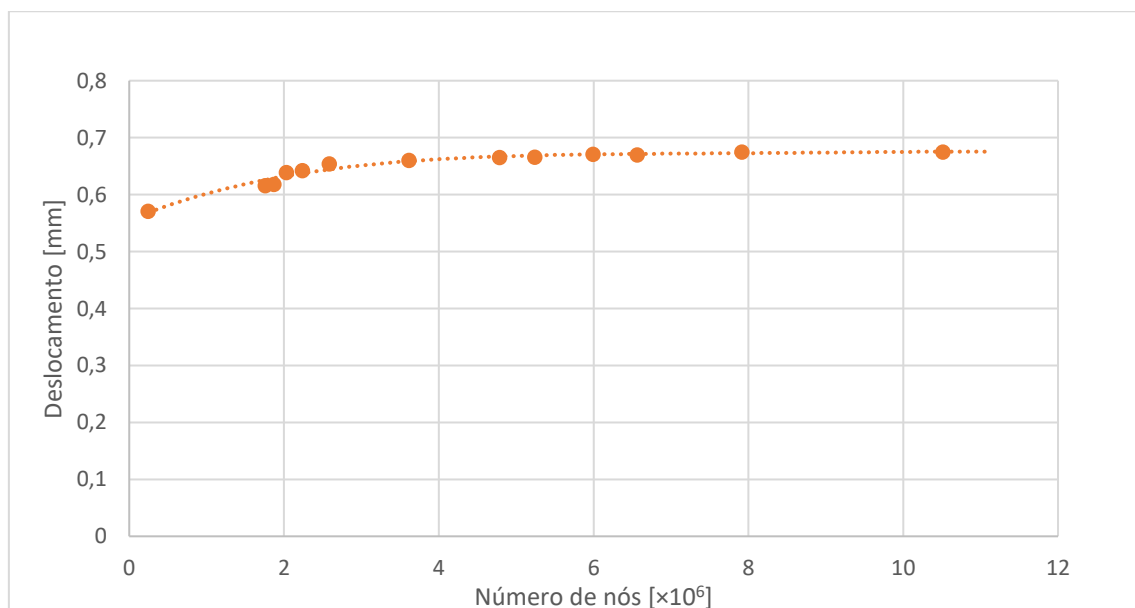


Figura 63: Gráfico de convergência dos deslocamentos (estrutura final).

Na Figura 64 é apresentado o resultado da tensão de von Mises para o primeiro caso de estudo. É possível analisar que a estrutura apresenta uma baixa faixa de tensões. As zonas que apresentam maiores valores são o patamar dos compressores de BT, as uniões dos perfis, os perfis *omegas* do patamar inferior e os perfis da base.

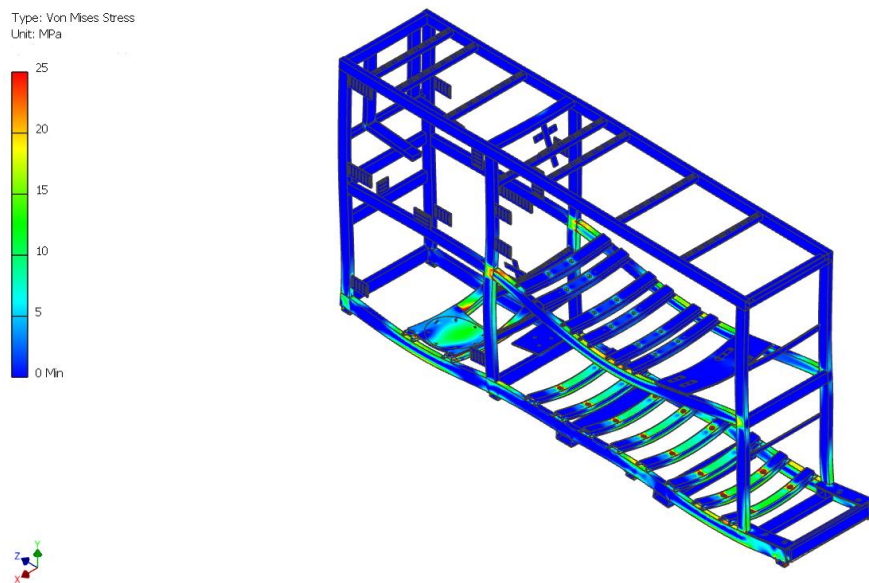


Figura 64: Resultado da tensão de von Mises para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Considerando o deslocamento resultante para a estrutura (Figura 65), o deslocamento máximo encontra-se no patamar dos compressores de BT, com o valor de 1,107 mm. Também se observam deslocamentos significativos, embora inferiores, nos perfis de fixação do depósito de óleo e na zona central dos perfis *omegas* dos compressores MT.

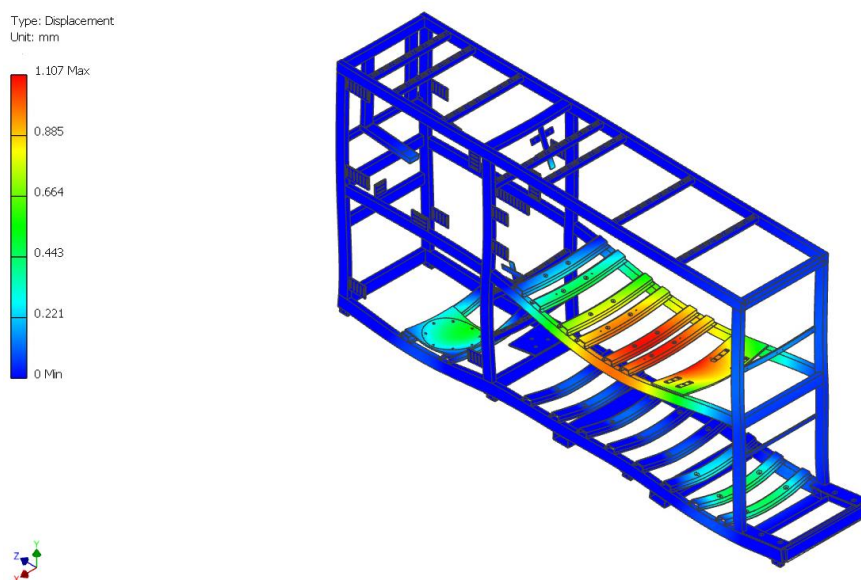


Figura 65: Resultado dos deslocamentos resultantes para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Para a estrutura final a deformação equivalente encontra-se representada na Figura 66. É possível verificar a existência de deformação nas uniões dos perfis, nos perfis da base, nos perfis do patamar dos compressores de BT e, ainda, nos perfis *omegas* da estrutura.

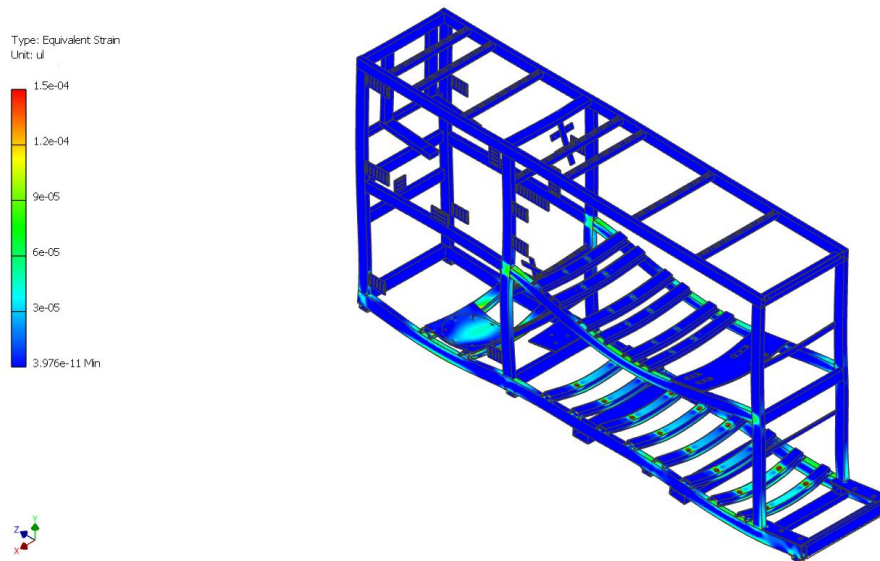


Figura 66: Resultado da deformação equivalente para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

A Figura 67 ilustra o fator de segurança obtido para a estrutura do primeiro caso de estudo. É possível analisar que a estrutura se encontra em segurança e que os coeficientes de segurança mínimos obtidos na estrutura são localizados nas uniões dos perfis e nos apoios da mesma, devido a serem pontos de concentração de tensões.

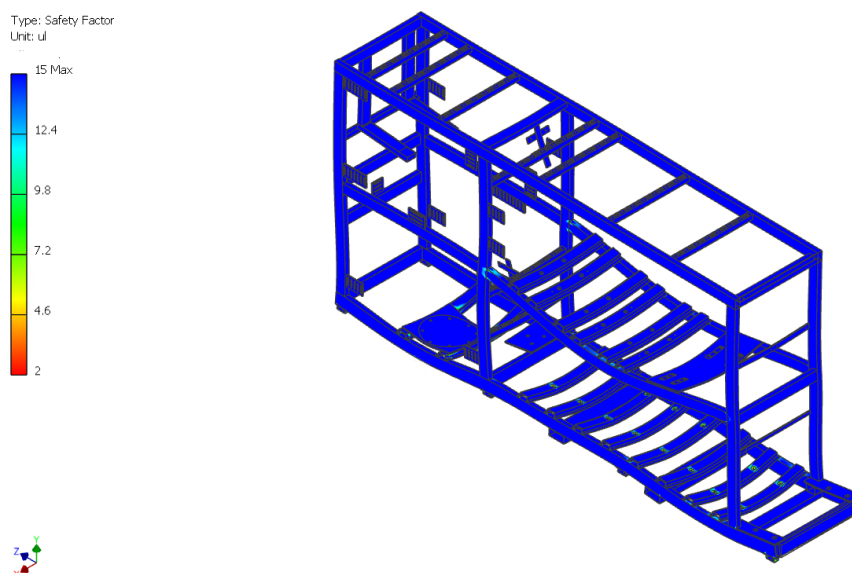


Figura 67: Resultado do fator de segurança para o 1º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Após a realização do estudo estático da estrutura para o primeiro caso de estudo, foi efetuado o estudo modal para averiguar as frequências naturais de vibração da

estrutura. À semelhança do estudo executado para a estrutura inicial, também se observaram frequências naturais de vibração locais.

Para a estrutura final obtiveram-se 26 frequências naturais de vibração, designadamente: 3,37 Hz; 15,23 Hz; 17,24 Hz; 20,16 Hz; 30,98 Hz; 33,79 Hz; 36,02 Hz; 39,59 Hz; 42,77 Hz; 53,22 Hz; 63,24 Hz; 64,17 Hz; 64,37 Hz; 64,85 Hz; 65,51 Hz; 67,85 Hz; 68,46 Hz; 68,81 Hz; 68,94 Hz; 71,67 Hz; 73,24 Hz; 76,99 Hz; 85,17 Hz; 91,39 Hz; 94,44 Hz e 96,75 Hz.

Das 26 frequências naturais de vibração 13 são locais e as restantes estruturais. A diferença entre as locais e as estruturais, é que as primeiras apenas afetam um componente específico, enquanto as outras atuam na estrutura. Para o dimensionamento, as frequências naturais de vibração estruturais apresentam maior impacto. Como tal, para a estrutura final as frequências naturais de vibração estruturais são: 3,37 Hz; 15,23 Hz; 17,24 Hz; 20,16 Hz; 30,98 Hz; 33,79 Hz; 36,02 Hz; 39,59 Hz; 42,77 Hz; 53,22 Hz; 85,17 Hz; 94,44 Hz e 96,75 Hz.

Na Figura 68 são apresentados os deslocamentos (em mm) da estrutura, quando sujeita à frequência de 39,59 Hz.

A central de refrigeração tem como frequência de funcionamento de 50 Hz, mas os compressores com variador de velocidade apresentam um intervalo de funcionamento de frequências de 30 a 70 Hz. Para este intervalo, foram identificadas 6 frequências naturais de vibração. Para solucionar este conflito, os variadores Danfoss® utilizados na central permitem limitar 4 frequências de funcionamento. Como tal, são introduzidas as seguintes frequências de limitação: 36,02 Hz; 39,59 Hz; 42,77 Hz e 53,22 Hz. Após a exposição deste problema à empresa, a nível técnico da refrigeração a limitação dos compressores com variador de velocidade de 34 a 70 Hz não induzem falhas no desempenho da central.

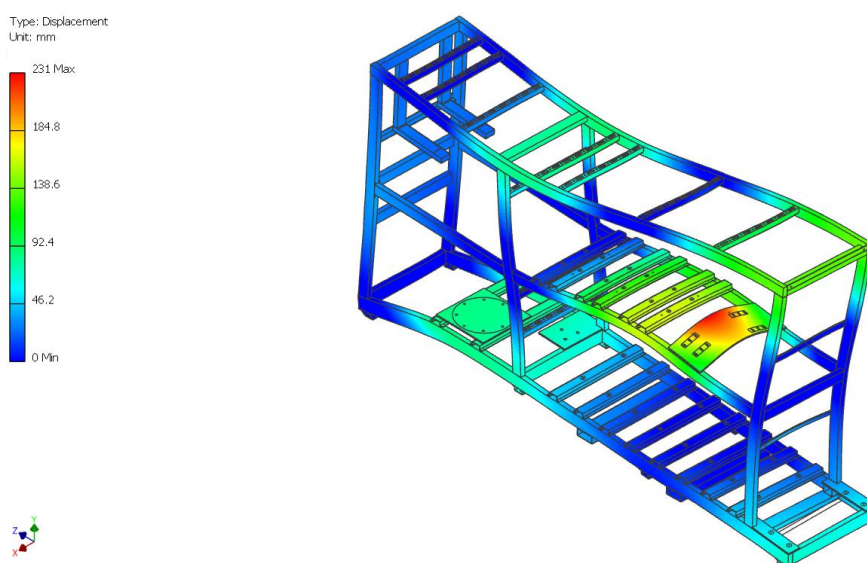


Figura 68: Resultado da frequência natural de vibração da estrutura de 39,59 Hz (deslocamentos ampliados 50 vezes).

A Figura 69 mostra os deslocamentos (em mm) da estrutura, quando está sujeita à frequência de 64,85 Hz (frequência natural de vibração local).

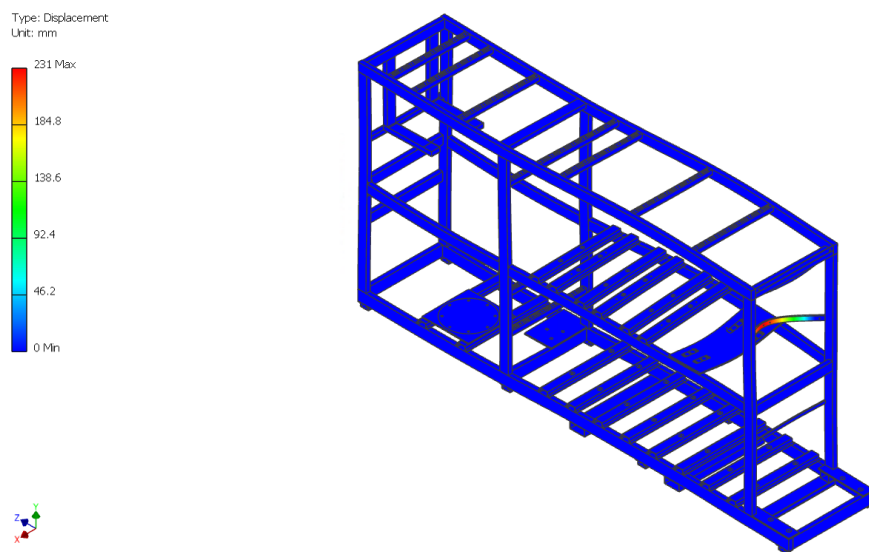


Figura 69: Resultado da frequência natural de vibração local de 64,85 Hz (deslocamentos ampliados 50 vezes).

No segundo caso de estudo, nota-se que a estrutura apresenta uma faixa maior de tensões (Figura 70), quando comparada com a do primeiro caso, uma vez que se encontra apoiada apenas nos perfis de guiamentos dos garfos do empilhador. Assim, as cargas encontram-se sobre os perfis da base da estrutura, o que origina flexão acentuada nestes perfis e, por conseguinte maior tensão. O mesmo acontece nas ligações entre os perfis da base e os perfis verticais da estrutura.

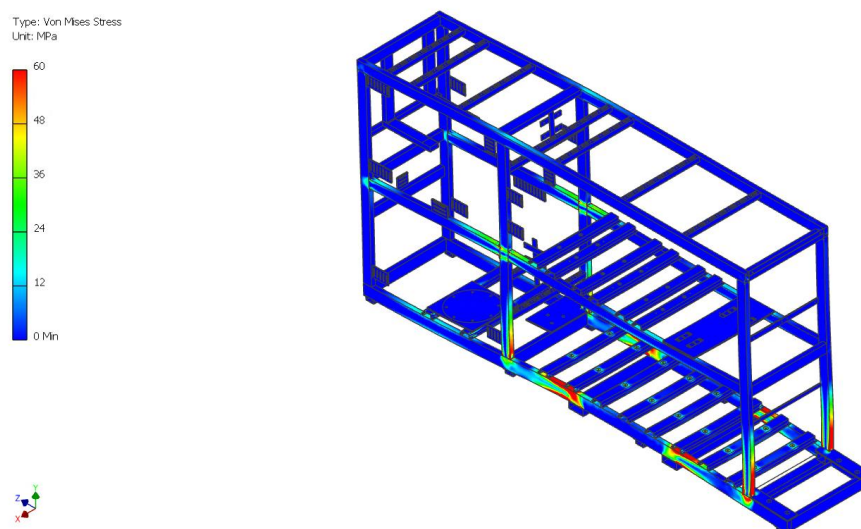


Figura 70: Resultado da tensão de von Mises para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Devido à estrutura se encontrar apenas apoiada pelos garfos do empilhador no CM da central, é expectável que os deslocamentos máximos estejam presentes nas

extremidades da mesma. A Figura 71 mostra os deslocamentos resultantes da estrutura, e é na extremidade da estrutura onde são apresentados os deslocamentos máximos.

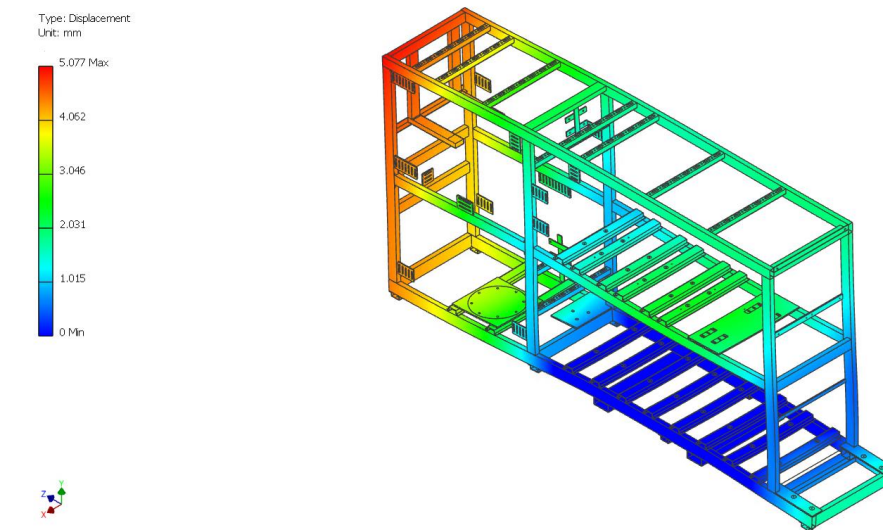


Figura 71: Resultado dos deslocamentos para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Na Figura 72 é apresentado o resultado da deformação equivalente, a estrutura apresenta deformação equivalente superior nos locais onde há maior concentração de tensão de von Mises, tais como, perfis da base, perfis verticais e uniões dos perfis.

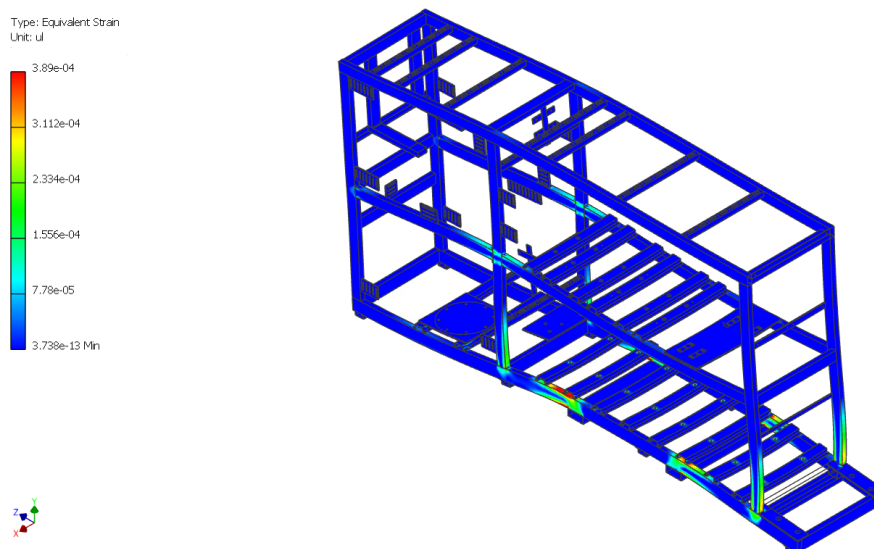


Figura 72: Resultado da deformação equivalente para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Devido às condições deste caso de estudo e como referido anteriormente, há uma maior faixa de tensão, o que torna expectável que a estrutura apresente menor fator de segurança (Figura 73). Os perfis da base comparando com os restantes perfis apresentam um menor fator de segurança. Dado que estes se encontram à flexão, é possível verificar que o coeficiente de segurança é menor na parte superior e inferior dos perfis da base.

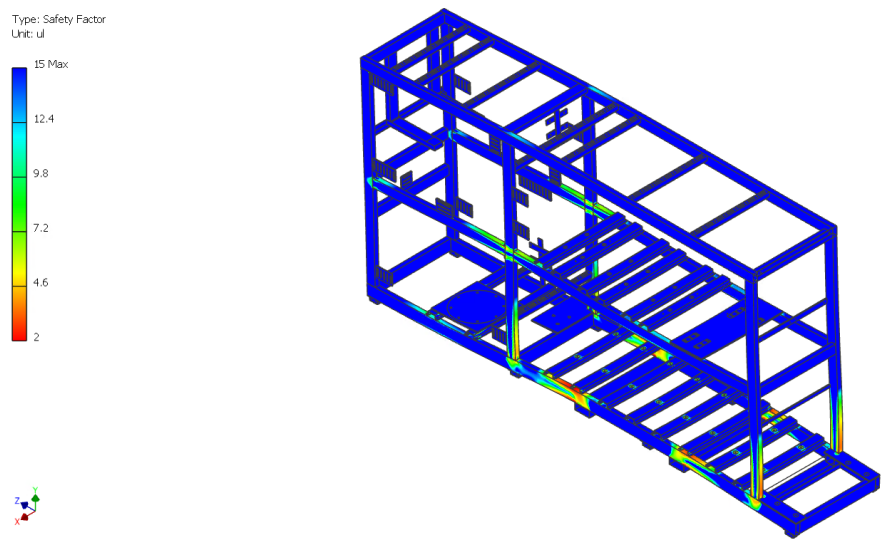


Figura 73: Resultado do fator de segurança para o 2º caso de estudo (deslocamentos ampliados 50 vezes).

Para averiguar a melhoria no desempenho da estrutura, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos no pré-dimensionamento e no dimensionamento (Tabela 16), onde se verificam algumas diferenças. Estas divergências devem-se ao facto de no dimensionamento serem todos os componentes da estrutura e no pré-dimensionamento serem introduzidos apenas os principais componentes da estrutura. No pré-dimensionamento, devido a limitações do *software*, não foi possível realizar um estudo de convergência.

Tabela 16: Comparação dos resultados do pré-dimensionamento vs. dimensionamento.

Resultados		Pré-dimensionamento	Dimensionamento
1º caso de estudo	Tensão máxima	33,6 MPa	37,2 MPa
	Deslocamento resultante máximo	0,999 mm	1,107 mm
	Fator de segurança mínimo	7,0	6,3
2º caso de estudo	Tensão máxima	120,2 MPa	151,7 MPa
	Deslocamento resultante máximo	4,023 mm	5,077 mm
	Fator de segurança mínimo	2,0	1,5

A estrutura final, para o primeiro caso de estudo, apresenta resultados excelentes que satisfazem todos os requisitos de projeto, desde o deslocamento máximo permitido

para a estrutura no local de instalação (deslocamento máximo obtido valida este requisito com distinção) até à verificação do fator de segurança. É ainda notório que a estrutura apresenta um nível de tensões de von Mises aceitável ao longo da estrutura. Ainda para o primeiro caso de estudo, a estrutura final apresenta 6 frequências naturais de vibração, no intervalo de funcionamento da central (30 a 70 Hz), para que não ocorra o colapso da estrutura por ressonância. Assim, foi inserida, no variador, a restrição de não funcionamento para 4 dessas frequências. Para as restantes frequências, foi reduzido o intervalo de funcionamento para 34 a 70 Hz, visto que esta alteração não tem impacto no sistema de refrigeração.

No segundo caso de estudo, a estrutura final apresenta um nível de tensões mais elevado nos perfis da base e nas uniões dos perfis. Os perfis da base sofrem flexão, pelo que a estrutura apresenta maior deslocamento nas suas extremidades. No entanto, o deslocamento máximo obtido é de, aproximadamente, 5 mm. Neste caso de estudo, a estrutura validou todos os requisitos de projeto.

Considerando os resultados obtidos para o dimensionamento da estrutura final, consegue afirmar-se que a estrutura final apresenta melhorias significativas relativamente à estrutura inicial, tais como redução de massa, minimização dos deslocamentos, obtenção de um fator de segurança que satisfaz os requisitos de projeto, minimização das tensões e introdução de soluções mais práticas para a realização da montagem da estrutura.

3.6.2.5 Ligações soldadas

Para o projeto em desenvolvimento as ligações soldadas são a opção de eleição, visto que não é necessário introduzir ligações amovíveis, uma vez que se pretende uma estrutura única. Para a análise das ligações soldadas recorreu-se ao *software* de elementos finitos, onde foram selecionadas todas as arestas onde são localizadas soldas. Após a seleção de todas as arestas e analisadas os pontos críticos, conclui-se que as soldaduras apresentadas na Figura 74 (ligação da base com o perfil vertical entre o reservatório de líquido e os compressores) para o segundo caso de estudo são as que apresentam as condições mais desfavoráveis (esforço normal de 2353 N e um momento fletor de $5,655 \times 10^5$ N·mm).

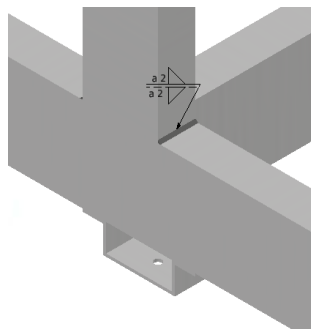


Figura 74: Representação e nomenclatura das soldaduras a dimensionar.

Após a identificação das soldas relevantes, procedeu-se ao seu dimensionamento. O EC3-1-8 (Eurocódigo 3 parte 1-8) é o normalmente utilizado para verificar e dimensionar as ligações soldadas. No entanto, devido à espessura dos perfis ser inferior a quatro milímetros é necessário consultar o EC3-1-3 (Eurocódigo 3 parte 1-3), de modo a calcular a resistência da soldadura ($F_{w,Rd}$)

$$F_{w,Rd} = t_p \cdot L_{w,s} \left(0,9 - 0,45 L_{w,s} / b \right) f_u / \gamma_{M2} = 10368 \text{ N},$$

onde:

t_p :	Espessura do perfil;	2 mm
$L_{w,s}$:	Comprimento efetivo da solda em canto;	40 mm
b :	Largura do perfil;	40 mm
f_u :	Tensão última à tração do material;	360 MPa
γ_{M2} :	Coeficiente parcial de segurança;	1,25

O EC3-1-3 estipula que o tamanho da garganta seja pelo menos igual à espessura do material, o que permite definir a garganta efetiva do cordão de soldadura (a) igual a 2 mm. Identificados os esforços a que soldadura está sujeita, referidos anteriormente, é calculado esforço atuante no cordão de soldadura ($F_{w,Ed}$).

$$F_{w,Ed} = \frac{2353}{2} + \frac{5,655 \times 10^5}{100 \times 2} = 4004 \text{ N}.$$

Calculado o esforço atuante no cordão de soldadura ($F_{w,Ed}$) e conhecida a resistência da soldadura ($F_{w,Rd}$), procede-se à validação através do método simplificado

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \Leftrightarrow 4004 \leq 10368 \text{ N} \rightarrow \text{Verifica}.$$

Após a validação, foi executado o cálculo do coeficiente de segurança das ligações soldadas (CS_{Is})

$$CS_{Is} = \frac{10368}{4004} = 2,59.$$

As ligações soldadas em filete, com uma garganta efetiva da solda de 2 mm, suportam os esforços a que estão sujeitas com um coeficiente de segurança de 2,59. Desta forma, os requisitos do Eurocódigo para as ligações soldadas encontram-se validados e, é verificado o coeficiente de segurança para a estrutura. No entanto, é recomendado a realização de uma inspeção das ligações soldadas na execução da obra, devido aos perfis utilizados apresentarem espessuras reduzidas que pode levar ao aparecimento de curvatura ou fissuras na região termicamente afetada devido à contração da soldadura.

3.6.2.6 Acabamentos

Numa fase final da produção da estrutura são introduzidos alguns componentes adicionais para o aspeto do produto final. Para além de motivações estéticas, o principal objetivo para a inserção destas peças prende-se com questões técnicas da estrutura, que se podem traduzir em melhorias.

Após a montagem da estrutura final, é necessário introduzir suportes para a fixação de válvulas, por serem um requisito essencial para que não ocorram vibrações na tubagem, causando uma anomalia no funcionamento da central frigorífica ou a rotura das soldas da tubagem. Para além dos suportes, foi introduzida uma calha onde são montadas abraçadeiras que fixam a tubagem (Figura 75).

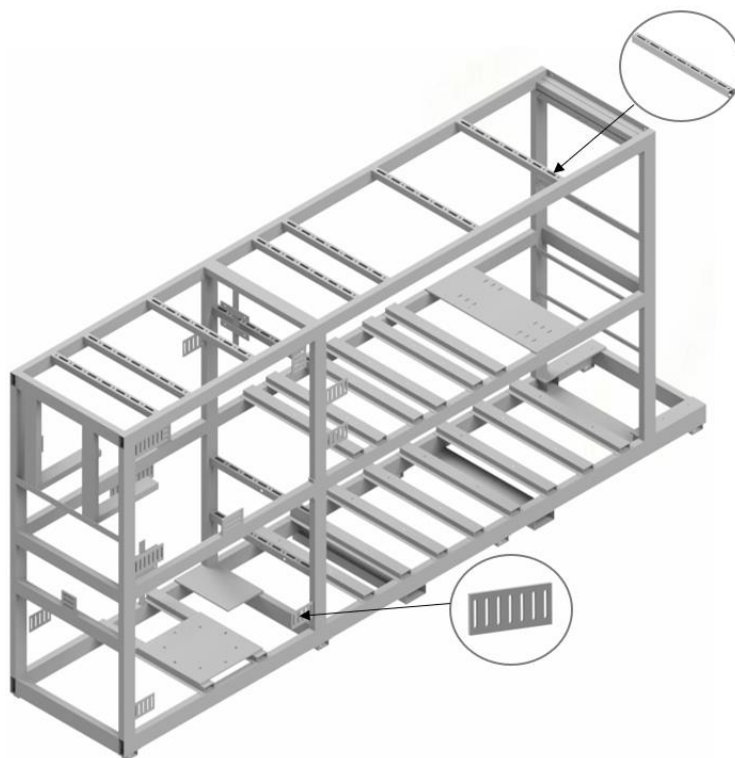


Figura 75: Representação dos suportes das válvulas e da calha de fixação da tubagem.

A estrutura é fabricada através de perfis, obtidos através de corte. Como tal, é necessário remover todas as limalhas resultantes deste processo e executar uma limpeza a toda a estrutura, para remover as impurezas e gorduras resultantes do processo de montagem.

Posteriormente, são aplicados os topos dos perfis para evitar a exposição do seu interior, de maneira a evitar a entrada de poeiras e humidade.

Para finalizar o processo do fabrico da estrutura, é realizada uma pintura a toda a envolvente, de modo a evitar o contacto direto da superfície do material com a atmosfera. A aplicação de uma camada de tinta na superfície permite proteger o material da corrosão/oxidação.

A introdução destes acabamentos fornece à estrutura uma melhor aparência, para além de todos os aspetos técnicos referidos anteriormente. Finaliza-se assim o processo de fabrico da estrutura e dá-se início ao processo de montagem da central frigorífica.

3.7 Desenhos de pormenor

Realizado o dimensionamento da estrutura foram executados os desenhos da estrutura final de modo a fornecer a informação essencial para efetuar a construção da estrutura. Seguidamente na Figura 76 e Figura 77 é apresentada a vista frontal e a perspetiva isométrica da estrutura, respetivamente. Os desenhos técnicos serão apresentados cotados e com maior detalhe no Anexo 1 (desenhos de pormenor da solução final (montada e explodida com lista de peças) e os desenhos dos componentes individuais).

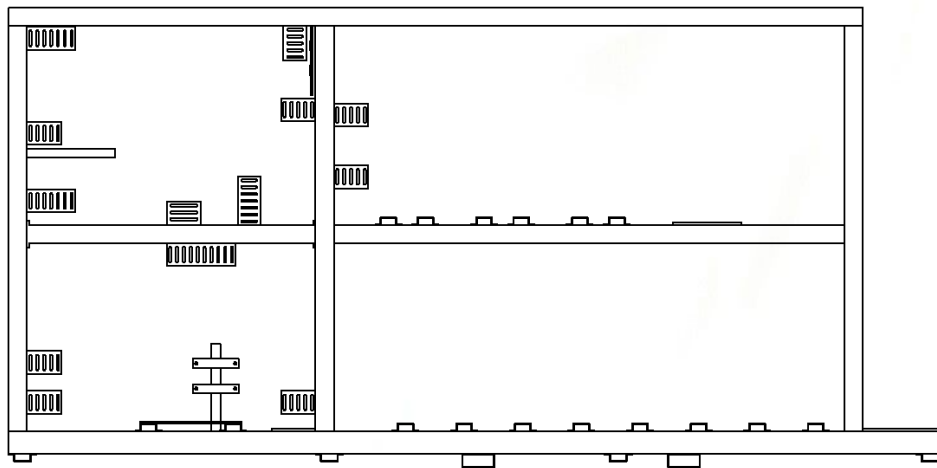


Figura 76: Vista frontal da estrutura final.

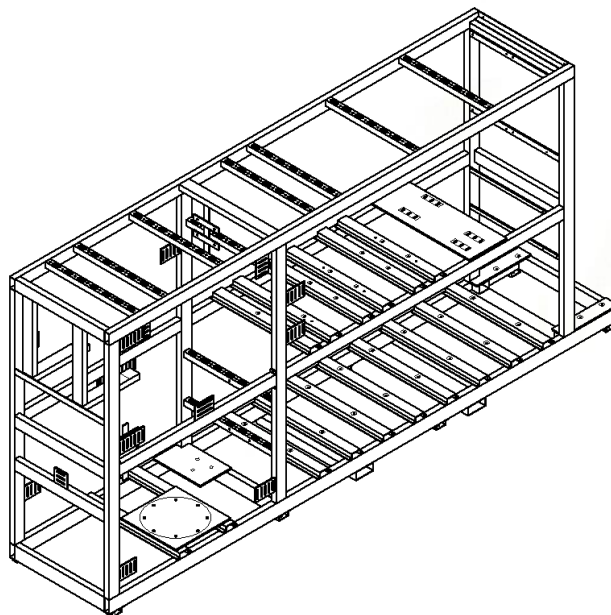


Figura 77: Vista isométrica da estrutura final.

3.8 Materiais

Na estrutura final, optou-se pela utilização de perfis estruturais em aço. A construção da estrutura através de perfis estruturais com alumínio material foi descartada devido às cargas elevadas, o que implica a seleção de uma liga de alumínio de maior resistência e o respetivo aumento do custo da solução final.

No entanto, a aplicação de perfis estruturais de aço à estrutura apresenta ser uma solução de massa superior à aplicação de perfis em alumínio. Por outro lado, em comparação aos aluminios, os aços oferecem uma melhor soldabilidade, essencial para as ligações soldadas na estrutura. Por este aspeto, no projeto em desenvolvimento a empresa tem preferência pela utilização de ligações soldadas sobre as ligações aparafusadas.

Os fornecedores de materiais disponibilizam uma vasta gama de perfis e materiais. Para os perfis tubulares retangulares, as classes de aço utilizadas para a sua produção são os aços de construções mecânicas (E) e os aços estruturais (S). Os aços de construções mecânicas foram excluídos, pois são produzidos através do processo de laminagem a frio, apresentando assim mais imperfeições (curvas de encurvadura). Ainda, o principal motivo que levou à seleção de aços estruturais sobre os aços de construção mecânica foi que estes absorvem mais energia na zona plástica do material. Apesar de o aço estrutural e o de construção mecânica apresentarem uma tensão de rotura semelhante, o aço estrutural apresenta uma tensão de cedência muito superior. Na Tabela 17 é possível verificar as propriedades dos materiais disponíveis para os perfis, e ainda verificar a diferença na tensão de rotura entre as duas classes dos materiais.

Tabela 17: Propriedade dos materiais disponíveis para a construção da estrutura [79].

Designação	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Percentagem de alongamento
E235	235	390	7
E275	275	440	6
S235JR	235	360-510	17
S275JR	275	430-580	15

O material selecionado perante a gama de materiais disponíveis foi o aço S235JR. As tensões a que a estrutura apresenta são inferiores à tensão de cedência deste material, e ainda satisfazendo o coeficiente de segurança imposto. Este material oferece também à estrutura uma solução com boa resistência mecânica, boas propriedades de soldabilidade (essencial para as ligações soldadas) e economicamente atrativa.

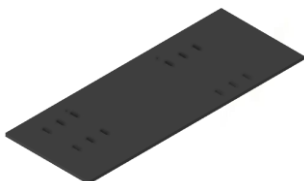
3.9 Processos de fabrico

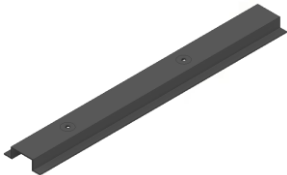
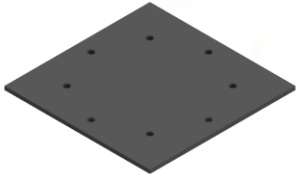
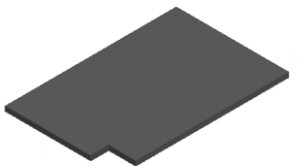
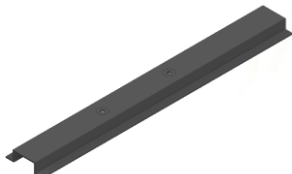
Para a construção da estrutura optou-se por perfis padrão disponibilizados no mercado dos materiais, o que facilita o processo de aquisição dos mesmos e minimiza os custos da solução final, por não ser necessário fabricar componentes personalizados.

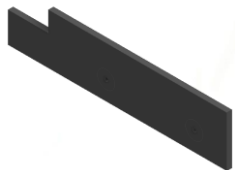
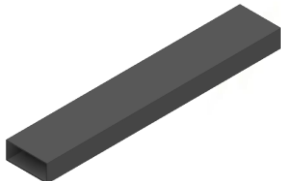
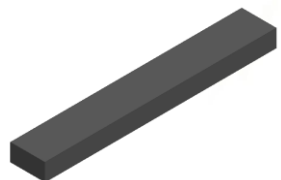
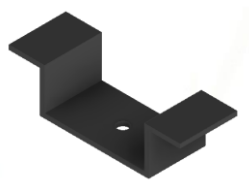
Para o fabrico dos componentes da estrutura, preferiu-se a seleção de processos de fabrico comuns do quotidiano, agilizando o processo de construção da estrutura. A estrutura é composta por 24 peças diferentes e, na Tabela 18, são apresentados os processos de fabrico envolvidos para cada componente da estrutura.

Tabela 18: Lista de peças e respetivos processos de fabrico.

Peça	Representação	Quantidade	Comprimento [mm]	Processos de fabrico
Perfil da base		2	4084	• Corte.
Perfil transversal da base		4	720	• Corte.
Perfil transversal		6	720	• Corte.
Perfil vertical		6	1768	• Corte.
Perfil do topo		2	3730	• Corte.

Perfil do patamar dos compressores BT		2	2230	• Corte.
Perfil da secção do depósito de óleo		1	1260	• Corte.
Perfil da secção do depósito de óleo (ligação aparafusada)		1	1260	• Corte; • Soldadura; • Furação.
Suporte dos permutadores de AQS /compressor em paralelo		1	[-]	• Corte; • Furação.
Suporte para permutador		2	[-]	• Corte; • Soldadura; • Furação.
Calha de suporte da tubagem		10	720	• Corte.
Suporte para componentes		14	[-]	• Corte; • Furação.

Perfil de fixação dos compressores MT		10	780	• Corte; • Furação.
Suporte do depósito de líquido		1	[-]	• Corte; • Furação.
Suporte do separador de óleo		1	[-]	• Corte.
Perfil de fixação dos compressores BT		6	780	• Corte; • Furação.
Suporte dos variadores		1	[-]	• Corte; • Furação.
Suporte do variador do compressor em paralelo		1	[-]	• Corte; • Furação.
Perfil de apoio do quadro elétrico		2	60	• Corte.

Suporte de fixação do quadro elétrico		2	[-]	• Corte; • Furação.
Cantoneira		2	720	• Corte.
Perfil para encaixe dos garfos do empilhador		2	800	• Corte.
Perfil de suporte do grupo de emergência		4	535	• Corte.
Apoios dos pés de nivelamento antivibráticos		8	40	• Corte; • Furação.

3.10 Análise económica

Com o objetivo de verificar se a estrutura representa uma solução economicamente viável, foi efetuada a sua análise económica. Para a construção da estrutura é necessário contabilizar os custos dos materiais, do processo de soldadura, da pintura e da mão de obra.

A estrutura é constituída por perfis comuns no mercado, e os preços apresentados para os materiais encontram-se conforme os praticados no mês de julho de 2021. Na Tabela 19 são apresentados os custos dos materiais necessários para a construção da estrutura.

Tabela 19: Custos dos materiais necessários para o fabrico da estrutura.

Materiais	Dimensões	Preço unitário com IVA	Quantidade	Custo
Perfil tubular (100×40×2 mm ³)	(6000 mm)	68,29 €	2	136,58 €
Perfil tubular (80×40×2 mm ³)	(6000 mm)	56,32 €	6	337,93 €
Perfil tubular (140×80×3 mm ³)	(6000 mm)	151,38 €	1	151,38 €
Perfil <i>omega</i>	(6000 mm)	25,46 €	3	76,38 €
Cantoneira (40×40×4)	(6000 mm)	22,63 €	1	22,63 €
Calha	(6000 mm)	64,68 €	2	129,36 €
Barra	(6000×40×10 mm ³)	29,05 €	1	29,05 €
Chapa	(2000×1000×10 mm ³)	307,80 €	1	307,80 €
Total				1191,11 €

Após a contabilização dos materiais necessários e dos custos envolvidos, procedeu-se à análise económica relacionada com o processo de montagem e soldadura da estrutura. Para a estrutura em projeto, e devido aos seus materiais, foi selecionado o processo de soldadura MIG-MAG devido à facilidade de utilização, elevada cadência de produção, boas propriedades mecânicas e, ainda custos baixos implícitos. Para o processo de soldadura foram introduzidos os seguintes parâmetros [42]:

- Mistura de 79% de Árgon e 21% de CO₂ (esta mistura para o material de base permite um excelente acabamento e boa penetração);
- Caudal da mistura (14 l/min), este valor tem em consideração o processo de MIG-MAG e ainda a soldadura efetuada na oficina (inexistência de correntes de ar);
- Velocidade de soldador (400 mm/min), velocidade prevista no processo de MIG-MAG para um soldador com experiência;
- Dimensão da garganta efetiva da soldadura (2 mm).

Contabilizada a quantidade de soldas necessárias, foi calculado o tempo necessário para a soldadura. Este tempo inclui a preparação da junta, o posicionamento dos componentes e a operação de soldadura, o que resultou num tempo total de 3 horas e 15 minutos. No entanto, foram consideradas 4 horas para contabilizar o tempo de preparação dos componentes e de eventuais pausas. Em média, o custo de mão de obra de um soldador credenciado e com segurança social ronda cerca de 35 €/hora, logo obtém-se um custo de 140 € de mão de obra do soldador.

Considerando os parâmetros de soldadura selecionados, consegue-se estimar a quantidade necessária de consumíveis e, consequentemente, os custos:

- Mistura de gás – considerando o caudal e o tempo de soldadura, são previstos gastar 2,7361 m³ de mistura;
- Material de adição – após saber a dimensão da garganta da soldadura e a quantidade de soldas e os respetivos tamanhos, consegue-se calcular o volume do material de adição, de cerca de 0,021895 dm³. Através da densidade do fio (7,8 kg/dm³) é calculada a massa de fio necessária (0,171 kg);
- Energia – em média uma máquina de MIG-MAG tem uma potência de 10 kW. Pela multiplicação desta pelo tempo de soldadura, é previsto um gasto de 32,573 kWh.

O material de adição necessário para a estrutura apresentou uma massa muito reduzida, foram verificadas todas as contas e não apresentou nenhum erro. Portanto, devido às soldas serem de comprimento reduzido traduz-se num gasto maior de fio (início e fim do cordão da soldadura) e eventuais perdas, foi estimado um gasto de 0,5 kg de material de adição para contemplar todo o processo.

Na Tabela 20 são apresentados os custos dos consumíveis necessários para a soldadura da estrutura.

Tabela 20: Custo dos consumíveis da soldadura.

	Custo unitário	Quantidade	Rendimento	Custo
Mistura de gás	12,86 €/m ³	2,7361 m ³	90 %	38,70 €
Material de adição	17 €/kg	0,5 kg	90 %	9,35 €
Energia	0,1371 €/kWh	32,53 kWh	90 %	4,91 €
Total				52,96 €

Para finalizar a construção é necessário proceder à pintura da estrutura. Por ser uma estrutura reticulada optou-se por utilizar pintura eletrostática. Na pintura estão envolvidos os seguintes processos (ordem cronológica): lixagem, aplicação de primário,

lixagem e pintura eletrostática. Em todo processo é estimado cerca de 18 horas de trabalho (22 €/hora) e um custo de 32,84 € do primário, logo foi estimado um custo final da pintura de 428,84 €. Considerou-se 22 €/hora, pois este valor tem em conta os custos da utilização das instalações, mão de obra e a aplicação da pintura eletrostática.

Na Tabela 21 é apresentada a análise económica da estrutura. Conclui-se assim que, somados os custos associados a todos os processos de construção, é estimado para a solução final um valor de 1812,91 €.

Tabela 21: Custos associados à construção da estrutura.

Custos	
Material	1191,11 €
Soldadura	192,96 €
Pintura	428,84 €
Total	1812,91 €

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O presente projeto teve como objetivo a otimização de uma estrutura metálica para a aplicação numa central frigorífica de CO₂ no regime transcrito, desenvolvida pela empresa de acolhimento. Desta forma, foi necessário realizar uma sondagem das soluções presentes no mercado, estudo do desempenho da estrutura inicial, análise qualitativa de diferentes soluções e implementação das soluções mais promissoras, e respetiva análise de elementos finitos.

A estrutura inicial desenvolvida pela empresa considerou-se como o ponto de partida e de comparação para averiguar o desempenho das soluções implementadas ao longo do projeto. A estrutura inicial contempla a utilização de perfis tubulares comuns e as suas uniões são executadas com recurso às ligações soldadas. No entanto, esta contém soluções peculiares que não apresentam o resultado desejado, tais como: os suportes dos compressores (apresentam deslocamentos significativos relativamente às recomendações impostas para a central frigorífica), utilização de chapas de grandes dimensões (traduzem numa massa elevada) e o suporte do quadro elétrico apresenta instabilidade.

A estrutura final apresenta algumas semelhanças relativamente à estrutura inicial, tais como a aplicação de perfis tubulares e a disposição dos componentes. No entanto, foram implementadas soluções no âmbito de alcançar um melhor desempenho da estrutura, tais como: inserção de perfis *omegas* nos suportes dos compressores e do depósito de líquido, perfis para encaixe dos garfos do empilhador e ainda, implementação de uma estrutura de módulo único para envolver toda a instalação. Através do método de elementos finitos, conseguiu-se desenvolver a estrutura final que valida os requisitos de projeto e apresenta as seguintes melhorias: redução da massa e das tensões máximas de von Mises, menores deslocamentos e incremento do fator de segurança (Tabela 22).

De acordo com a aplicação das estruturas, foram analisados dois casos de estudo. No primeiro caso de estudo a estrutura foi simulada quando esta se encontra no local de instalação, pelo que esta foi posicionada sobre os pés de nivelamento antivibráticos e foram inseridas todas as massas dos componentes. No segundo caso de estudo simulou-se o processo de transporte da estrutura sobre os garfos do empilhador, e consideraram-se também as massas dos componentes da central frigorífica, à exceção dos fluidos presentes nos depósitos.

Tabela 22: Resultados da otimização estrutural realizada.

Resultado	Estrutura inicial	Estrutura final	Percentagem
Massa	520,4 kg	317,3 kg	- 39,1 %
Dimensões	4750×900×1750 mm ³	4084×800×2008 mm ³	[-]
Deslocamento (1º caso de estudo)	3,121 mm	1,107 mm	- 64,5 %
Fator de segurança (1º caso de estudo)	4,8	6,3	+ 23,8 %
Deslocamentos (2º caso de estudo)	8,623 mm	5,077 mm	- 41,1 %
Fator de segurança (2º caso de estudo)	1,2	1,5	+ 25 %

Para além destas melhorias, conseguiu-se obter ainda um melhor desempenho da estrutura para as frequências naturais de vibração. Na estrutura inicial foram identificadas 26 frequências naturais de vibração estruturais, das quais 13 se encontram no intervalo de funcionamento da instalação (30 a 70 Hz). Na estrutura final existem 13 frequências naturais de vibração estruturais, das quais quatro se encontram no intervalo de funcionamento, sendo estas restringidas pelo variador de velocidade, que permite diminuir a faixa de funcionamento sem causar quebra de desempenho da central frigorífica.

Por último, é necessário realçar que a estrutura se encontra dimensionada com sucesso e com uma estimativa de proposta económica de 1812,91 €.

De seguida, apresentam-se possíveis trabalhos futuros a realizar para obter uma estrutura com os melhores desempenhos estruturais:

- Análise da estrutura para verificar se as soldaduras executadas apresentarão problemas de tensões térmicas e/ou fissuração das soldas pela zona termicamente afetada, devido à espessura reduzidas dos perfis;
- Comparar se o aumento da espessura de perfil se traduz num aumento significativo nas soldas e na vertente de melhoria dos resultados técnicos;
- Simulação dos cordões de soldadura através do MEF e comparar os resultados obtidos com os calculados no dimensionamento das ligações soldadas.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] Site da RACE. 2020. *Logótipo RACE (Refrigeration & Air Conditioning Engineering)*. Disponível em: <https://race.com.pt/pt>. (Acedido a: 20/12/2020)
- [2] Dossat, R.J. 1961. *Principles of Refrigeration*. John Wiley & Son. New York, E.U.A. ISBN: 9780471219453
- [3] Calm, James M. 2008. "The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and outlook". *International Journal of Refrigeration*, vol. 31. no. 7, pp. 1123-1133.
- [4] Benhadid-Dib, Samira e Benzaoui, Ahmed. 2012. "Refrigerants and their Environmental Impact Substitution of Hydro Chlorofluorocarbon HCFC and HFC Hydro Fluorocarbon. Search for an Adequate Refrigerant". *Energy Procedia*, vol. 18. pp. 807-816.
- [5] Site da AEEC (Alliance for an Energy Efficient Economy). 2020. *As quatro gerações dos fluidos frigorigéneos*. Disponível em: <https://aeec.in/why-is-the-montreal-protocol-interested-in-energy-efficiency/>. (Acedido a: 21/05/2021)
- [6] Organização das Nações Unidas. 1987. *Montreal Protocol*. Disponível em: <https://www.unenvironment.org/ozonaction/>. (Acedido a: 19/12/2020)
- [7] Comissão Europeia. 1997. *Kyoto Protocol*. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/index_pt. (Acedido a: 21/12/2020)
- [8] Dinçer, Ibrahim e Kanoglu, Mehmet. 2010. *Refrigeration Systems and Applications*. Segunda Edição. John Wiley & Sons, Ltd. Sussex Ocidental, Reino Unido. ISBN: 978-0-470-74740-7
- [9] União Europeia. 2014. *Regulamento (UE) n. ° 517/2014 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de abril de 2014, relativo aos gases fluorados com efeito de estufa e que revoga o Regulamento (CE) n. ° 842/2006 Texto relevante para efeitos do EEE*.
- [10] Wu, Di, Hu, Bin, e Wang, R. Z. 2020. "Vapor compression heat pumps with pure Low-GWP refrigerants". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 110571.
- [11] Sun, Jian, Kuruganti, Teja, Munk, Jeff, Dong, Jin, e Cui, Borui. 2021. "Low global warming potential (GWP) refrigerant supermarket refrigeration system modeling and its application". *International Journal of Refrigeration*, vol. 126.
- [12] L., Dupont J., P., Domanski, P., Lebrun, e F., Ziegler. 2019. "38th Note on Refrigeration Technologies: The Role of Refrigeration in the Global Economy (2019)". *IIF-IIR*.

- [13] Freire, Emília. 2019. *Conveniência e alimentação saudável no topo das tendências*. *DistribuiçãoHoje*. (9/12/2019). Disponível em: <https://www.distribuicao hoje.com/destaques/conveniencia-e-alimentacao-saudavel-no-topo-das-tendencias/>
- [14] Cardoso, Bruno J., Lamas, Francisco B., Gaspar, Adélio R., e Ribeiro, José B. 2017. "Refrigerants used in the Portuguese food industry: Current status". *International Journal of Refrigeration*, vol. 83. pp. 60-74.
- [15] Revista TecnoAlimentar. 2020. *Aqualife cresce em Portugal - Mais e melhor serviço*. Disponível em: <http://www.tecnoalimentar.pt/noticias/aqualife-cresce-em-portugal-mais-e-melhor-servico/>.
- [16] Skačánová, K. Zolcer e Battesti, M. 2019. "Global market and policy trends for CO₂ in refrigeration". *International Journal of Refrigeration*, vol. 107. pp. 98-104.
- [17] Barta, Riley B., Groll, Eckhard A., e Ziviani, Davide. 2021. "Review of stationary and transport CO₂ refrigeration and air conditioning technologies". *Applied Thermal Engineering*, vol. 185. p. 116422.
- [18] Gaspar, Pedro Dinis e Silva, Pedro Dinho da. 2015. *Handbook of Research on Advances and Applications in Refrigeration Systems and Technologies*. IGI Global. Hershey, PA, E.U.A. ISBN: 1466683996
- [19] Barrias, Fernando, Nogueira, Teresa, e Pinto, João. 2015. "Tecnologias de produção de frio: estudo e análise de medidas de eficiência energética". *Neutro à Terra*, no. 16.
- [20] Reisel, John R. 2015. *Principles of Engineering Thermodynamics, SI Edition*. Primeira Edição. Cengage Learning. Boston, E.U.A.
- [21] Budynas, Richard G. e Nisbett, J. Keith. 2011. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. Ninth Edition. McGraw-Hill, New York, E.U.A. ISBN: 978-0-07-352928-8
- [22] Childs, Peter R. N. 2004. *Mechanical Design*. Segunda Edição. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, Reino Unido. ISBN: 0 7506 5771 5
- [23] Hejazi, Farzad e Chun, Tan Kar. 2018. *Steel Structures Design Based on Eurocode 3*. Primeira Edição. Springer, Singapura. ISBN: 978-981-10-8835-3
- [24] Aksel, Havva e Eren, Ozlem 2015. "A discussion on the advantages of steel structures in the context of sustainable construction". *The NEW ARCH-International Journal of Contemporary Architecture*, vol. 2. no. 3.
- [25] Hartman, Rudolph B. 1942. "Structural system". Site do Google Patents.
- [26] Bernuzzi, Claudio e Cordova, Benedetto. 2016. *Structural Steel Design to Eurocode 3 and AISC Specifications*. John Wiley & Sons. Sussex Ocidental, Reino Unido. ISBN: 9781118631287
- [27] Site do The Constructor. 2020. *Structural Steel Frame System*. Disponível em: <https://theconstructor.org/structural-engg/types-structural-steel-framing-systems/18554/>. (Acedido a: 30/12/2020)

- [28] Vayas, Ionnis, Ermopoulos, John, e Ioannidis, George. 2019. *Design of Steel Structures to Eurocodes*. Springer. Cham, Suíça. ISBN: 978-3-319-95473-8
- [29] Brockenbrough, Roger L. e Merritt, Frederick S. 2011. *Structural steel designer's handbook*. Sexta Edição. McGraw-Hill Education. Ohio, E.U.A. . ISBN: 9781260440799
- [30] Brockenbrough, Roger L. e Merritt, Frederick S. 1999. *Structural Steel Designer's Handbook*. Terceira Edição. McGraw-Hill, New York, E.U.A. . ISBN: 0-07-008782-2
- [31] Site da Taiwei Steel Structure. 2020. *Prefabricated Steel Structure Warehouse*. Disponível em: <http://m.twchinasteelstructure.com/steel-structure/steel-structure-warehouse/prefabricated-steel-structure-warehouse.html>. (Acedido a: 30/12/2020)
- [32] Lueptow, Richard M. 2014. "Directions in mechanical engineering". *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 26. no. 2, p. 111.
- [33] Kozlov, A. M., Malyutin, G. E., e Handozhko, A. V. 2017. "Performance Increase of Precision Volumetric Milling on NC Machines Based on Frame-Accurate Control". *Procedia Engineering*, vol. 206. pp. 1111-1119.
- [34] Site da Woojin Engineering. 2010. *Truck and Bus Muffler Manufacturing Assembly Lines, Equipment & Machines*. Disponível em: <http://www.woojinengineering.com/auto-parts-manufacturing-machines/exhaust-systems/truck-bus-muffler-assembly-lines.php>. (Acedido a: 31/12/2020)
- [35] Cardoso, Francisco Sena, Zhang, Hao, e Rasmussen, Kim JR 2019. "System reliability-based criteria for the design of steel storage rack frames by advanced analysis: Part II—Reliability analysis and design applications". *Thin-Walled Structures*, vol. 141. pp. 725-739.
- [36] Zhang, Hao, Shayan, Shabnam, Rasmussen, Kim J. R., e Ellingwood, Bruce R. 2016. "System-based design of planar steel frames, II: Reliability results and design recommendations". *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 123. pp. 154-161.
- [37] Site da Assembly. 2017. *Comparing Structural-Component Systems*. Disponível em: <https://www.assemblymag.com/articles/94028-comparing-structural-component-systems>. (Acedido a: 31/12/2020)
- [38] Bryce, Douglas M. 1996. *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals*. Society of Manufacturing Engineers (SME). Dearborn, E.U.A. ISBN: 0872634728
- [39] Site da Alro Steel. 2020. *Aluminum Structural - Angle, Beam, Channel, Tee*. Disponível em: https://www.alro.com/divsteel/metals_comp_type.aspx?Mat=ALUMINUM&Type=Structural&mc=AL. (Acedido a: 01/01/2021)

- [40] Site da iStock. 2015. *Perfis para exposição designs (Alumínio)*. Disponível em: <https://www.istockphoto.com/pt/fotos/aluminium-profile?phrase=aluminium%20profile&sort=mostpopular>. (Acedido a: 01/01/2021)
- [41] Site da Thanh Dat Steel. 2019. *Types of sections can carrying shear strength*. Disponível em: <https://hopmakem.com/gia-thep-hinh-v.html>. (Acedido a: 01/01/2021)
- [42] Silva, Francisco J. G. 2014. *Tecnologia da Soldadura - Uma abordagem Técnico-Didática*. Publindústria, Edições Técnicas, Porto, Portugal. ISBN: 978-989-723-062-2
- [43] Site do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 2010. *Euródigo 3- Projeto de estruturas de aço* (Acedido a: 02/01/2021)
- [44] Shah, K. P. 2019. "Threaded Fasteners". Disponível em: <https://practicalmaintenance.net/wp-content/uploads/Fundamentals-of-Threaded-Fasteners.pdf>
- [45] Sadowski, T, Kneć, M, e Golewski, P 2010. "Experimental investigations and numerical modelling of steel adhesive joints reinforced by rivets". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 30. no. 5, pp. 338-346.
- [46] Site do Instituto Português da Qualidade. 2020. *Normalização*. Disponível em: <http://www1.ipq.pt/PT/Normalizacao/Pages/Normalizacao.aspx>. (Acedido a: 26/12/2020)
- [47] Site Comissão Europeia - Eurocódigo 2018. *The EN Eurocodes*. Disponível em: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/>. (Acedido a: 26/12/2020)
- [48] Bernuzzi, Claudio, Cordova, Benedetto, e Simoncelli, Marco. 2015. "Unbraced steel frame design according to EC3 and AISC provisions". *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 114. pp. 157-177.
- [49] Site do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 1990. *Normalização e Regulamentação*. Disponível em: <http://www.lnec.pt/pt/servicos/normalizacao-e-regulamentacao/normalizacao/ct-115-eurocodigos-estruturais/>. (Acedido a: 26/12/2020)
- [50] Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. 1986. *Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios*. Diário da República n.º 174/1986, Série I de 1986/07/31. Disponível em: <https://dre.pt/web/guest/pesquisa/-/search/218679/details/normal?l=1>.
- [51] Site do AISC (American Institute of Steel Construction). 2016. *Current Standards*. Disponível em: <https://www.aisc.org/publications/steel-standards/#28231>. (Acedido a: 09/01/2021)
- [52] Tasic, Petar, Hajro, Ismar, Hodzic, Damir, e Pandzic, Adi. 2020. "Selection Charts For Structural Steels Regarding Design Criteria and Trending Properties". *Annals of DAAAM & Proceedings*, Article vol. 7. no. 1, pp. 453-458.

- [53] Ashby, Michael. 2010. *Materials Selection in Mechanical Design*. Quarta Edição. Butterworth-Heinemann. Burlington, E.U.A.
- [54] Organismo de Investigação da União Europeia. 2005. *Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, Londres, Reino Unido*.
- [55] Wen, Qing-jie e Ren, Zi-jian. 2021. "Structural analysis of a large aluminum alloy truss double-arch bridge". *Structures*, vol. 29. pp. 924-936.
- [56] International, ASM. 1990. *Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys*. 10th Edition Metals Handbook. ASM International, E.U.A. ISBN: 978-0-87170-377-4
- [57] Magalhães, António G. 2015. "Apontamentos- Processos de Fabrico (Unidade curricular Seleção de Materiais e Processos de Fabrico)".
- [58] Casado, Silvia, Laguna, Manuel, Pacheco, Joaquín, e Puche, Julio C. 2020. "Grouping products for the optimization of production processes: A case in the steel manufacturing industry". *European Journal of Operational Research*, vol. 286. no. 1, pp. 190-202.
- [59] Swift, Ken G e Booker, Julian D. 2003. *Process selection: from design to manufacture*. Segunda Edição. Butterworth-Heinemann. Oxford, Reino Unido. ISBN: 0080474004
- [60] Domingues, Joaquim João Machado Sabino. 2019. "Sebenta - Orgãos de Máquinas".
- [61] Razavi, Seyed Abdonnabi, Siahpolo, Navid, e Mahdavi Adeli, Mehdi. 2020. "A New Empirical Correlation for Estimation of EBF Steel Frame Behavior Factor under Near-Fault Earthquakes Using the Genetic Algorithm". *Journal of Engineering*, vol. 2020.
- [62] Rao, Singiresu S. 2018. *The Finite Element Method in Engineering*. Sexta Edição. Butterworth-Heinemann. Oxford, Reino Unido. ISBN: 978-0-12-811768-2
- [63] Campilho, Raul Duarte Salgueiral Gomes. 2012. *Método de Elementos Finitos - Ferramentas para Análise Estrutural*. Publindústria, Porto, Portugal. ISBN: 978-989-723-029-5
- [64] Logan, Darly L. 2016. *A First Course in the Finite Element Method*. Sexta Edição. Cengage Learning. Boston, E.U.A. ISBN: 9781305635111
- [65] Kim, Nam H, Sankar, Bhavani V, e Kumar, Ashok V. 2018. *Introduction to finite element analysis and design*. Segunda Edição. John Wiley & Sons. Sussex Ocidental, Reino Unido. ISBN: 9781119078722
- [66] Younis, Wasim. 2010. *Up and Running with Autodesk® Inventor® Simulation 2011*. Segunda Edição. Butterworth-Heinemann. Oxford, Reino Unido. ISBN: 9780123821027
- [67] Kushwah, Sagarsingh, Parekh, Shreyashkumar, e Mangrola, Mehul. 2021. "Optimization of coil spring by finite element analysis method of automobile

- suspension system using different materials". Materials Today: Proceedings, vol. 42.*
- [68] Gautam, Girish Dutt, Singh, Kaushal Pratap, Prajapati, Akanksha, e Norkey, Gavendra. 2020. "Design optimization of roll cage for formula one vehicle by using finite element analysis". *Materials Today: Proceedings*, vol. 28. pp. 2068-2076.
- [69] Nandhakumar, S., Seenivasan, S., Mohammed Saalih, A., e Saifudheen, Muhammed. 2021. "Weight optimization and structural analysis of an electric bus chassis frame". *Materials Today: Proceedings*, vol. 37. pp. 1824-1827.
- [70] Santos, P. M. M., Campilho, R. D. S. G., e Silva, F. J. G. 2021. "A new concept of full-automated equipment for the manufacture of shirt collars and cuffs". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 67. p. 102023.
- [71] Benabdelaziz, Kawtar, Lebrouhi, Badreddine, Maftah, Anas, e Maaroufi, Mohammed. 2020. "Novel external cooling solution for electric vehicle battery pack". *Energy Reports*, vol. 6. pp. 262-272.
- [72] Zhang, X. Y., Ge, Y. T., e Sun, J. N. 2020. "Performance analysis of finned-tube CO₂ gas cooler with advanced 1D-3D CFD modelling development and simulation". *Applied Thermal Engineering*, vol. 176.
- [73] Site da RACE - Refrigeration & Air Conditioning Engineering. 2021. *Produtos*. Disponível em: <https://www.race.com.pt/pt/produtos>. (Acedido a: 25-05-2021)
- [74] Site da Teko. 2021. *Roxsta 2.0*. Disponível em: <https://teko-gmbh.com/co2/roxsta20/>. (Acedido a: 27/04/2021)
- [75] Site da EPTA. 2020. *EPTAGreen - Preserve naturally*. Disponível em: <https://ajbaker.com.au/wp-content/uploads/Brochure-Eptagreen.pdf>. (Acedido a: 15-04-2021)
- [76] Site da Costan. 2021. *Eco 2 Large*. Disponível em: <https://www.costan.com/en/products/eco-2-large#photo>. (Acedido a: 18-05-2021)
- [77] Matmatch. 2020. DIN 1629 Grade St 37.0 normalized [Online]. Disponível em: https://matmatch.com/materials/MINFM29468?utm_source=EquivalentMaterials&utm_medium=referral&utm_campaign=promoAd. (Acedido a: 22/04/2021)
- [78] Site da Green Cooling. 2021. *CO₂ Refrigeration Systems - Products*. Disponível em: <https://www.greencooling.co.uk/our-products/co2-refrigeration-systems/>. (Acedido a: 13/05/2021)
- [79] Site do Ferro. 2021. *Catálogo técnico - Tubos e calhas*. Disponível em: <https://ferro.pt/public/uploads/2018/10/Catalogo-Tecnico-Ferro-v.1.0.0-Tubos-e-Calhas.pdf>. (Acedido a: 15/06/2021)

ANEXOS

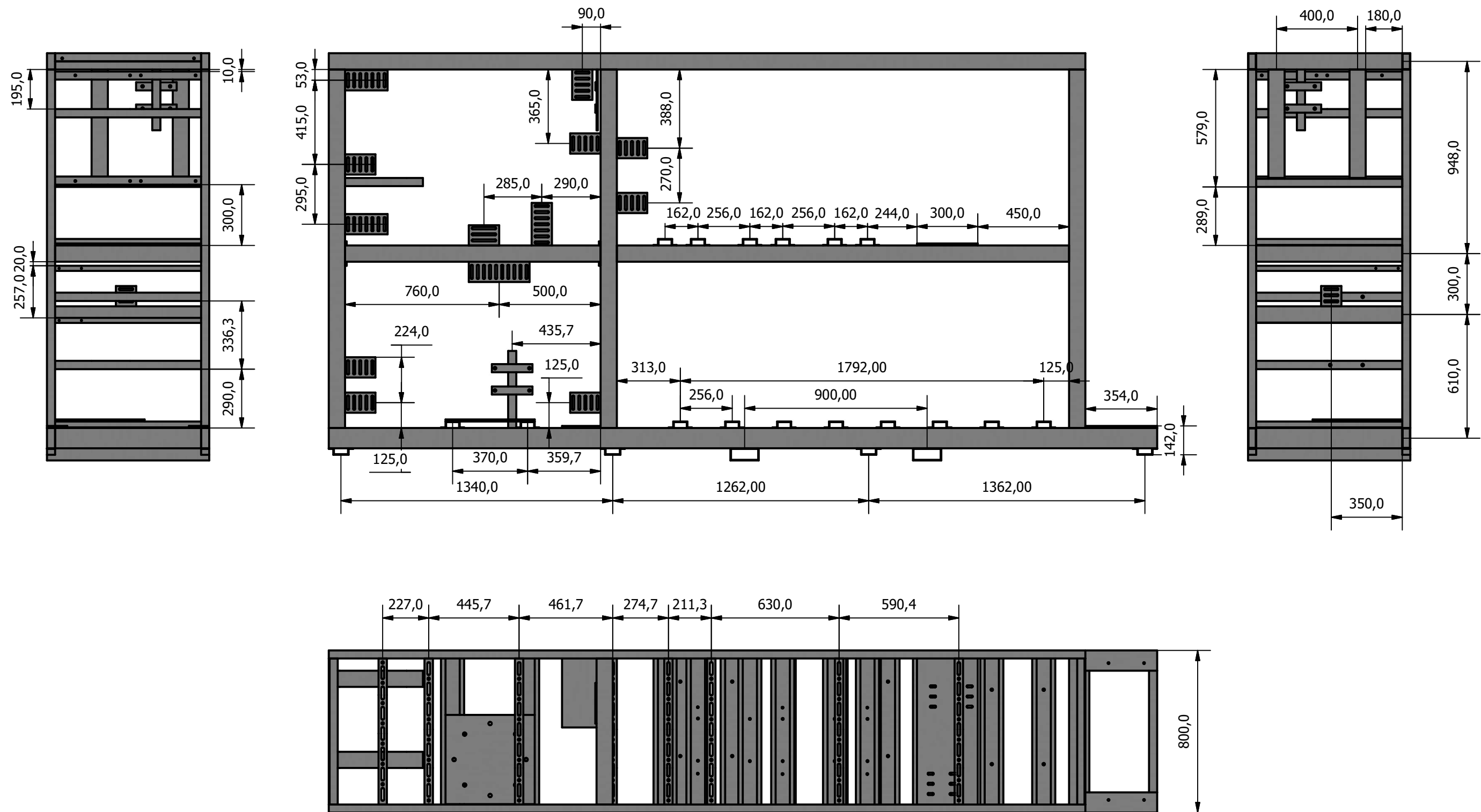
6.1 Desenhos de pormenor

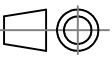
6 ANEXOS

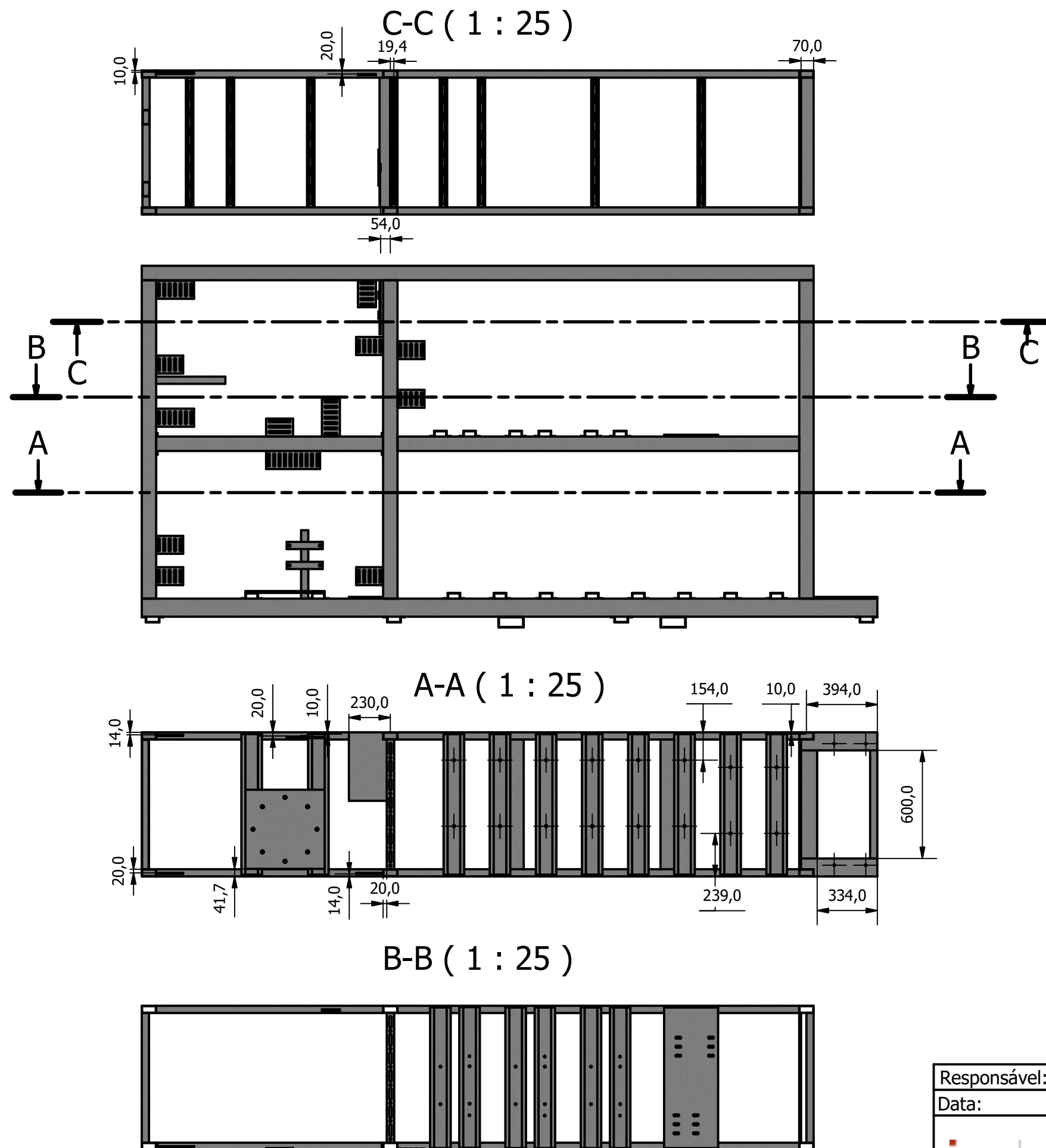
6.1 Desenhos de pormenor

6.1.1 Desenhos de pormenor da estrutura final

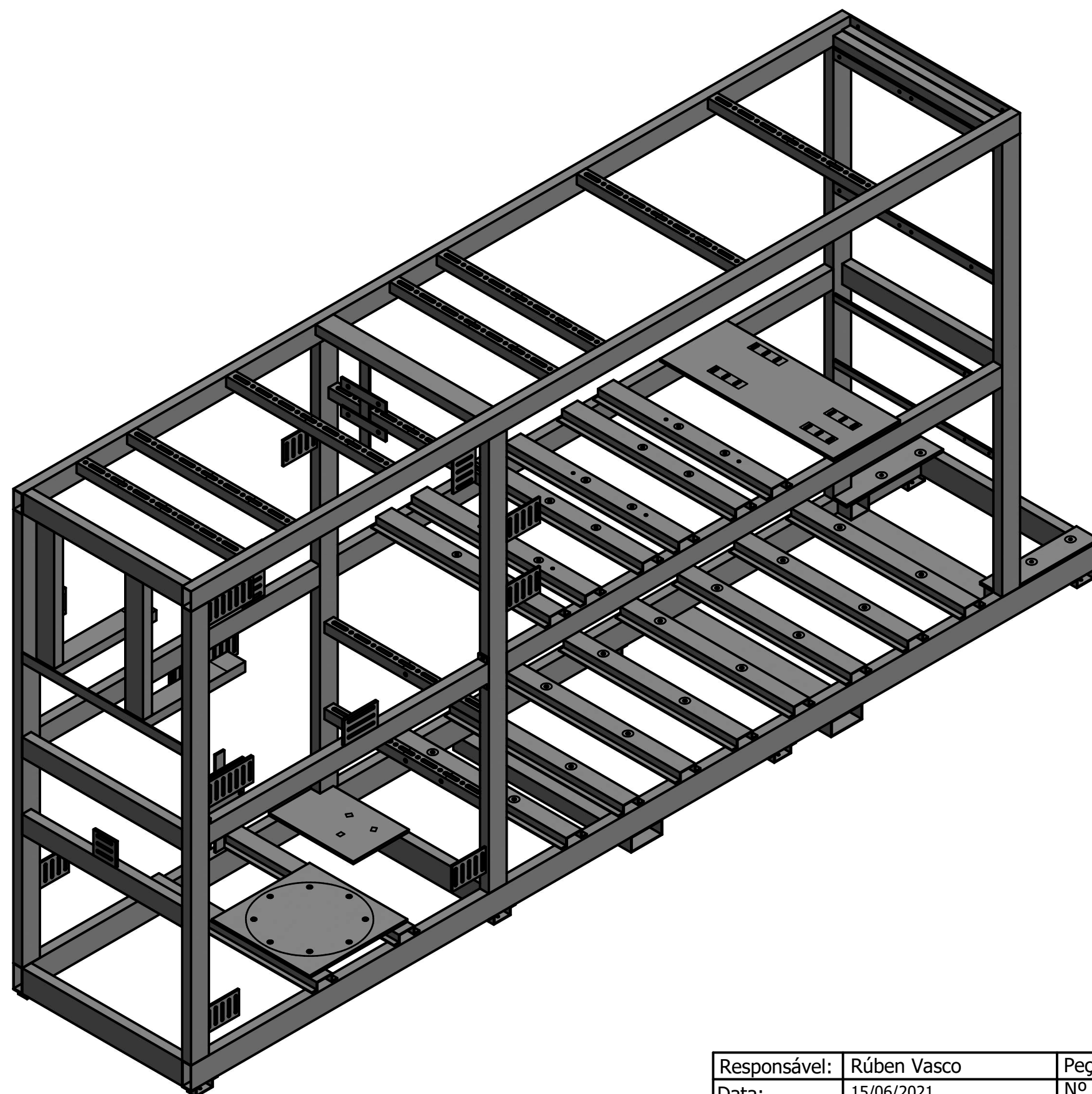
6.1.2 Desenhos de pormenor dos constituintes da estrutura final



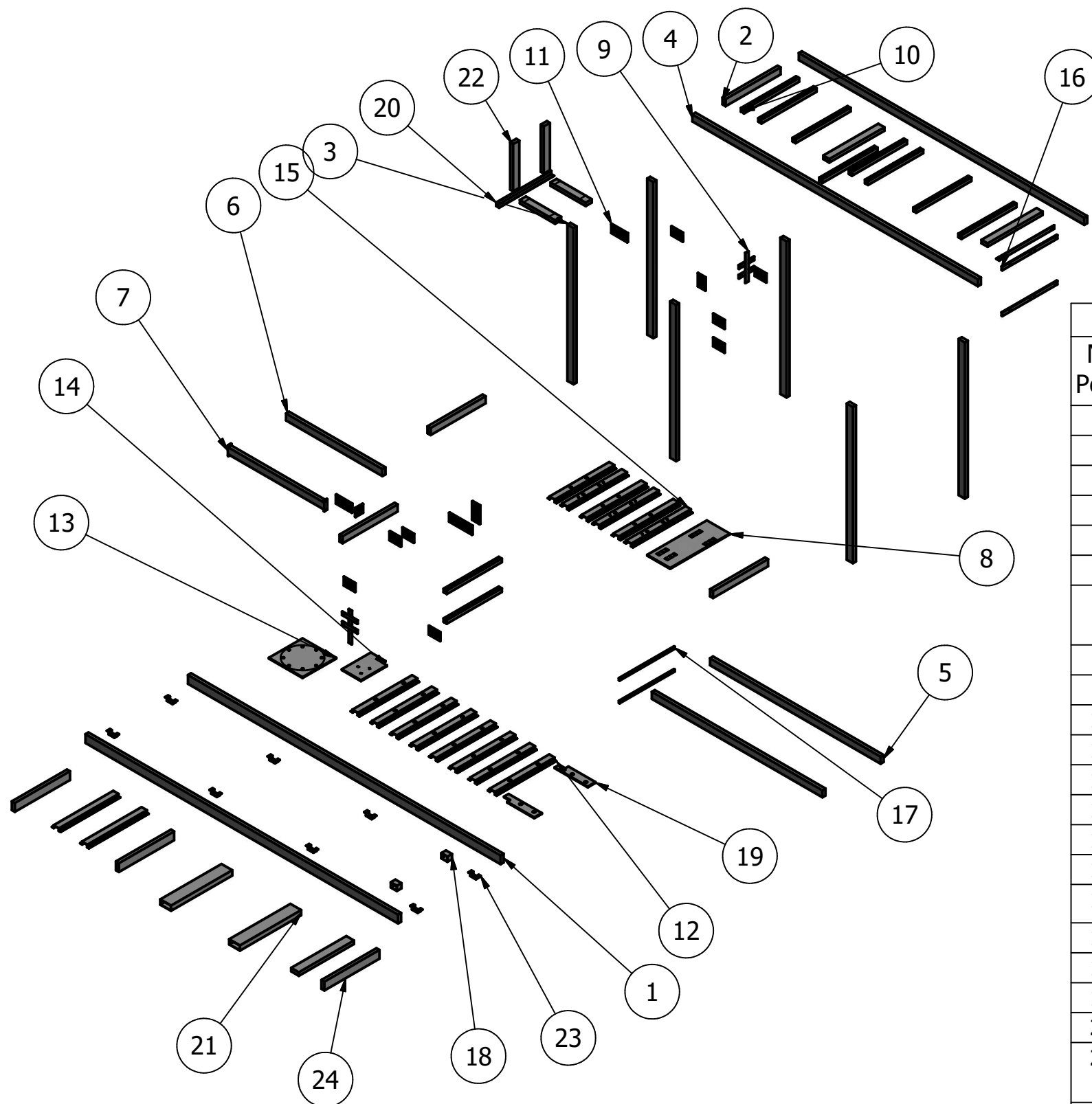
Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Estrutura final		
Data:	15/06/2021	Nº Peça:	Quant.	
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:		
		Folha 1/3	Escala: 1:20	 Língua PT



Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Estrutura Final		
Data:	15/06/2021	Nº Peça:	Quant.	
		Material:		
		Folha	Escala:	Língua
		2/3	1:25	PT
Vistas auxiliares.				



Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Vista isométrica - Estrutura final		
Data:	15/06/2021	Nº Peça:	Quant.	
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:		
		Folha	Escala:	Língua
		3/3	1:15	PT

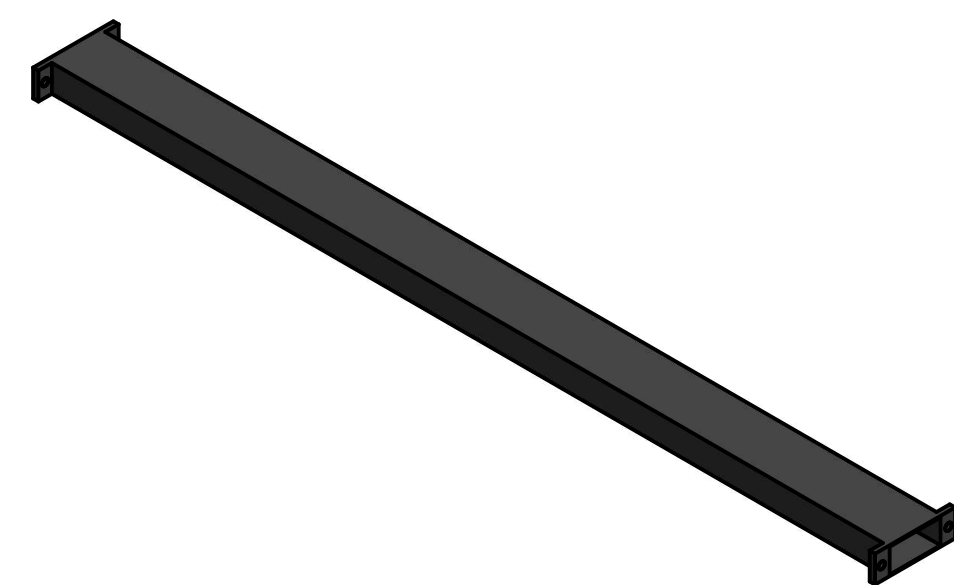
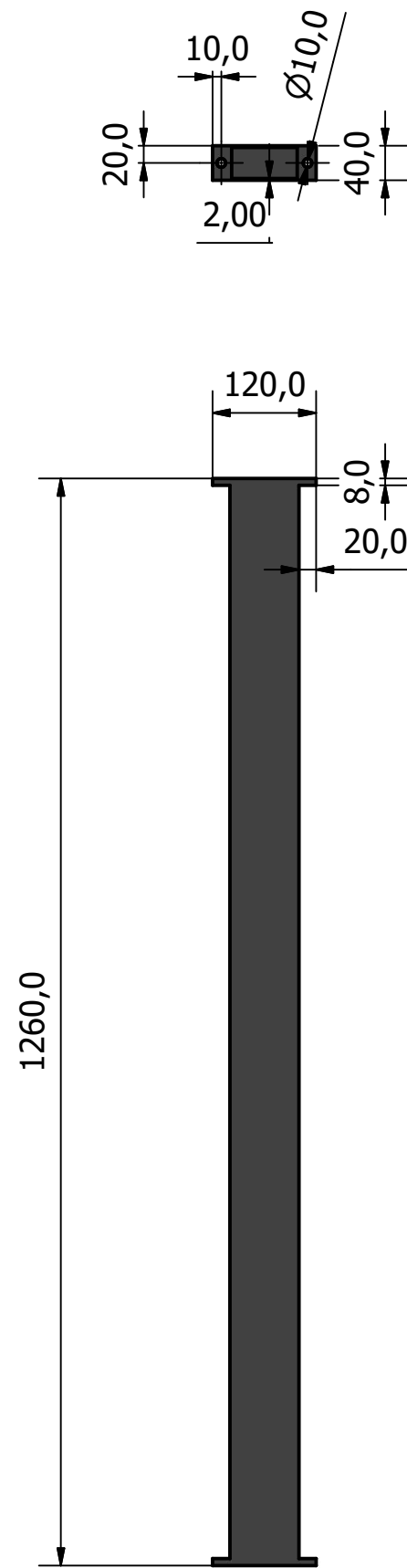


LISTA DE PEÇAS

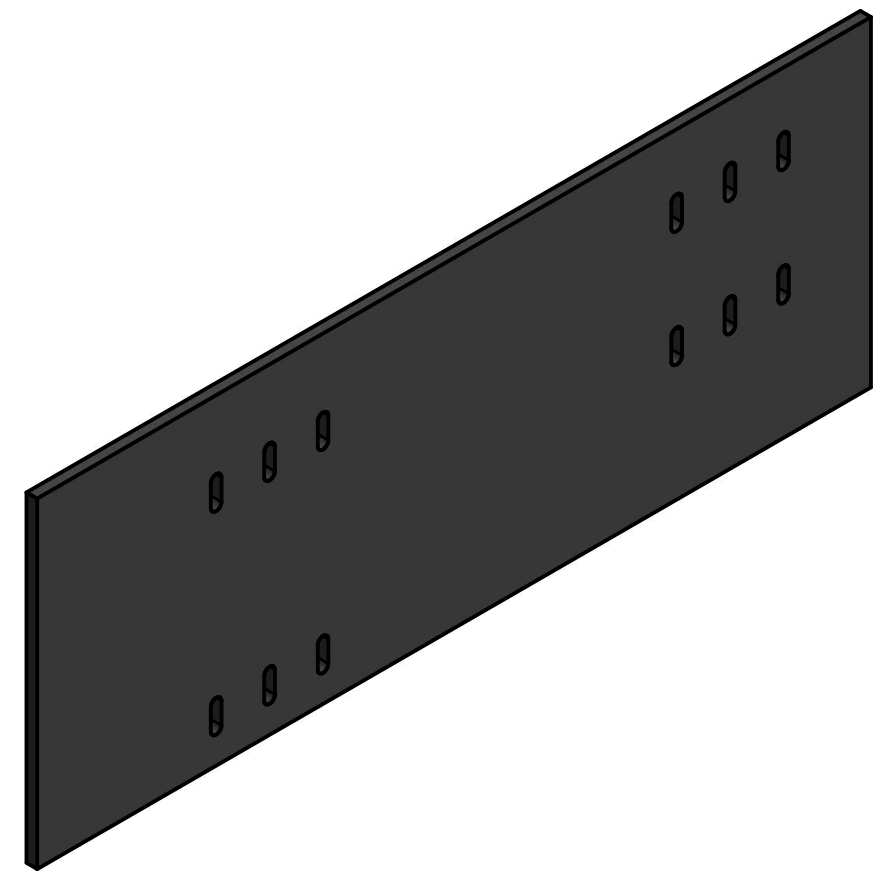
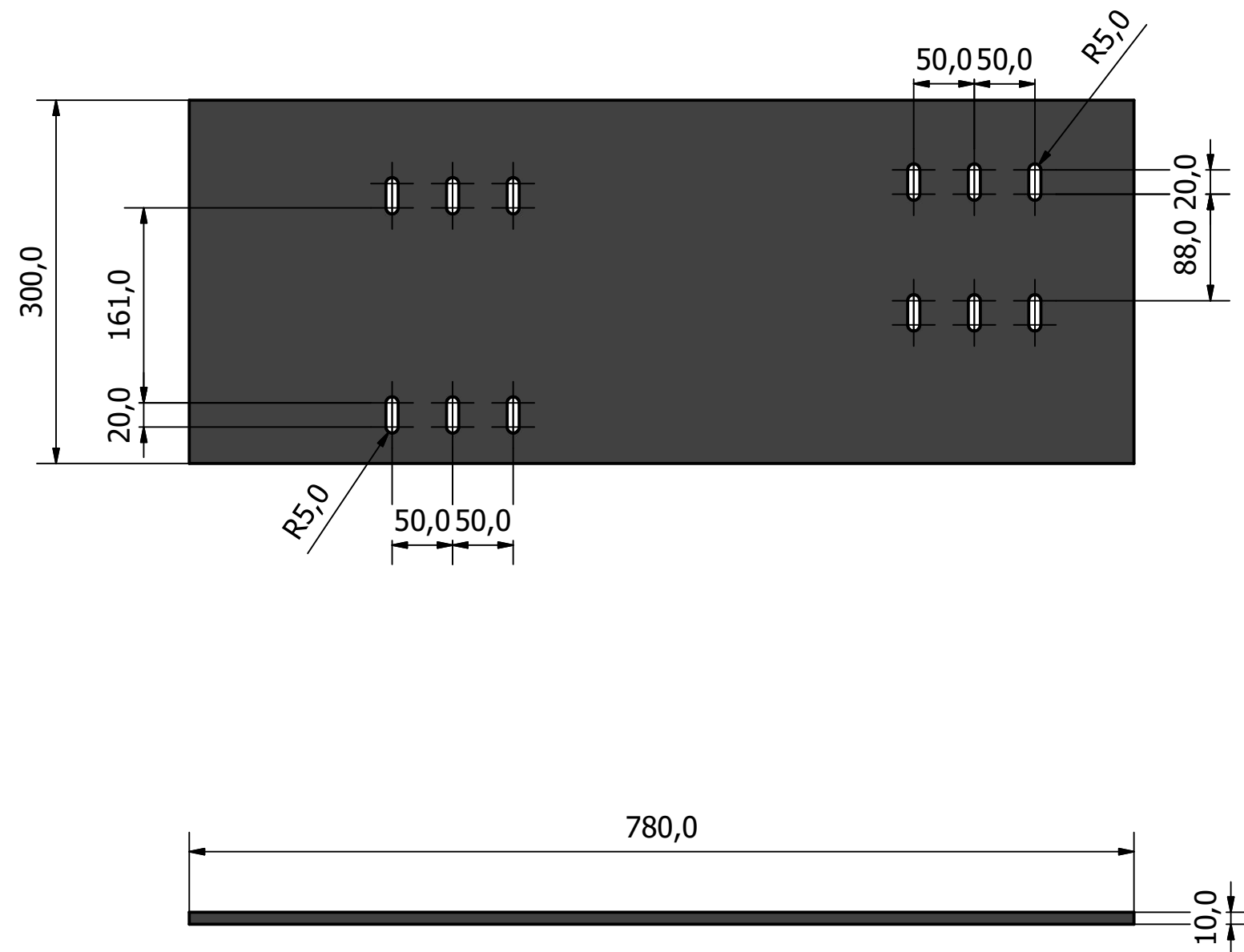
Nº Peça	Ref.	Peça	QTDE
1	EN 10305-5	Perfil da base (4084x100x40x2 mm ⁴)	2
2	EN 10305-5	Perfil transversal da estrutura (720x80x40x2 mm ⁴)	6
3	EN 10305-5	Perfil vertical da estrutura (1768x80x40x2 mm ⁴)	6
4	EN 10305-5	Perfil do topo da estrutura (3730x80x40x2 mm ⁴)	2
5	EN 10305-5	Perfil do patamar dos compressores BT (2230x80x40x2 mm ⁴)	2
6	EN 10305-5	Perfil da secção do depósito de óleo (1260x100x40x2 mm ⁴)	1
7	EN 10305-5	Perfil da secção do depósito de óleo (ligação aparafusada) (1260x100x40x2 mm ⁴)	1
8		Suporte dos permutadores de AQS e do compressor em paralelo	1
9		Suporte para permutador	2
10	369597	Calha de suporte da tubagem (720 mm)	10
11		Suporte para componetes	14
12	EN 10162	Perfil de fixação dos compressores MT	10
13		Suporte do depósito de líquido	1
14		Suporte do separador de óleo	1
15	EN 10162	Perfil de fixação dos compressores BT	6
16		Suporte dos variadores	1
17		Suporte do variador do compressor em paralelo	1
18	EN 10305-5	Perfil de apoio do quadro elétrico (60x100x40x2 mm ⁴)	2
19		Suporte de fixação do quadro elétrico	2
20	EN 10056-1/2	Cantoneira (720x40x40x4 mm ⁴)	2
21	EN 10305-5	Perfil para encaixe dos garfos do empilhador (800x140x60x3 mm ⁴)	2
22	EN 10305-5	Perfil de suporte do grupo de emergência (535x80x40x2 mm ⁴)	4
23		Apoios dos pés de nivelamento	8
24	EN 10305-5	Perfil transversal da base (720x100x40x2 mm ⁴)	4

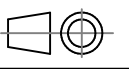
Responsável: Rúben Vasco Peça: Estrutura final - Vista explodida

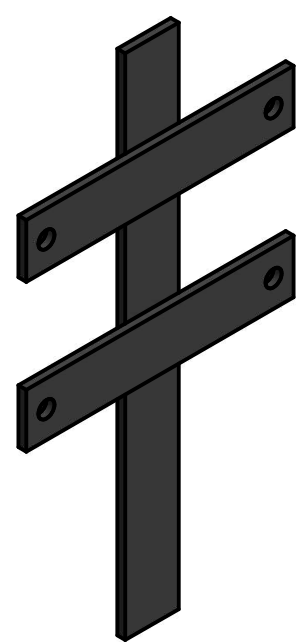
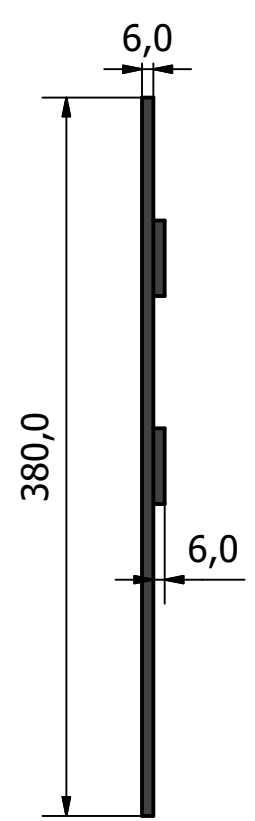
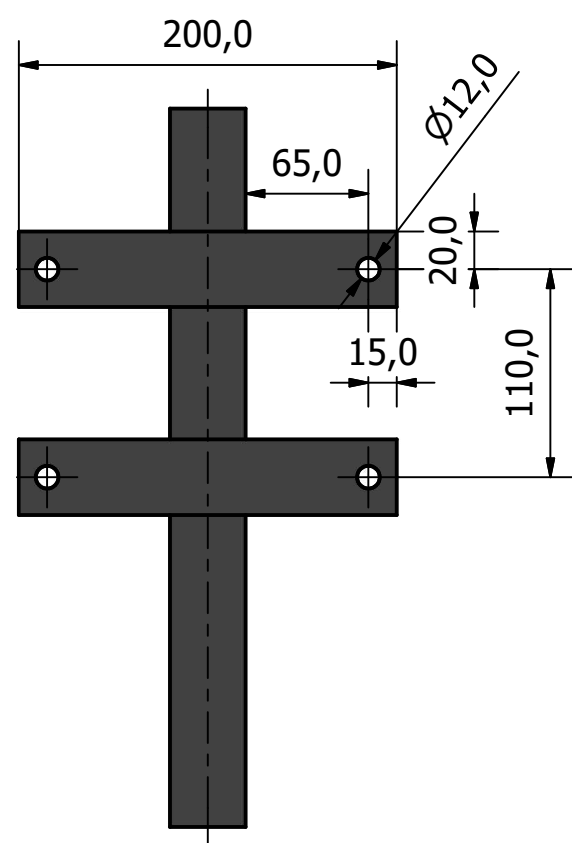
Data: 14/06/2021 Nº Peça: Quant.

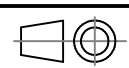


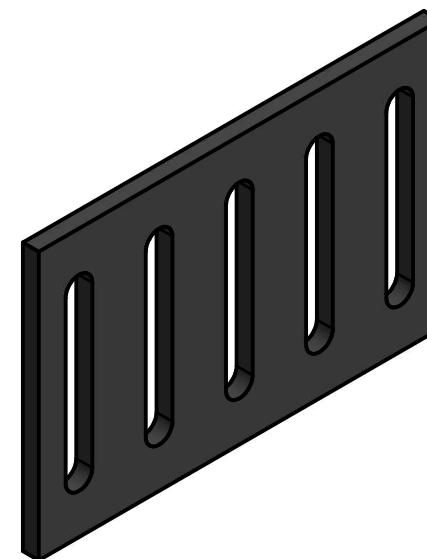
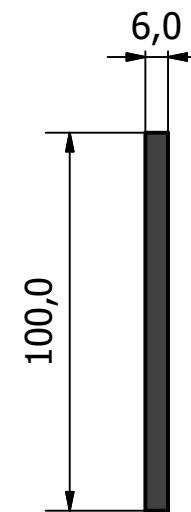
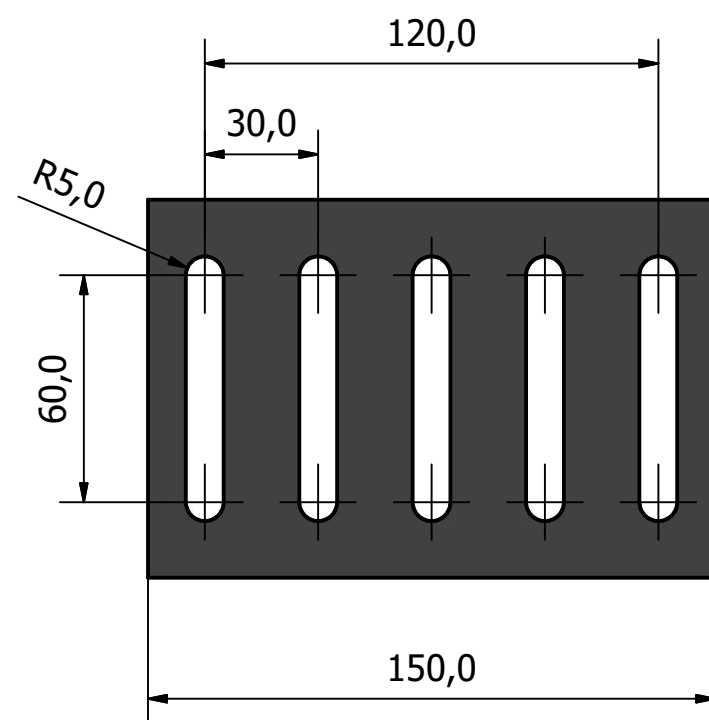
Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Perfil da secção do depósito de óleo (ligação aparafusada)		
Data:	20/06/2021	Nº Peça: 7	Quant.	1
		Material:		
		Folha 1/1	Escala: 1:8	Língua PT

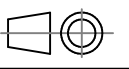


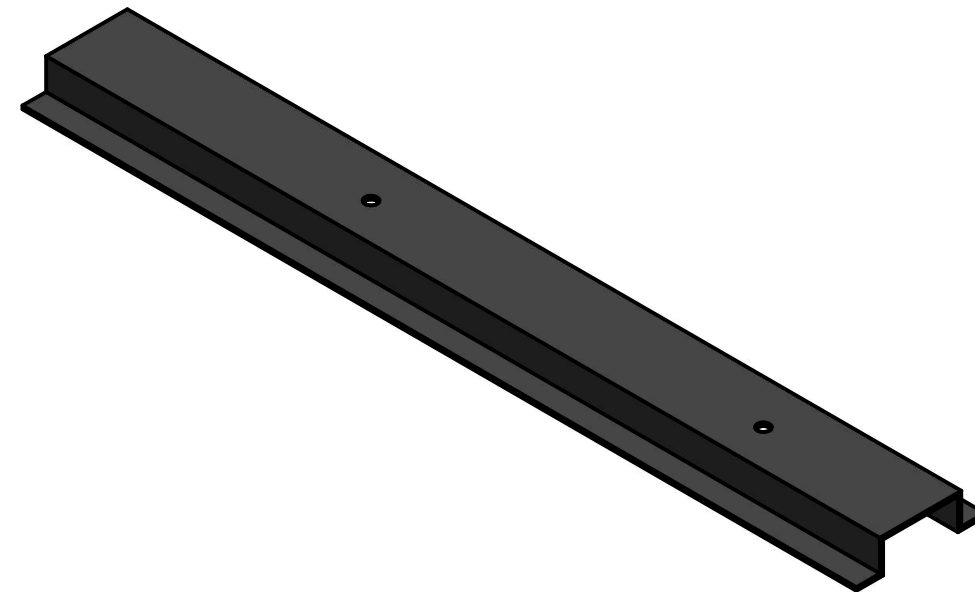
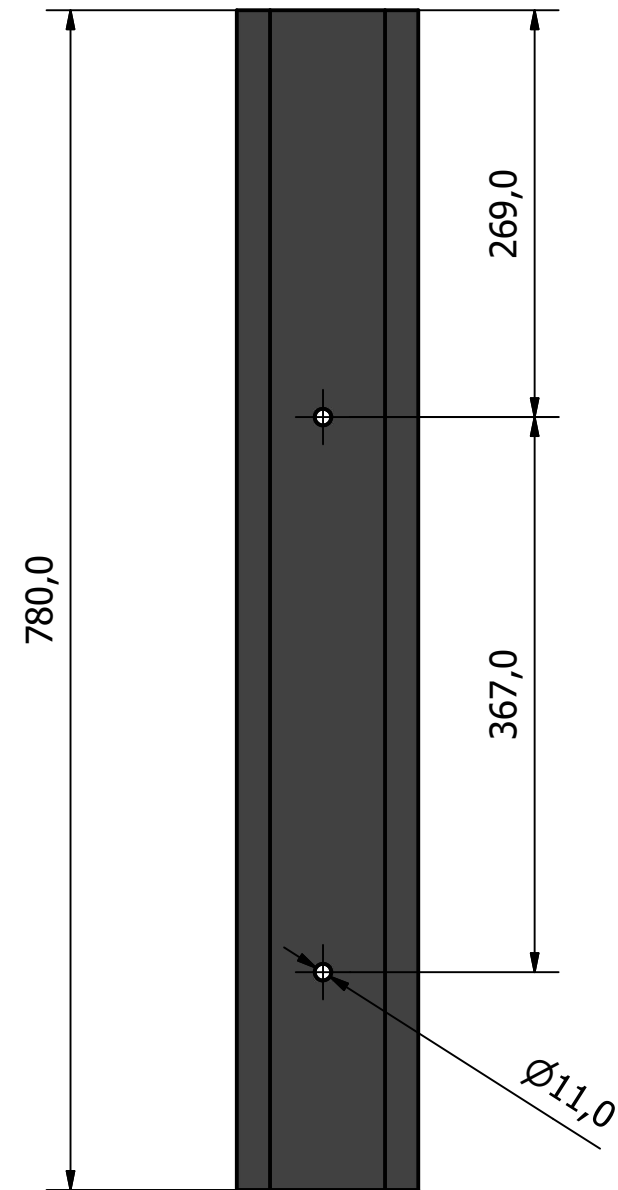
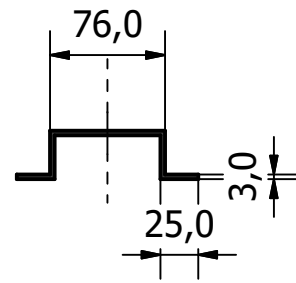
Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Suporte dos permutadores de AQS e do compressor em paralelo		
Data:	20/06/2021	Nº Peça: 8	Quant.	1
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:		
		Folha 1/1	Escala: 1:5	 Língua PT

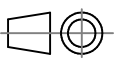


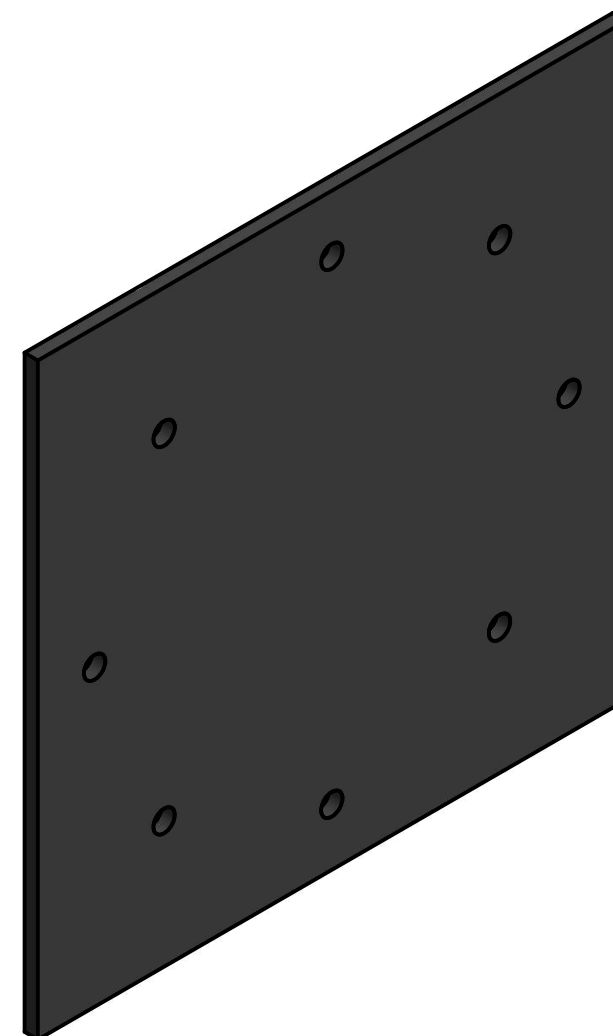
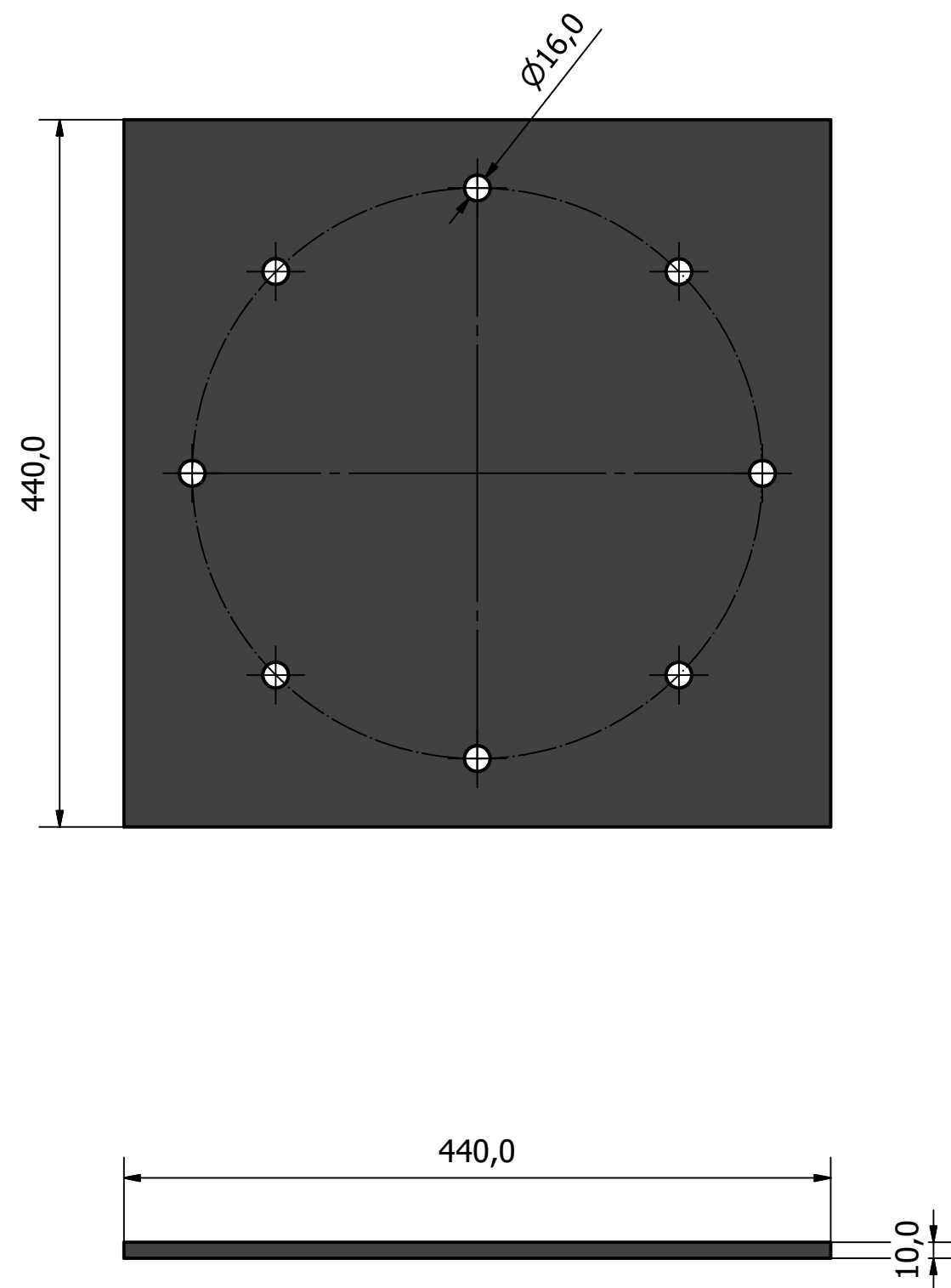
Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Suporte para permutador		
Data:	21/06/2021	Nº Peça: 9	Quant.	2
		Material:		
		Folha 1/1	Escala: 1:4	 Língua PT

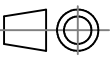


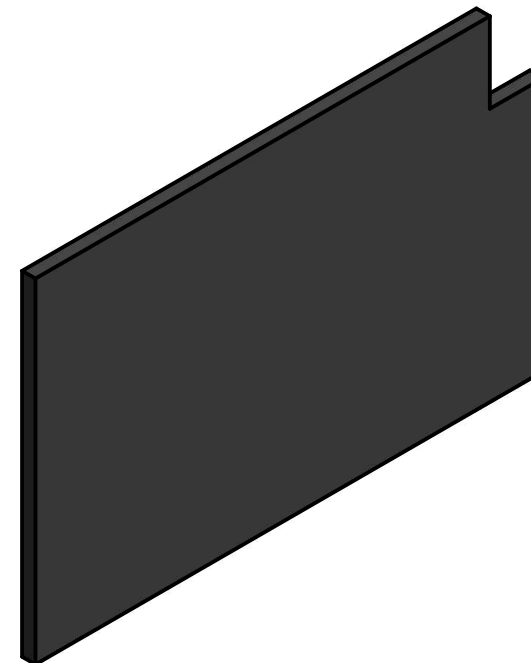
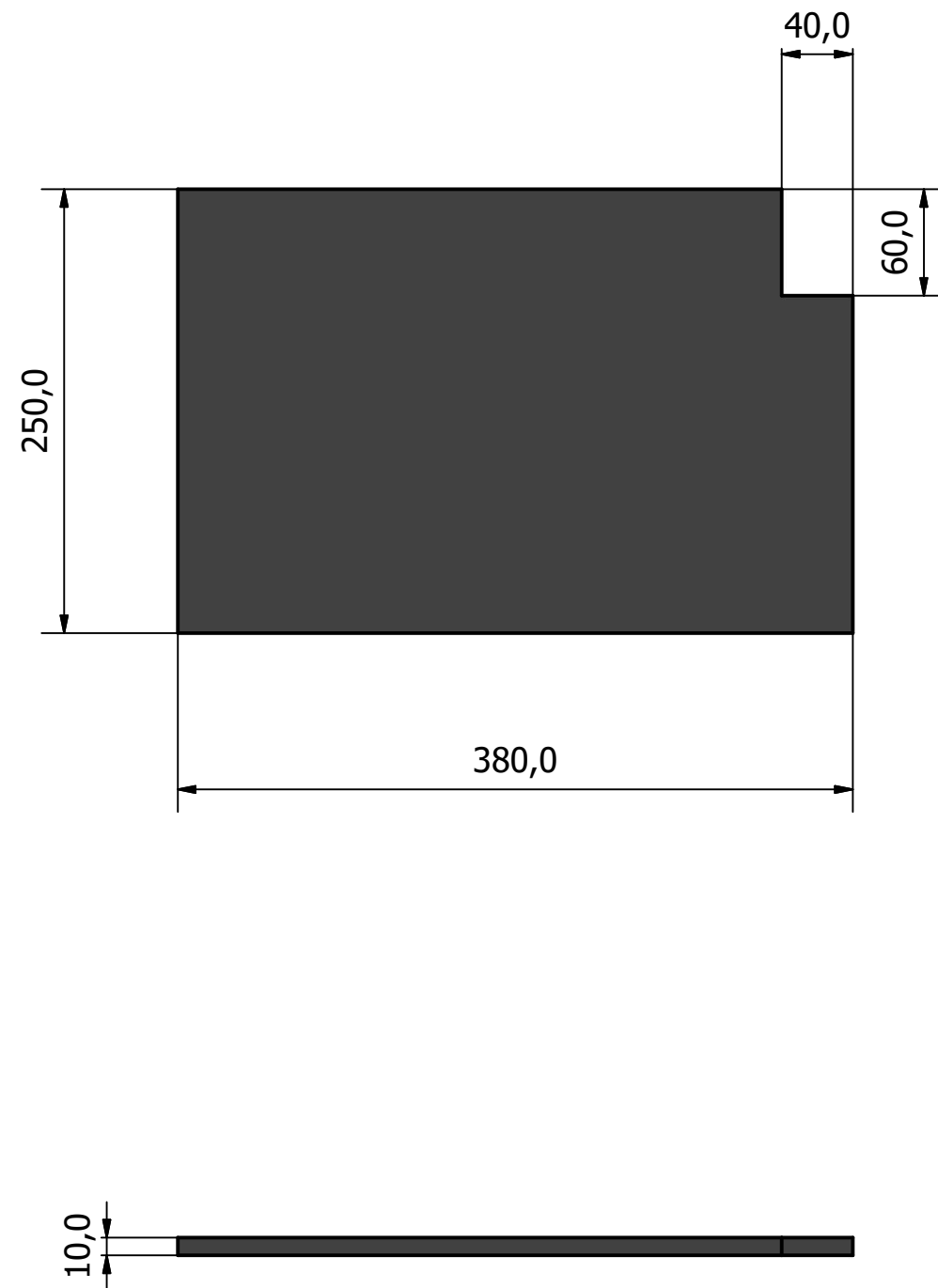
Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Suporte para componentes		
Data:	21/06/2021	Nº Peça: 11	Quant.	14
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:		
		Folha 1/1	Escala: 1:2	 Língua PT

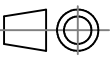


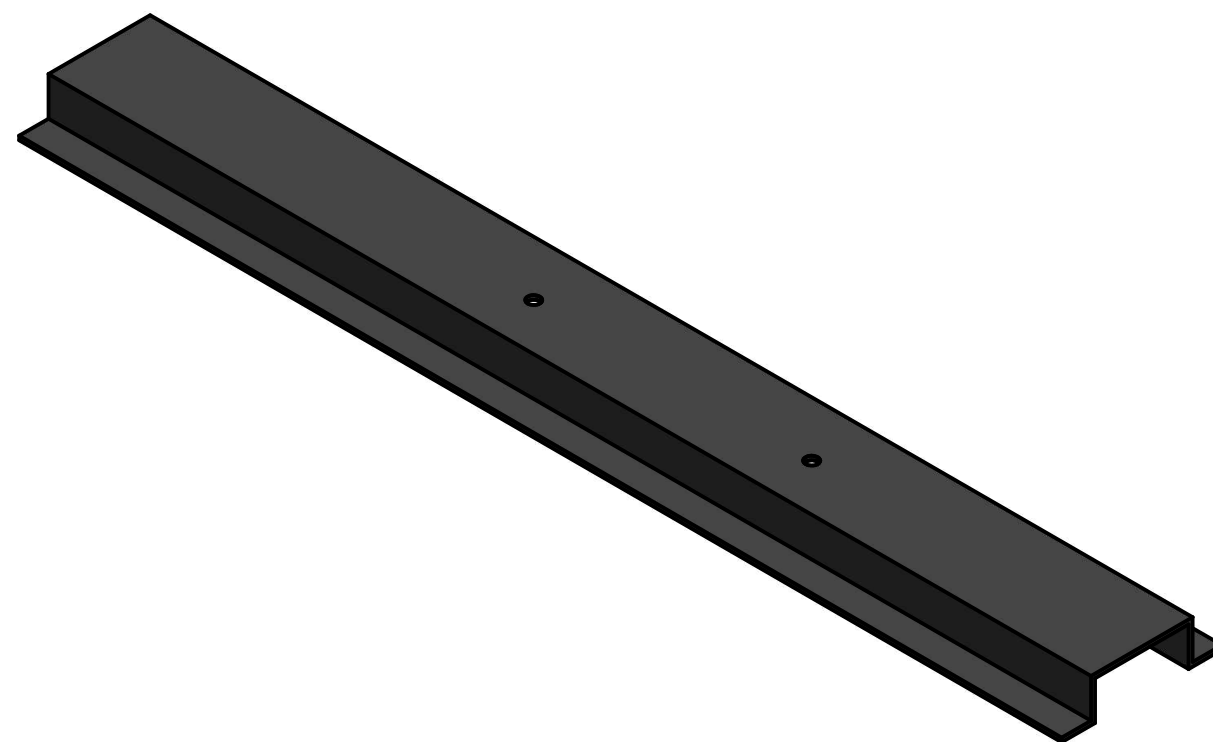
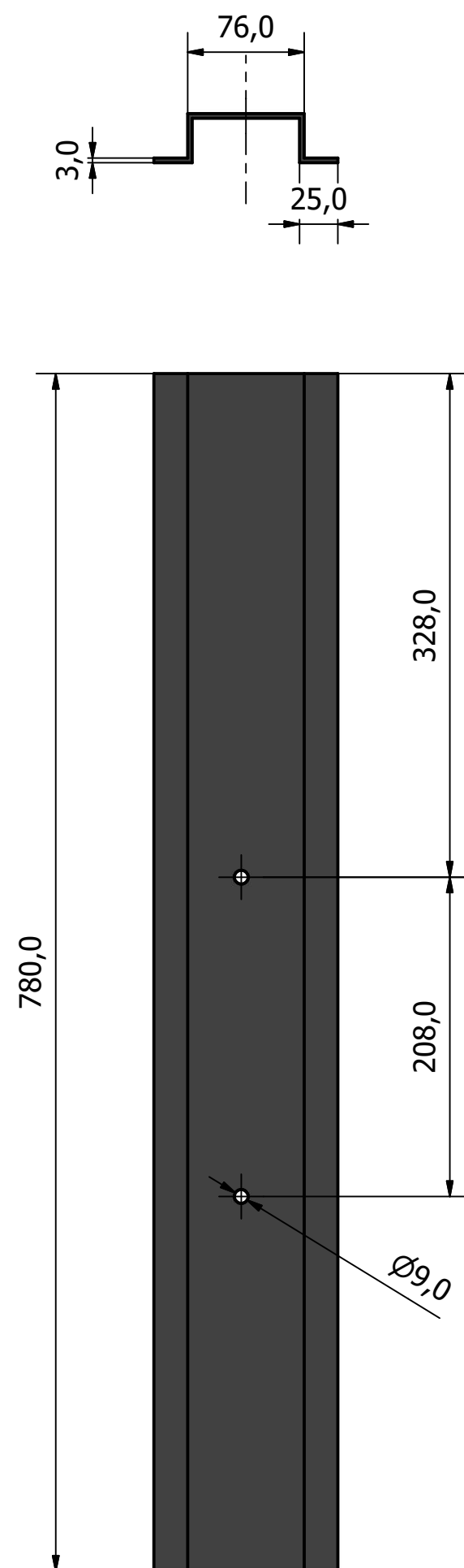
Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Perfil de fixação dos compressores MT		
Data:	22/06/2021	Nº Peça: 12	Quant.	10
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:		
		Folha 1/1	Escala: 1:5	 Língua PT

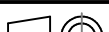


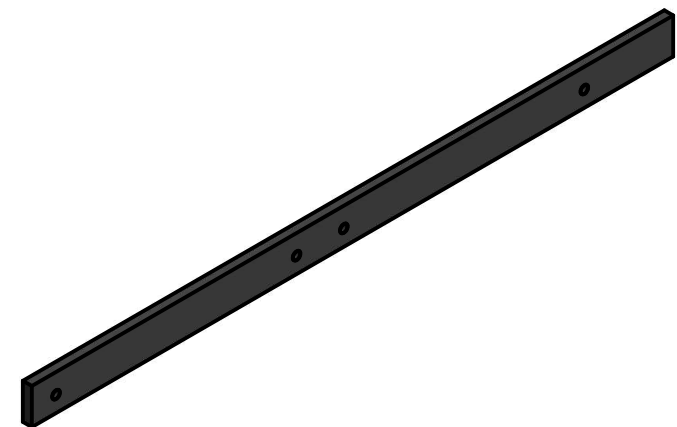
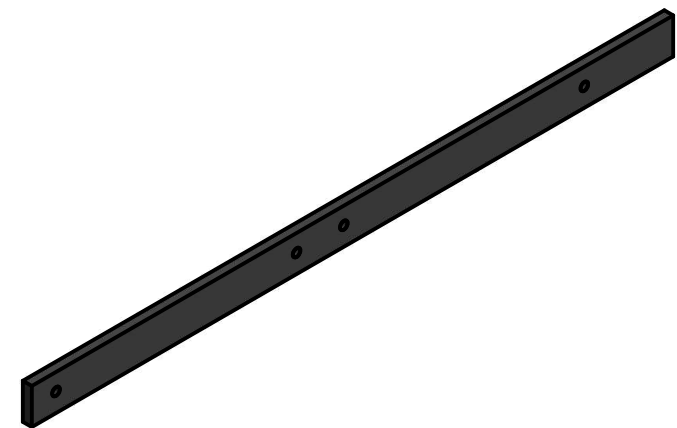
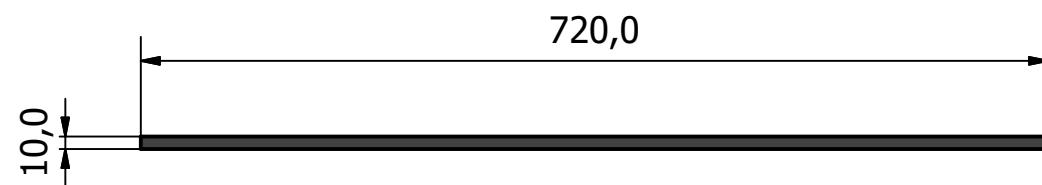
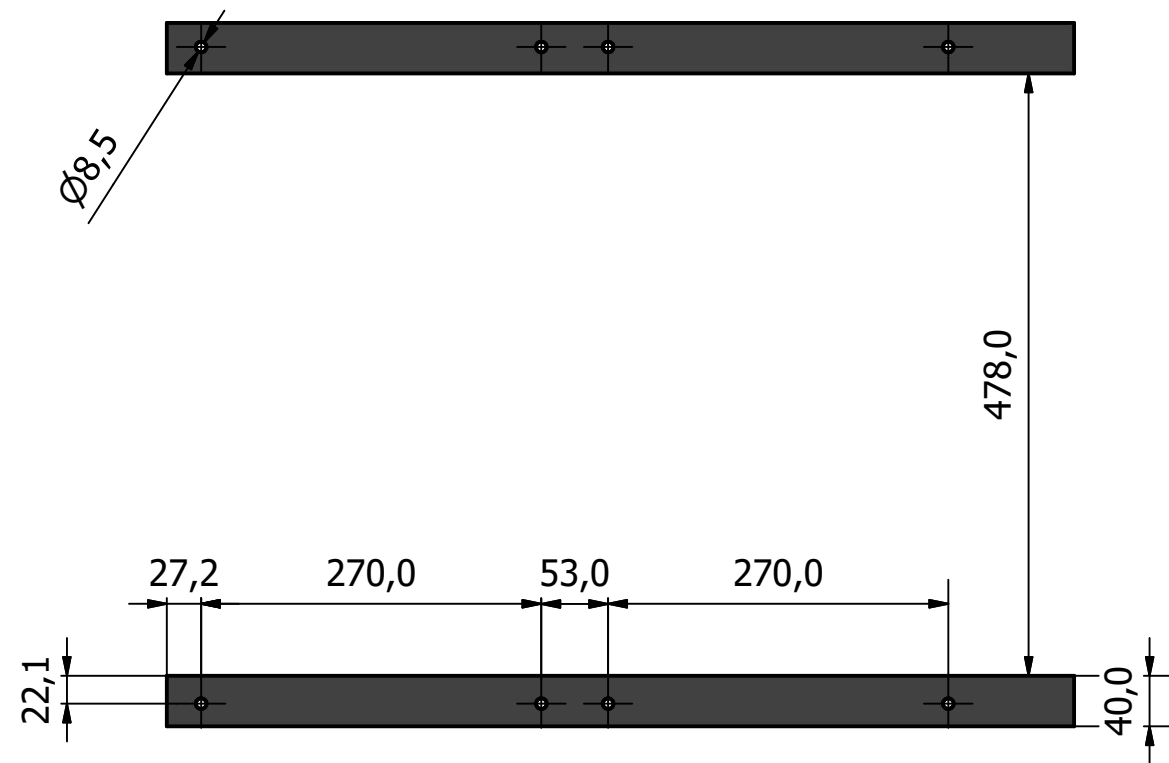
Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Suporte do depósito de líquido		
Data:	22/06/2021	Nº Peça: 13	Quant.	1
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:		
		Folha 1/1	Escala: 1:4	 Língua PT

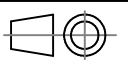


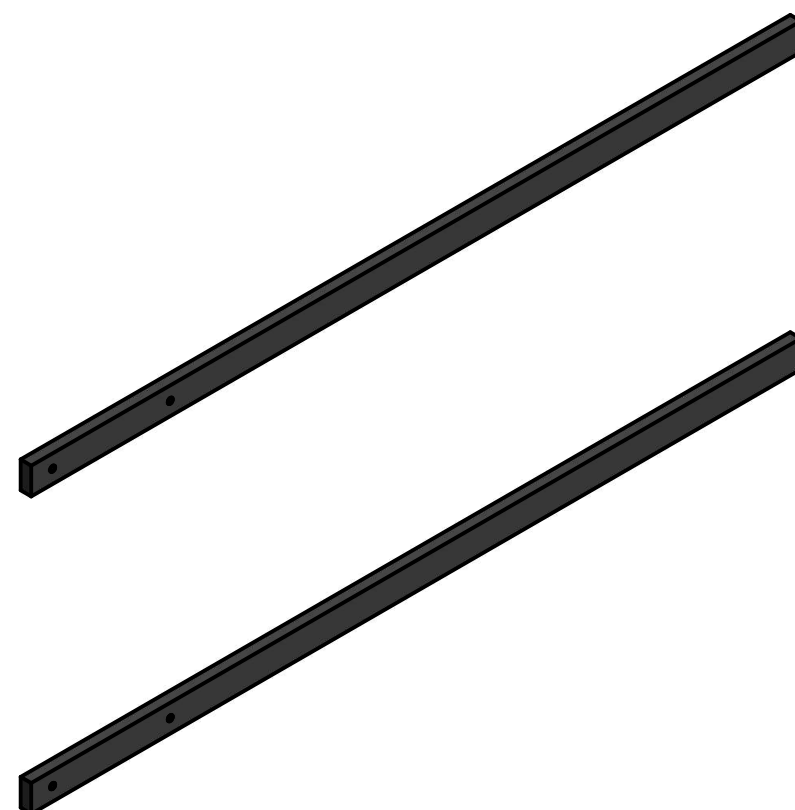
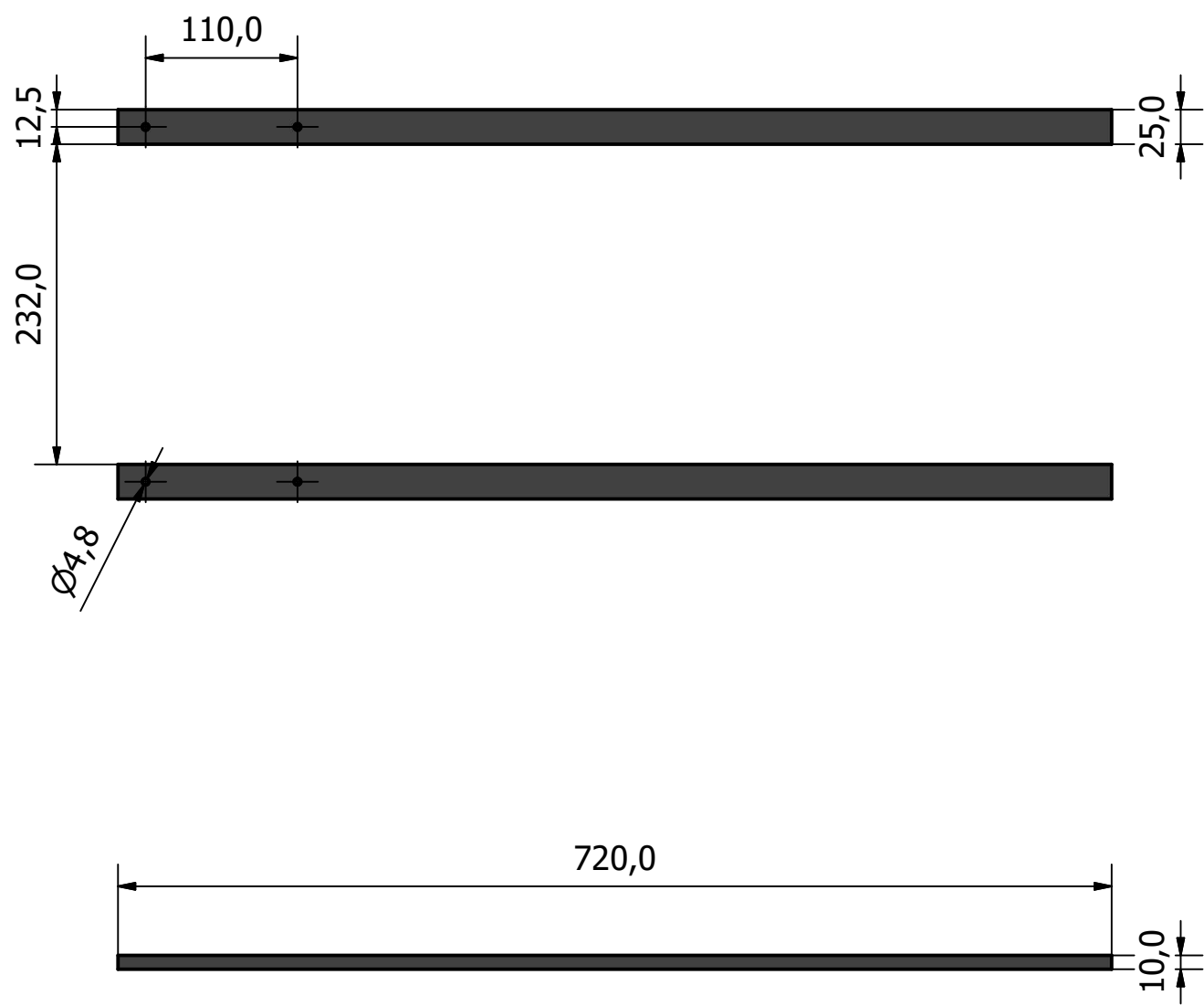
Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Suporte do separador de óleo		
Data:	22/06/2021	Nº Peça: 14	Quant.	1
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:		
		Folha 1/1	Escala: 1:4	 Língua PT

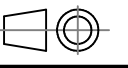


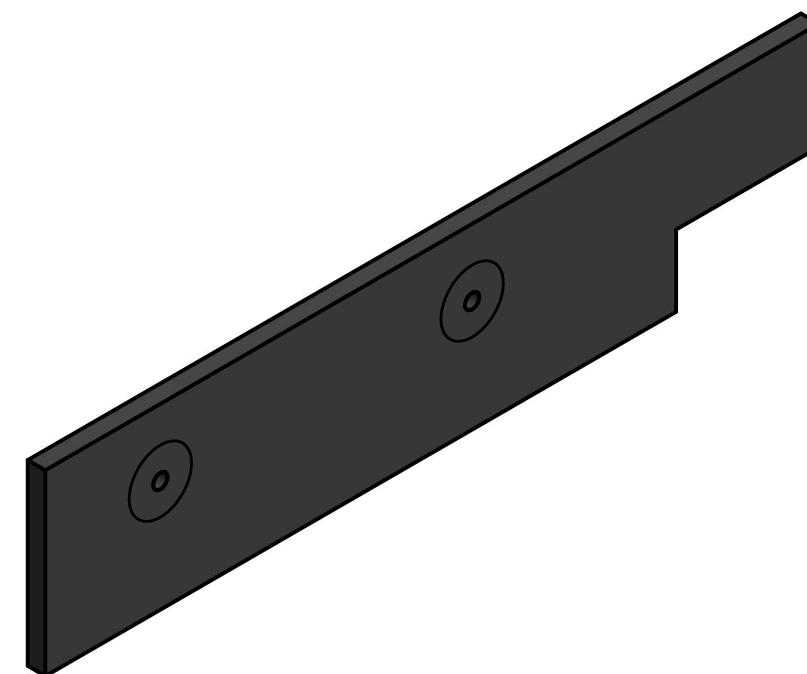
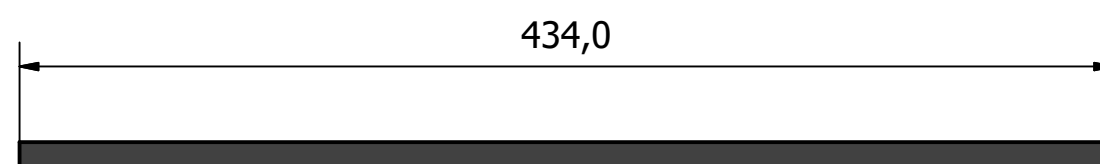
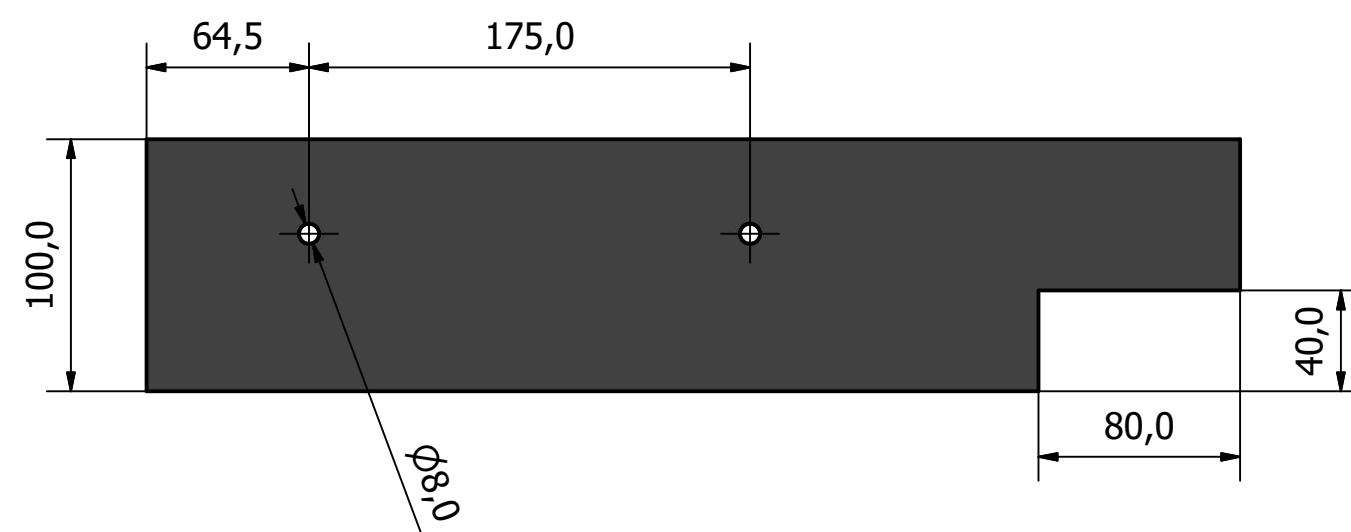
Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Perfil de fixação dos compressores BT					
Data:	23/06/2021	Nº Peça:15		Quant.	6		
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:					
		Folha	1/1	Escala:	1:4		Língua PT

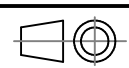


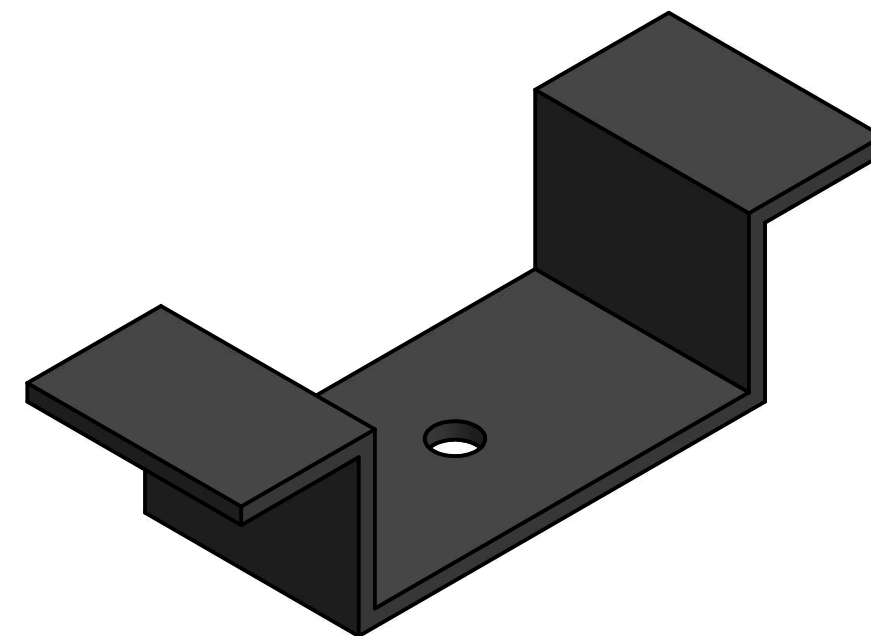
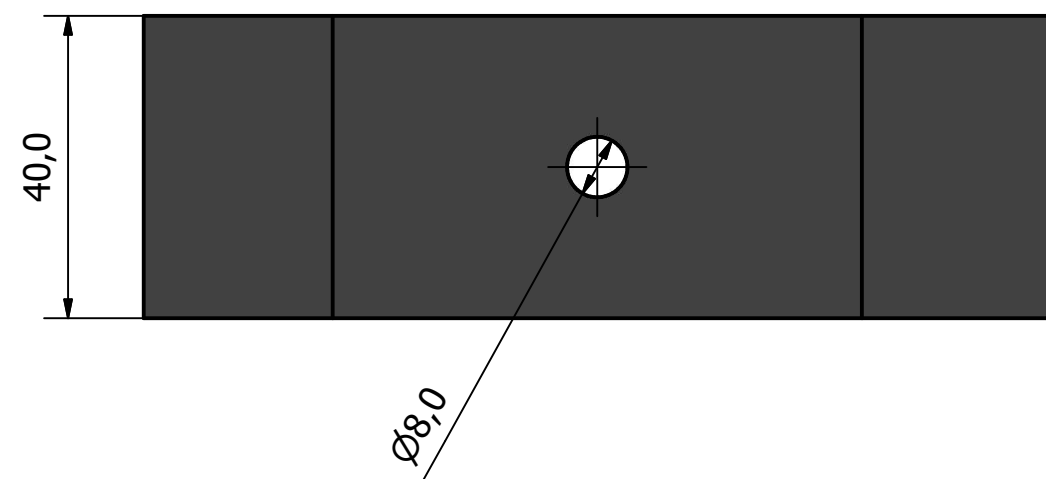
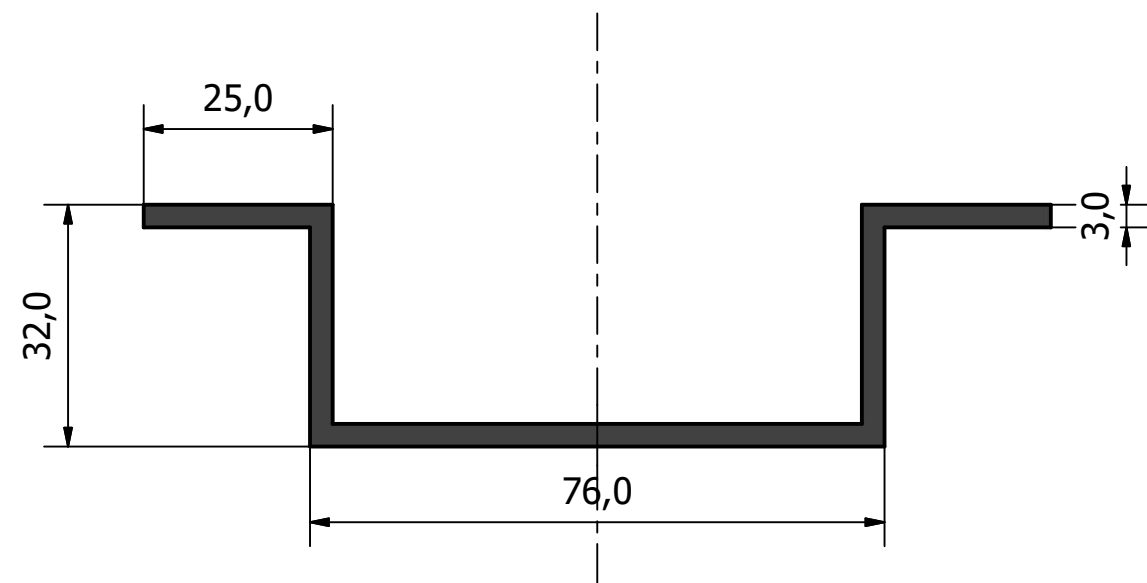
Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Suporte dos variadores					
Data:	23/06/2021	Nº Peça: 16		Quant.	1		
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:					
		Folha	1/1	Escala:	1:4		Língua PT

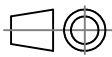


Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Suporte do variador do compressor em paralelo		
Data:	24/06/2021	Nº Peça: 17	Quant.	1
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:		
		Folha 1/1	Escala: 1:5	 Língua PT



Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Suporte de fixação do quadro elétrico		
Data:	25/06/2021	Nº Peça: 19	Quant.	2
		Material:		
		Folha 1/1	Escala: 1:3	 Língua PT



Responsável:	Rúben Vasco	Peça: Apoios dos pés de nivelamento antivibráticos		
Data:	25/06/2021	Nº Peça: 23	Quant.	8
 Instituto Superior de Engenharia do Porto		Material:		
		Folha 1/1	Escala: 1:1	 Língua PT