NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

VASCO SOARES RIBEIRO MENDES DOS SANTOS

Licenciatura em Ciências de Engenharia Mecânica

RACIONALIZAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO DE FERRAMENTAS E DESENVOLVIMENTO DE KITS DE FERRAMENTAS UTILIZADAS NA MANUTENÇÃO DO MOTOR LEAP-1A

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2024

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

RACIONALIZAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO DE FERRAMENTAS E DESENVOLVIMENTO DE KITS DE FERRAMENTAS UTILIZADAS NA MANUTENÇÃO DO MOTOR LEAP-1A

VASCO SOARES RIBEIRO MENDES DOS SANTOS

Licenciatura em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: João Manuel Vicente Fradinho
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: António Calado Ferreira
Engineering & Quality Manager, TAP Air Portugal

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2024

Racionalização da organização de ferramentas e desenvolvimento de kits de ferramentas utilizadas na manutenção do motor LEAP-1A

Copyright © Vasco Soares Ribeiro Mendes dos Santos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.
A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Este documento foi gerado com o processador (pdf/Xe/Lua)LaTeX e o modelo NOVAthesis (v7.1.18) [1].

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento a diversas pessoas que foram importantes durante a realização do estágio e da elaboração da tese, e também no meu percurso académico. A todos agradeço os conselhos e apoio que tive a sorte de obter.

Ao Professor João Fradinho, pela orientação desta dissertação, que sempre com um sorriso disponibilizou a sua ajuda e conhecimento, tornando a elaboração desta dissertação numa experiência agradável. Espero conseguir aplicar com sucesso os conhecimentos que me transmitiu sobre Teoria Axiomática na minha vida profissional.

A todos os docentes do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Nova School of Science and Technology, pelos seus ensinamentos e conhecimentos incutidos ao longo da minha formação superior.

Gostaria de agradecer à TAP pela oportunidade da realização desta dissertação, que desde o gabinete de desenhos à oficina das máquinas me fez sentir bem acolhido. Agradeço em particular ao Engenheiro António Ferreira pela orientação e disponibilidade. Agradeço também ao corpo de engenharia por me terem recebido tão bem. Agradeço ao Engenheiro António Guerreiro por toda a ajuda concedida ao longo da tese. Finalmente, agradeço aos Chefes de Produção, TAM's, TRTMA's e TMA's que fui conhecendo durante o percurso do meu estágio, em especial à equipa da secção dos móveis e da ferramentaria, por toda a colaboração para o desenvolvimento deste projeto.

Obrigado aos "Valverdes"por terem feito o meu percurso universitário tão memorável e um obrigado ao Reis e ao Afo por termos conseguido nestes anos criar um projeto que a muitos sítios nos tem levado.

Um obrigado especial ao Sílvio do Ó por todos os incentivos e ensinamentos que me tem facultado.

O obrigado mais importante vai para a minha família. Para os meus pais, que sempre acreditaram em mim e desafiaram-me em todas as etapas da minha vida a tentar ser a melhor versão de mim próprio. Para os meus avós por todo o encorajamento. Um obrigado também ao meu irmão por ser um bom companheiro.

”

«
I am not afraid of storms, for I am learning how to sail my ship.»

— Louisa May Alcott

Resumo

O transporte aéreo tem evoluído no sentido do aumento da eficiência no consumo de combustível e na redução da poluição produzida, sendo os aviões A320 Neo da Airbus um exemplo desta evolução. Desde 2016, a TAP Air Portugal realiza a manutenção de motores da família A320 - os LEAP-1A, tendo sido uma das primeiras companhias aéreas com esta função. Atualmente, verifica-se que grande parte das ferramentas especializadas empregues na manutenção dos *Leading Edge Aviation Propulsion* (LEAP-1A) são armazenadas pós-utilização nas caixas de expedição em que foram fornecidas. Este facto tem como inconvenientes uma ocupação desnecessária de área oficinal, com uma arrumação pouco eficiente das ferramentas, assim como provoca um maior desgaste das mesmas.

Na presente dissertação apresenta-se uma solução para esta situação com a criação de uma plataforma móvel, ou seja, um carrinho para o transporte de ferramentas que permita, em simultâneo, conferir maior proteção e otimizar o espaço de arrumação. Pretende-se, deste modo, contribuir para a resolução de constrangimentos atualmente existentes na oficina de motores da TAP.

A abordagem para o desenvolvimento do carrinho *Kit Core* teve por base a metodologia da Teoria Axiomática, através da qual foram recolhidos os requisitos funcionais necessários para o desenho do carrinho. Seguidamente, foi utilizado o *software* de modelação 3D SolidWorks para o desenvolvimento do projeto do carrinho e a simulação do comportamento estrutural.

A conceção do protótipo do carrinho *Kit Core* permitiu desenvolver uma solução para o armazenamento de 20 ferramentas que resulta numa otimização na utilização do espaço oficinal, diminuindo em 67% o espaço que as ferramentas ocupam quando armazenadas em caixas de madeira (situação atual), assim como favorece um aumento na eficiência no trabalho de manutenção em virtude do arranjo das ferramentas no carrinho ter em consideração a sequência das tarefas a realizar.

Palavras-chave: Teoria Axiomática, Manutenção Aeronáutica, LEAP-1A, Organização Oficinal

Abstract

Advances in science and technology have increased fuel efficiency and reduced pollution in air transport, with Airbus' A320 Neo aircraft being a prime example of this evolution. Since 2016, TAP Air Portugal has been servicing the engines used by A320 family - the LEAP-1A, having been one of the first airlines to do so. Currently, most of the specialized tools used in LEAP-1A maintenance are stored in their respective shipping boxes after being used. This has the disadvantages of taking up unnecessary workshop space, storing tools inefficiently, and causing them to wear out more easily.

This dissertation presents a solution to this situation by creating mobile platforms, i.e. trolleys for transporting tools, which simultaneously provides greater protection and optimizes storage space. The aim is to contribute to resolving the constraints that currently exist in TAP's engine workshop.

The approach to the development of the *Kit Core* trolley was based on the Axiomatic Design methodology, through which the functional requirements needed to design the trolley were gathered. SolidWorks 3D modelling software was then used to develop the trolley's design and simulate its structural behaviour.

The design of the trolley prototype *Kit Core* made it possible to develop a solution for storing 20 tools that optimizes the use of workshop space, reducing by 67% the space the tools currently occupy when stored in wooden boxes, as well as increasing the efficiency of maintenance work due to the arrangement of the tools on the trolley taking into account the sequence of the tasks to be carried out.

Keywords: Axiomatic Design, Shop Maintenance, LEAP-1A, Shop Organization

Índice

Índice de Figuras **x**

Índice de Tabelas **xiii**

Siglas **xv**

1 Introdução **1**
1.1 Motivação 1
1.2 Objetivos da dissertação 2
1.3 Organização da dissertação 4

2 Materiais e métodos **5**
2.1 TAP Maintenance & Engineering 5
2.2 Motor LEAP-1A 7
2.2.1 Funcionamento 7
2.2.2 Descrição do motor 8
2.2.3 Comparação dos motores CFM56 e LEAP-1A 11
2.3 Teoria Axiomática 12
2.3.1 Abordagem Axiomática ao Projeto 12
2.3.2 Axioma da Independência 13
2.3.3 Axioma da Informação 14
2.3.4 Aplicação da Teoria Axiomática no presente projeto 15

3 Abordagem Axiomática para a conceção do *Kit Core* **17**
3.1 Introdução 17
3.2 Decomposição Axiomática 19
3.2.1 Primeiro nível de decomposição 19
3.2.2 Segundo nível de decomposição para análise de risco e falhas das ferramentas ($ParmetrosdeProjeto(DP)_1$) 21

3.2.3 Segundo nível de decomposição para análise de diferentes tarefas e tempos de utilização (DP_2) . . . 23
3.2.4 Segundo nível de decomposição para parâmetros de arrumação oficinal(DP_3) . . . 25
3.2.5 Segundo nível de decomposição para parâmetros de otimização de *layout*(DP_4) . . . 27
3.2.6 Segundo nível de decomposição para parâmetros de métodos de higiene e segurança no trabalho(DP_5) . . . 29
3.2.7 Segundo nível de decomposição para sistema de proteção de ferramentas (DP_6) . . . 31
3.2.8 Verificação da consistência de projeto relativa ao 1.º e 2.º nível . . . 32
3.2.9 Terceiro nível de decomposição para estudo de desgaste de ferramentas (DP_{11}) . . . 34
3.2.10 Terceiro nível de decomposição para o estudo do tempo de entrega (DP_{12}) . . . 36
3.2.11 Terceiro nível de decomposição para o estudo do manual em relação às tarefas executadas pela mesma ferramenta(DP_{13}) . . . 37
3.2.12 Terceiro nível de decomposição para a análise cronológica da ferramenta no chão da oficina(DP_{14}) . . . 39
3.2.13 Terceiro nível de decomposição para o estudo cronológico do uso de ferramentas(DP_{21}) . . . 41
3.2.14 Terceiro nível de decomposição para a folha de trabalhos e advertências (DP_{22}) . . . 43
3.2.15 Terceiro nível de decomposição para a aquisição de stocks de forma a que ferramentas usadas em várias tarefas fiquem num só kit (DP_{23}) 45
3.2.16 Terceiro nível de decomposição para o estudo cronológico do uso de ferramentas(DP_{24}) . . . 46
3.2.17 Terceiro nível de decomposição para o estudo das ferramentas usadas na tarefa (DP_{25}) . . . 48
3.2.18 Terceiro nível de decomposição para *footprint* reduzida (DP_{31}) . . . 51
3.2.19 Terceiro nível de decomposição para formato paralelipipédica(DP_{32}) 52
3.2.20 Terceiro nível de decomposição para locais de arrumação delineados (DP_{33}) . . . 54
3.2.21 Terceiro nível de decomposição para comprimento e largura com valores próximos(DP_{34}) . . . 55
3.2.22 Terceiro nível de decomposição para o estudo do layout das ferramentas no carrinho(DP_{41}) . . . 58
3.2.23 Terceiro nível de decomposição para o mapeamento das ferramentas na superfície do carrinho(DP_{42}) . . . 61
3.2.24 Terceiro nível de decomposição para o estudo do peso e da geometria das ferramentas(DP_{43}) . . . 62

3.2.25 Terceiro nível de decomposição para o estudo das ferramentas que integram cada carrinho(DP_{44}) . . . 64
3.2.26 Terceiro nível de decomposição para o estudo da legislação da higiene e segurança no trabalho aplicável à geometria do carrinho(DP_{51}) 65
3.2.27 Terceiro nível de decomposição para o estudo da legislação em higiene e segurança no trabalho relativos à força que um técnico pode aplicar(DP_{52}) . . . 67
3.2.28 Terceiro nível de decomposição para a análise de possíveis situações capazes de causar dano físico a um técnico (DP_{53}) . . . 70
3.2.29 Terceiro nível de decomposição para o sistema de proteção de dano físico(DP_{61}) . . . 71
3.2.30 Terceiro nível de decomposição para o sistema de proteção de ferramentas contra pó e corrosão(DP_{62}) . . . 73
3.2.31 Representação gráfica da arquitetura do sistema . . . 74

4 Análise estrutural para o dimensionamento do *kit Core* **79**
4.1 Introdução . . . 79
4.2 Materiais escolhidos . . . 80
4.3 Perfis usados . . . 81
4.4 Análise dos esforços na prateleira de cima . . . 83
4.4.1 Cálculo do peso . . . 84
4.4.2 Estudo da Resistência e Rigidez da prateleira de *teflon* . . . 85
4.4.3 Estudo da Resistência e Rigidez do suporte de perfis em T da prateleira . . . 87
4.5 Análise dos esforços na prateleira do meio . . . 89
4.5.1 Cálculo do peso . . . 90
4.5.2 Estudo da Resistência e Rigidez da prateleira de teflon recolhida 90
4.5.3 Estudo da estabilidade com a prateleira de *teflon* estendida para fora 92
4.5.4 Estudo da estabilidade do apoio vertical da prateleira de teflon . 96
4.6 Análise dos esforços na prateleira de baixo . . . 98
4.6.1 Cálculo do peso . . . 98
4.6.2 Estudo da Resistência e Rigidez da prateleira de teflon . . . 99
4.6.3 Estudo da Resistência e Rigidez do suporte de perfis em T da prateleira . . . 101
4.7 Estudo da estabilidade das colunas de suporte do carrinho . . . 104
4.8 Dimensionamento das rodas do carrinho . . . 107
4.9 Desenho e cálculo em *SolidWorks* . . . 107

5 Conclusões **111**
5.1 Resultados . . . 111
5.2 Recomendações . . . 112

Bibliografia **113**

Anexos

I Anexos **116**

Índice de Figuras

1.1 Disposição atual das ferramentas LEAP-1A 2
1.2 Exemplo de plataforma 3

2.1 Planta da oficina de motores e respetivos anexos (área 1 corresponde ao poço de elevador que faz a ligação do chão de oficina à ferramentaria) 6
2.2 Diagrama de uma turbina a gás típica. 7
2.3 Fluxo de ar num motor LEAP-1A. 8
2.4 Módulos principais do motor LEAP-1A. 9
2.5 *Fan and booster* 9
2.6 Câmara de combustão 10
2.7 Módulo principal LPT 10
2.8 Funcionalidades do módulo principal *Acessory Drives* 11
2.9 Pás do LEAP-1A e do CFM56 12
2.10 Domínios da Teoria Axiomática 12
2.11 Relação entre os domínios funcional e físico. 13

3.1 Sequência da tarefa de desmontagem do módulo principal do *Core* 18
3.2 Fluxograma do projeto do carrinho *Kit Core* com a identificação dos 3 níveis de decomposição 75
3.3 Primeiros 2 níveis do processo de decomposição axiomática do carrinho de ferramentas (DP0) 76
3.4 Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente à análise de risco e falhas das ferramentas (DP1) 76
3.5 Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente à análise de diferentes tarefas e tempos de utilização (DP2) 77
3.6 Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente aos parâmetros de arrumação oficinal (DP3) 77
3.7 Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente à metodologia de otimização de *layout* (DP4) 77

3.8 Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente aos métodos de higiene e segurança no trabalho (DP5) 78
3.9 Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente ao sistema de proteção de ferramentas (DP6) 78

4.1 Representação gráfica da configuração do *Kit Core* 79
4.2 Desenho 3D em *SolidWorks* dos perfis cantoneira (esquerda) e barra em T (direita) 81
4.3 Geometria do perfil de cantoneira de abas iguais 82
4.4 Momentos de inércia do perfil de cantoneira de abas iguais [27] 82
4.5 Geometria do perfil de barra em T 83
4.6 Momentos de inércia do perfil de barra em T [27] 83
4.7 Prateleira de *teflon* do conjunto da prateleira de cima 84
4.8 Diagrama de corpo livre da prateleira de *teflon* de cima 85
4.9 Vista dos perfis de barra em T que suportam a prateleira de *teflon* de cima (assinaladas a vermelho) 87
4.10 Diagrama de corpo livre do perfil de barra em T no conjunto da prateleira de cima 87
4.11 Prateleira de *teflon* do conjunto da prateleira do meio com as respetivas ferramentas 90
4.12 Vista dos perfis de cantoneira que suportam a prateleira de *teflon* do meio . 91
4.13 Diagrama de corpo livre do perfil da prateleira de *teflon* do meio 91
4.14 Vista do carrinho com a prateleira do meio para fora 93
4.15 Corrediças da prateleira do meio e respetivos 2 parafusos de apoio (visíveis no lado esquerdo do desenho) 93
4.16 Diagrama de corpo livre do perfil da prateleira de *teflon* do meio para fora com a carga pontual de um técnico apoiado 94
4.17 Representação dos cordões de soldadura 96
4.18 Prateleira de *teflon* do conjunto da prateleira de baixo 98
4.19 Diagrama de corpo livre da prateleira de *teflon* de baixo 100
4.20 Vista dos perfis de barra em T que suportam a prateleira de *teflon* de baixo . 101
4.21 Diagrama de corpo livre do perfil de barra em T do conjunto da prateleira de baixo 102
4.22 Furos nas colunas dianteiras para passagem de prateleira deslizante 106
4.23 Resultado da simulação do comportamento do carrinho em termos de deformação 108
4.24 Resultado da simulação do comportamento do carrinho em termos de tensão 108
4.25 Resultado da simulação do comportamento do carrinho em termos do fator de segurança 109

I.1 Conjunto geral do carrinho *Kit Core* e todas as *subassemblies* 118

I.2 Visão geral do subconjunto da estrutura de ferro 119
I.3 Desenho técnico do subconjunto da estrutura de ferro 120
I.4 Visão geral do subconjunto da prateleira inferior 121
I.5 Desenho técnico do subconjunto da prateleira inferior 122
I.6 Visão geral do subconjunto da prateleira do meio 123
I.7 Desenho técnico do subconjunto da prateleira do meio 124
I.8 Visão geral do subconjunto da prateleira superior 125
I.9 Desenho técnico do subconjunto da prateleira superior 126
I.10 Fluxograma do projeto do carrinho *Kit Core* com a identificação dos 3 níveis de decomposição 128
I.11 Desenho técnico da rodas da frente 133
I.12 WDesenho técnico da rodas de trás 134

Índice de Tabelas

3.1 Nível 0 19
3.2 Decomposição de FR_1 e de DP_1 22
3.3 Decomposição de FR_2 e de DP_2 23
3.4 Decomposição de FR_3 e de DP_3 26
3.5 Decomposição de FR_4 e de DP_4 27
3.6 Decomposição de FR_5 e de DP_5 29
3.7 Decomposição de FR_6 e de DP_6 31
3.8 Matriz de verificação de consistência do primeiro e segundo nível de decomposição 32
3.9 Decomposição de $FR_{1.1}$ e de $DP_{1.1}$ 34
3.10 Decomposição de $FR_{1.2}$ e de $DP_{1.2}$ 36
3.11 Decomposição de $FR_{1.3}$ e de $DP_{1.3}$ 37
3.12 Decomposição de $FR_{1.4}$ e de $DP_{1.4}$ 39
3.13 Decomposição de $FR_{2.1}$ e de $DP_{2.1}$ 41
3.14 Decomposição de $FR_{2.2}$ e de $DP_{2.2}$ 43
3.15 Decomposição de $FR_{2.3}$ e de $DP_{2.3}$ 45
3.16 Decomposição de $FR_{2.4}$ e de $DP_{2.4}$ 46
3.17 Decomposição de $FR_{2.5}$ e de $DP_{2.5}$ 49
3.18 Decomposição de $FR_{3.1}$ e de $DP_{3.1}$ 51
3.19 Decomposição de $FR_{3.2}$ e de $DP_{3.2}$ 52
3.20 Decomposição de $FR_{3.3}$ e de $DP_{3.3}$ 54
3.21 Decomposição de $FR_{3.4}$ e de $DP_{3.4}$ 56
3.22 Decomposição de $FR_{4.1}$ e de $DP_{4.1}$ 59
3.23 Decomposição de $FR_{4.2}$ e de $DP_{4.2}$ 61
3.24 Decomposição de $FR_{4.3}$ e de $DP_{4.3}$ 62
3.25 Decomposição de $FR_{4.4}$ e de $DP_{4.4}$ 64
3.26 Decomposição de $FR_{5.1}$ e de $DP_{5.1}$ 65
3.27 Decomposição de $FR_{5.2}$ e de $DP_{5.2}$ 67
3.28 Decomposição de $FR_{5.3}$ e de $DP_{5.3}$ 70

3.29 Decomposição de $FR_{6.1}$ e de $DP_{6.1}$ 71
3.30 Decomposição de $FR_{6.2}$ e de $DP_{6.2}$ 73

4.1 Composição química do aço S355 80
4.2 Propriedades mecânicas do aço S355 80
4.3 Propriedades mecânicas do *teflon* 81
4.4 Dimensões e massa do perfil de cantoneira de abas iguais [27] 82
4.5 Variáveis dos momentos de inércia do perfil de cantoneira de abas iguais [27] 82
4.6 Dimensões e massa do perfil de barra em T [27] 83
4.7 Variáveis dos momentos de inércia do perfil de barra em T [27] 83
4.8 Valores calculados da massa das ferramentas e das suas respetivas *shadowboxes* 84
4.9 Carregamento e respetiva flecha máxima da prateleira de *teflon* de cima . . . 86
4.10 Carregamento e respetiva flecha máxima do perfil de barra em T 88
4.11 Momento fletor e esforço transverso causados pelo carregamento de carga distribuída 89
4.12 Pesos das ferramentas da prateleira do meio 90
4.13 Carregamento e respetiva flecha máxima da prateleira de *teflon* do meio recolhida 92
4.14 Momento fletor e esforço transverso causados pelos esforços presentes na prateleira do meio para fora 94
4.15 Valores calculados da massa das ferramentas e das suas respetivas *shadowboxes* 99
4.16 Carregamento e respetiva flecha máxima da prateleira de teflon de baixo . . 101
4.17 Carregamento e respetiva flecha máxima do perfil de barra em T 102
4.18 Momento fletor e esforço transverso causados pelo carregamento de carga distribuída 103
4.19 Estabilidade de uma viga encastrada com extremidade livre 104

5.1 Diminuição de área oficinal ocupada através do projeto *kit Core* 112

I.1 Lista de todas as ferramentas listadas pela CFM para remoção dos submódulos do módulo principal Core 116
I.2 Lista de todas as ferramentas listadas pela CFM para instalação dos submódulos do módulo principal Core 117
I.3 Tabela de cálculo das dimensões da caixa de cada ferramenta e total da àrea ocupada pelas caixas 127
I.4 Especificações da barra em T 129
I.5 Especificações da cantoneira 130
I.6 Especificações da barra 131
I.7 Especificações do tubo 132

SIGLAS

BPR *Bypass Ratio*

CA *Customer Attributes*
ceo *Current Engine Option*

DP Parâmetros de Projeto

ESM Engine Shop Manual

FR *Functional Requirements*

ITEM Ilustrated Tools & Equipment Manual

LEAP-1A *Leading Edge Aviation Propulsion*

neo *New Engine Option*

PTFE Politetrafluoretileno
PV *Process Variables*

SM Submódulos

TA Teoria Axiomática de Projeto
TAP Transportes Aéreos Portugueses

1

Introdução

O transporte aéreo assume uma importância crescente na sociedade e economia mundial. A cada 1,5 segundos que passam, algures no mundo, um Airbus da família A320 aterra ou levanta voo. É a família de aviões a jato comercial mais vendida do mundo, apresenta uma *dispatch reliability* de 99.7% num universo de mais de 117 milhões de ciclos[2].

Tendo em conta as exigências ambientais do mercado atual e a natureza competitiva da indústria aeronáutica, a Airbus desenvolveu uma nova classe de aeronaves para substituir a família A320, a A320. Esta nova opção consegue percorrer mais quilómetros, consome menos combustível, emite menos emissões de carbono e produz menos poluição sonora[2]. A nova família de Airbus é designada por *New Engine Option* (neo) e a antiga por *Current Engine Option* (ceo).

A família A320neo utiliza dois tipos de motor: o LEAP-1A (*Leading Edge Aviation Propulsion*) produzido pela CFM International, empresa de capital americano e francês, e o PW1000G produzido pela Pratt & Whitney, empresa americana. A Transportes Aéreos Portugueses (TAP) utiliza o motor LEAP-1A na sua frota de aviões A320neo. À data de setembro de 2024, a frota de aviões da família A320neo ao serviço da TAP inclui 36 aeronaves [3], existindo 3484 aviões operacionais a nível mundial. Atualmente há um total de 10578 encomendas [4].

No quadro de renovação constante das frotas das companhias aéreas, é cada vez mais importante a especialização e organização das atividades de manutenção dos motores das aeronaves. O reconhecimento internacional da Manutenção e Engenharia da TAP reflete-se no trabalho desenvolvido na manutenção de motores de aviões de outras companhias aéreas, além da manutenção dos motores da sua própria frota. É nesta cada vez maior capacidade de manutenção dos motores LEAP-1A que se insere a presente Dissertação de Mestrado.

1.1 Motivação

O avanço na tecnologia aeronáutica resultou em maiores exigências em termos de manutenção dos motores, quer pelo aumento da sua complexidade, quer pelo facto das

tolerâncias de funcionamento serem mais apertadas. Com o desenvolvimento dos motores LEAP-1A as ferramentas utilizadas na sua manutenção tornaram-se mais complexas, além de serem em maior número. Por esta razão aumentou o número de carrinhos necessários para a manutenção LEAP-1A, quando comparado com os motores da geração anterior. Os carrinhos utilizados na manutenção devem estar cada vez mais preparados para transportar ferramentas de maior dimensão, deste modo, a gestão de espaço de arrumação na oficina é um aspeto crucial do processo de transição da frota de ceo para neo.

1.2 Objetivos da dissertação

Atualmente, a oficina de motores da TAP apresenta a maioria dos *kits* de ferramentas de montagem e desmontagem dos motores LEAP-1A armazenados nas caixas em que foram fornecidas pelo fabricante. Esta situação tem como inconveniente o acelerar do desgaste das ferramentas devido à natureza do material de acondicionamento das caixas, além de tornar o processo de manutenção mais demorado, uma vez que a localização destas não está padronizada.



Figura 1.1: Disposição atual das ferramentas LEAP-1A

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um projeto para plataformas móveis empregues nas estações de trabalho onde são realizadas as ações de manutenção dos motores LEAP-1A, visando a otimização de processos. No trabalho de manutenção é necessário facilitar o movimento das plataformas para diferentes locais consoante a tarefa em execução (por exemplo, desmontagem/montagem de um submódulo). Atualmente, são utilizadas nesta oficina da TAP dois tipos de plataformas móveis:

i) plataforma com formato semelhante a uma prateleira; ii) plataforma com características variáveis consoante a geometria e peso das ferramentas transportadas.

Este projeto de novas plataformas tem por objetivo analisar soluções melhor adaptadas para os diferentes tipos de intervenção, aumentando-se o número de plataformas e padronizando-se a localização das ferramentas, de acordo com um sistema lógico que facilite a intervenção dos técnicos. No desenvolvimento deste projeto são aplicados os princípios de desenho técnico utilizados na empresa.



Figura 1.2: Exemplo de plataforma

O procedimento aplicado no projeto *Kit Core* é composto pelos seguintes passos:

1. Identificação de todos os submódulos a montar e a desmontar;
2. Para cada submódulo, identificação das ferramentas necessárias para a sua montagem e desmontagem;
3. Análise do desgaste de cada ferramenta de modo a planear os períodos de manutenção das ferramentas utilizadas numa mesma plataforma, para reduzir os períodos de paragem da mesma;
4. Organização das ferramentas no carrinho de acordo com o seguimento da sua utilização, para aumentar a eficiência da tarefa e reduzir o erro humano;
5. Análise da possibilidade de agregação de tarefas numa mesma plataforma para aumento de eficiência do processo de manutenção.

A correta identificação das ferramentas facilita a organização das mesmas no carrinho. A identificação do local de armazenamento de cada ferramenta pode ser feita através da colocação de etiquetas no carrinho ou de *Shadowboxes*. Uma *Shadowbox* consiste numa forma de arrumação das ferramentas, na qual estas encaixam perfeitamente no espaço que lhes é destinado, uma vez que este tem o mesmo contorno que a peça. O uso de

Shadowboxes confere uma proteção extra, por garantir que a peça permanece imóvel, sendo o seu uso bastante aconselhado para peças com pinos, pela fragilidade destes.

A tarefa objeto de análise na presente dissertação é desmontagem/montagem do módulo principal do *Core*, no qual se encontra a turbina e compressor de alta pressão e a câmara de combustão. Por esta razão, o carrinho desenvolvido para armazenar e transportar as ferramentas necessárias à manutenção é designado por *Kit Core*.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos. O presente capítulo introduz os temas abordados e apresenta os objetivos da dissertação.

No segundo capítulo é apresentada a empresa TAP, assim como, o funcionamento e composição do motor LEAP-1A para posteriormente ser mais fácil identificar as características das ferramentas necessárias à sua manutenção. São também apresentados os fundamentos da teoria axiomática para fundamentar a cadeia lógica de arrumação definida por esta metodologia.

No terceiro capítulo é apresentada a aplicação da teoria axiomática com a decomposição dos Requisitos Funcionais e Parâmetros de Projeto em 3 níveis. Esta decomposição foi desenvolvida no sentido de permitir a definição das características estabelecidas para o carrinho do transporte de ferramentas.

No quarto capítulo é apresentado o dimensionamento do carrinho de transporte de ferramentas tendo como critério assegurar a estabilidade estrutural durante a sua utilização. Para tal, foi realizada uma análise dos esforços a que este carrinho estará sujeito, tendo em conta o material a utilizar e a geometria dos componentes utilizados na sua construção. Seguidamente, esta análise é comparada com uma simulação feita através do programa *Solidworks*.

No quinto e último capítulo, são apresentadas as conclusões, assim como sugestões para trabalho futuro.

2

Materiais e métodos

2.1 TAP Maintenance & Engineering

A TAP, criada em 1945, é a companhia aérea de bandeira portuguesa, tendo como sede e *hub* principal, Lisboa. A TAP está integrada na maior aliança de companhias aéreas mundial - a STAR ALLIANCE. Atualmente, a frota da TAP é constituída por 101 aeronaves [5], as quais transportaram em 2023 mais de 15,9 milhões de passageiro para 93 destinos diferentes[6]. Em 2023 a TAP foi a 8.ª companhia aérea europeia que mais passageiros transportou, sendo a que mais passageiros transportou para o Brasil. A TAP é assim um elo estratégico entre a Europa e América do Sul.

Atualmente a TAP tem cerca de 7800 trabalhadores, tendo o departamento de Manutenção e Engenharia cerca de 1500 funcionários. A TAP apresentou rendimentos operacionais de 3 485 milhões de euros em 2022, tendo 132 milhões de euros sido devido ao departamento de Manutenção e Engenharia[7]. No entanto, o lucro da TAP em 2022 foi de 65,6 milhões de euros. A TAP tem como acionista a República Portuguesa, através da Direção-Geral do Tesouro e Finanças, com 100% das ações[8].

A TAP está dividida em: i) TAP Transportes Aéreos (TA); ii) TAP *Maintenance & Engineering* (ME); iii) TAP Serviços (TPS).

A TAP *Maintenance & Engineering* está estruturada em 8 áreas: i) Logística; ii) Engenharia e Aeronavegabilidade; iii) Vendas e *Marketing*; iv) *Quality & Safety*; v) Manutenção Operacional de Aviões; vi) Manutenção de Componentes; vii) Manutenção de Motores; viii) Manutenção Base de Motores. A Manutenção de Motores por sua vez, encontra-se estruturada em 4 áreas: i) Engenharia e Qualidade; ii) Planeamento e Controlo; iii) Produção Motores; iv) Máquinas e Tratamentos.

A área de Manutenção de Motores engloba três edifícios: a oficina das máquinas de alta precisão; a oficina dos banhos eletrolíticos e a oficina de motores. A presente dissertação considera o trabalho realizado na oficina de motores, a qual está organizada em áreas e anexos (Figura 2.1).

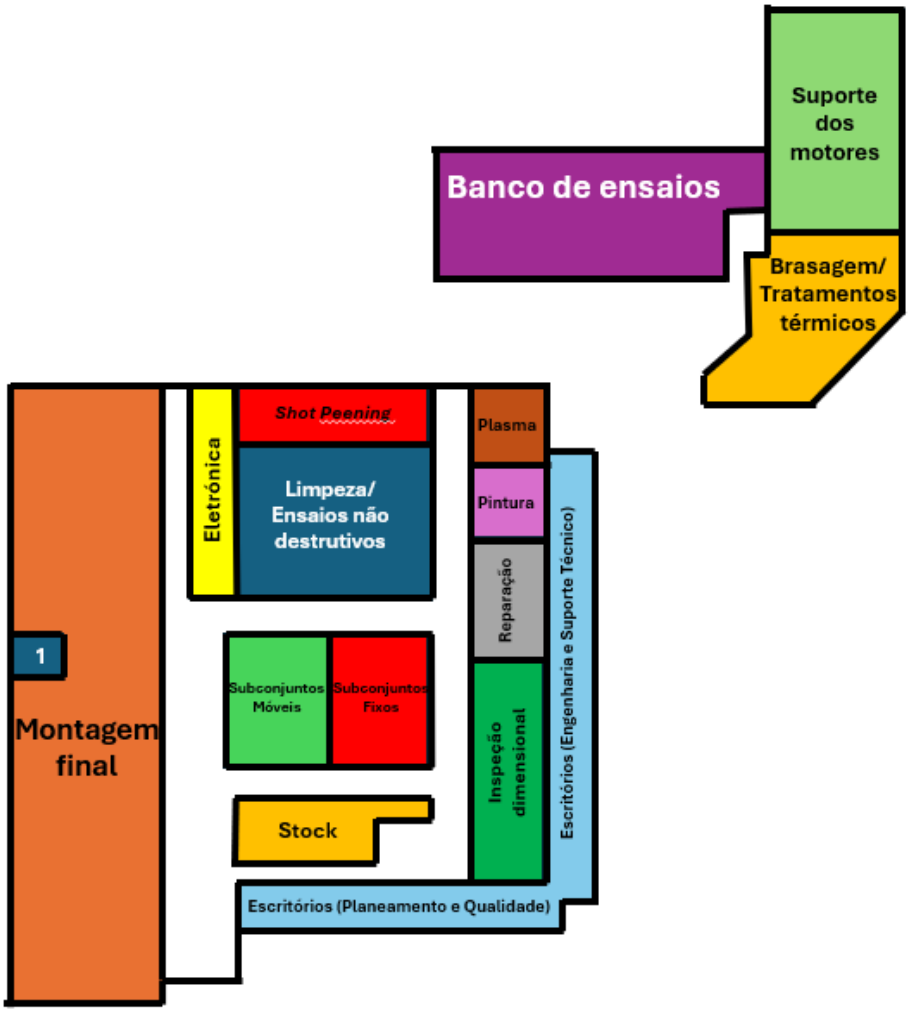


Figura 2.1: Planta da oficina de motores e respetivos anexos (área 1 corresponde ao poço de elevador que faz a ligação do chão de oficina à ferramentaria)

Do conjunto das diferentes áreas da oficina de motores, as que foram consideradas no projeto do carrinho *Kit Core* são as seguintes:

- Área da Montagem Final. É a maior área da oficina, a qual, além de ser utilizada na receção e expedição dos motores, é o local onde os módulos principais são montados e desmontados. Esta área serve também para o armazenamento de motores que foram sujeitos a ações de manutenção e que aguardam transporte. Não sendo esta a área atribuída à utilização do carrinho *Kit Core*, este contém ferramentas que são utilizadas nesta área é possível a utilização do mesmo neste local, o que aumenta a sua versatilidade.

- Área dos Subconjuntos Móveis. Neste local são realizadas as ações de manutenção de maior complexidade, associadas aos submódulos que compõem as partes móveis dos módulos principais. O carrinho *Kit Core* foi especificamente projetado para uma ação de manutenção realizada nesta área - a desmontagem do módulo principal.

- Ferramentaria. Esta área serve de local de armazenamento das ferramentas específicas para remoção e instalação de componentes do motor, assim como de outras menos volumosas e de funcionalidade mais genérica quando não estão a ser utilizadas. A ferramentaria situa-se no piso inferior ao das restantes áreas da oficina de motores.

2.2 Motor LEAP-1A

2.2.1 Funcionamento

O advento do motor a jato foi contemporâneo à Segunda Guerra Mundial. No pós-guerra, seguindo as tendências de dar um uso civil às tecnologias desenvolvidas na última meia década, o motor a jato foi incorporado pela aviação civil. Assim deu-se uma democratização das viagens aéreas, contribuindo assim para o mundo globalizado do século XXI que se conhece.

O funcionamento de um motor a jato baseia-se na terceira lei de Newton: toda força de ação empregada sobre um corpo provoca uma força de reação desse corpo sobre aquele que produziu a ação inicial, constituindo um par de ação e reação. Ou seja, a massa de ar entra no motor, os compressores aumentam a pressão e a temperatura de forma a aumentar o poder de combustão. Na câmara de combustão mistura-se combustível com o ar comprimido e dá-se a ignição. Com este aumento de energia cinética, a massa de gás é acelerada na direção oposta ao novimento do avião, acelerando-o assim na direção pretendida[9]. Parte da energia da combustão é ainda transformada em energia mecânica através do uso de turbinas, colocando em movimento os compressores e a hélice. Este funcionamento é apresentado na Figura 2.2.

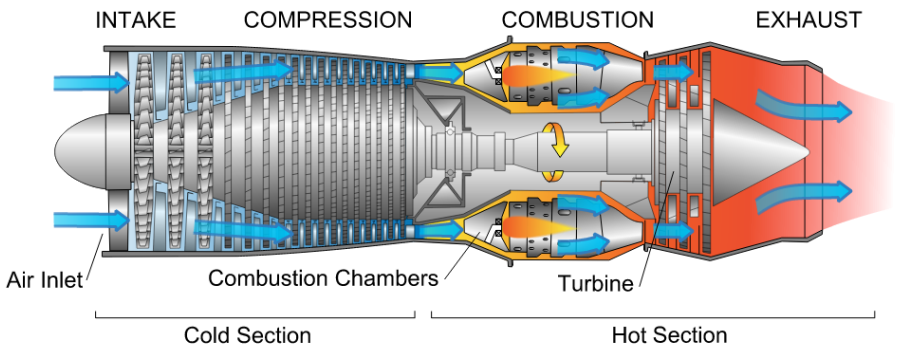


Figura 2.2: Diagrama de uma turbina a gás típica [10]

O exemplo na Figura 2.2 demonstra o funcionamento de um *turbojet*. Um *turbojet* é a uma turbina a gás que funciona sem que ocorra desvio de ar do motor. O *turbojet* tem como vantagens resultar em velocidades maiores e motores mais leves. No entanto, não é eficiente em termos de consumo de combustível. O *turbofan* consiste numa solução criada

para a aviação comercial, na qual, é acrescentada então uma hélice à frente do motor para promover a aspiração de ar e, em simultâneo, o desvio de parte do ar[11]. O motor LEAP-1A é um motor do estilo *turbofan*, como apresentado na Figura 2.3.

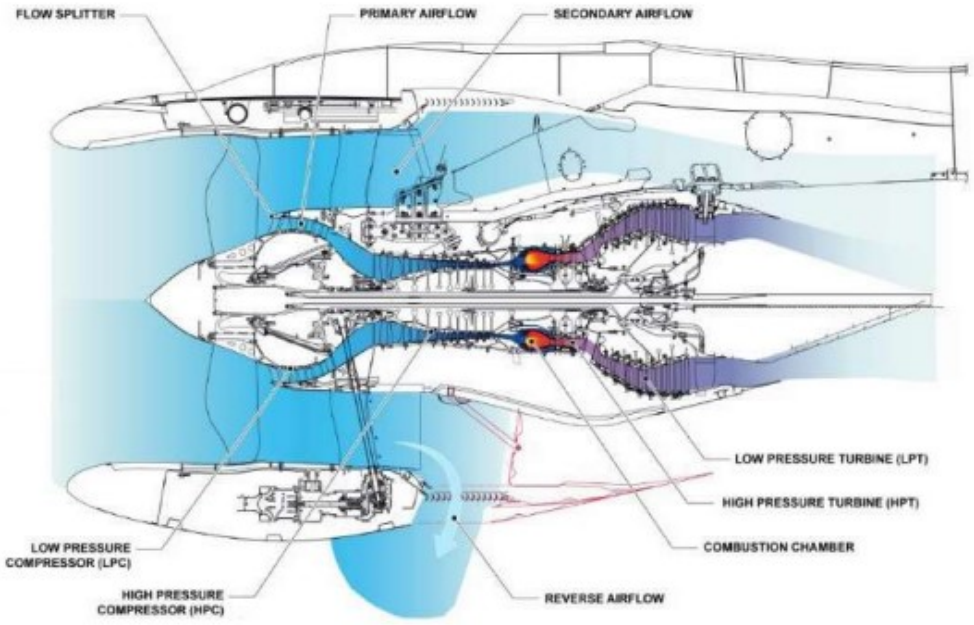


Figura 2.3: Fluxo de ar num motor LEAP-1A [12]

Assim, a propulsão vem de duas fontes, da massa de ar quente que sai do motor e do ar acelerado pela hélice[11]. A razão do ar que não entra no motor com o que passa pelo motor chama-se Razão de Diluição (RD) ou *Bypass Ratio Bypass Ratio* (BPR) em inglês. Por exemplo, se a Razão for 10:1, por cada 10 kg de ar que passam pelo *bypass*, 1 kg de ar passa pelo motor. Este é um parâmetro muito importante na indústria aeronáutica, pois quanto maior for o fator de diluição, menor é o consumo de combustível.[13].

2.2.2 Descrição do motor

O LEAP-1A é constituído por 4 módulos principais [12]:

- *Fan and Booster Major Module*
- *Core Major Module*
- *Low Pressure Turbine Major Module*
- *Acessory Drive*

Apresenta-se na Figura 2.4 a localização dos módulos princiapis do motor LEAP-1A.

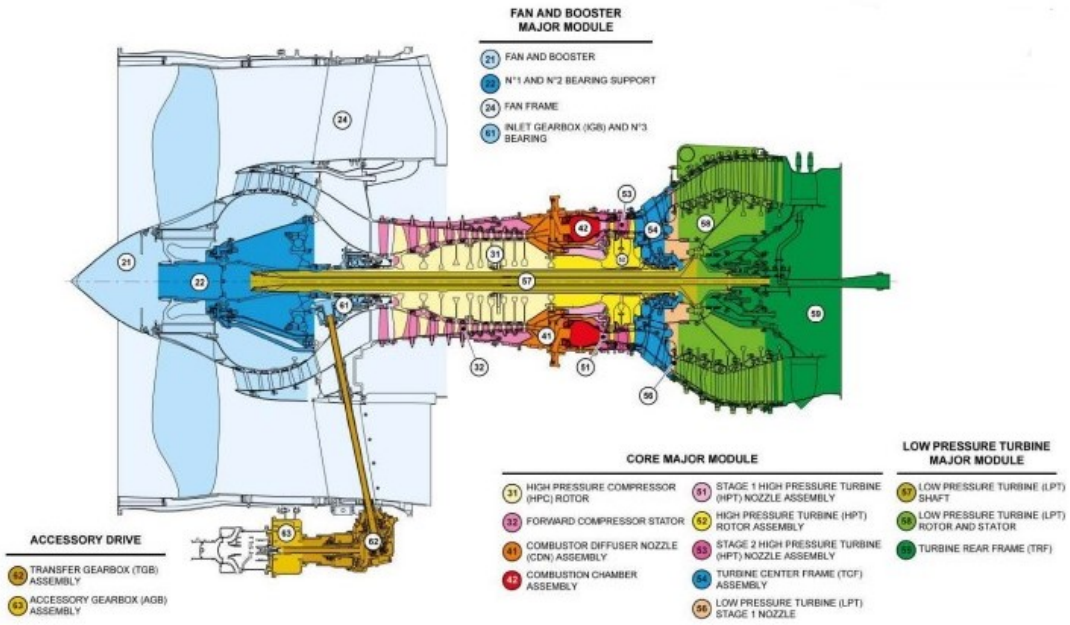


Figura 2.4: Módulos principais do motor LEAP-1A [12]

O *Fan and Booster Major Module*, consiste na hélice, no compressor de baixa pressão e na estrutura enolvente. Este módulo tem 2 funções: i) desviar parte do ar através da hélice e dos desviadores de caudal e ii) comprimir o fluxo de ar direcionado ao motor. Este módulo é constituído por 4 submódulos. Destes, o *fan and booster* (submódulo homónimo do módulo principal) consiste no compressor de baixa pressão LPC e na estrutura de suporte das pás da hélice. A hélice é composta por 18 pás, produzidas de material compósito revestido de titânio. A estrutura de suporte das pás está rebitada ao LPC. O *fan and booster* é apresentado na Figura 2.5, na qual se representam os 3 andares que integram o compressor.

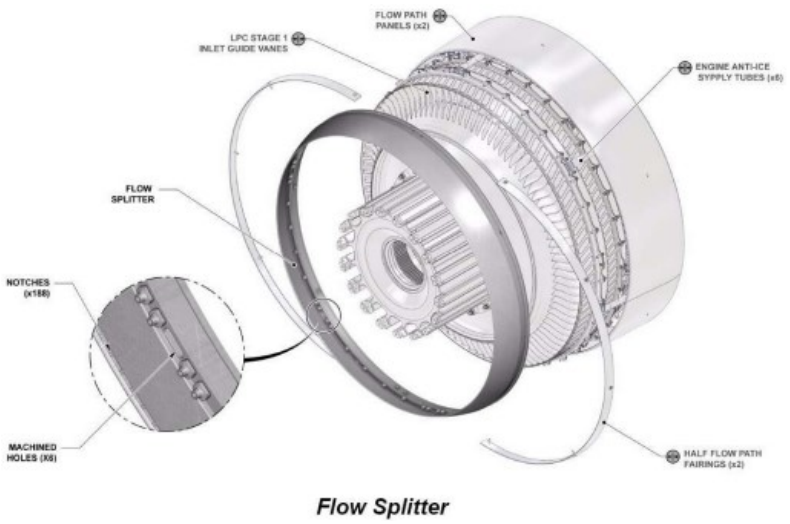


Figura 2.5: *Fan and booster* [12]

O *Core Major Module* é constituído pela câmara de combustão, o compressor de alta

pressão (HPC) e a turbina de alta pressão (HPT). É formado por 9 submódulos. O compressor e a turbina estão ligados diretamente, rodando à mesma velocidade angular. É no *Core Major Module* que se observam as condições de pressão e temperatura mais elevadas, sendo necessária a utilização sistemas sofisticados de arrefecimento para proteção dos componentes internos.

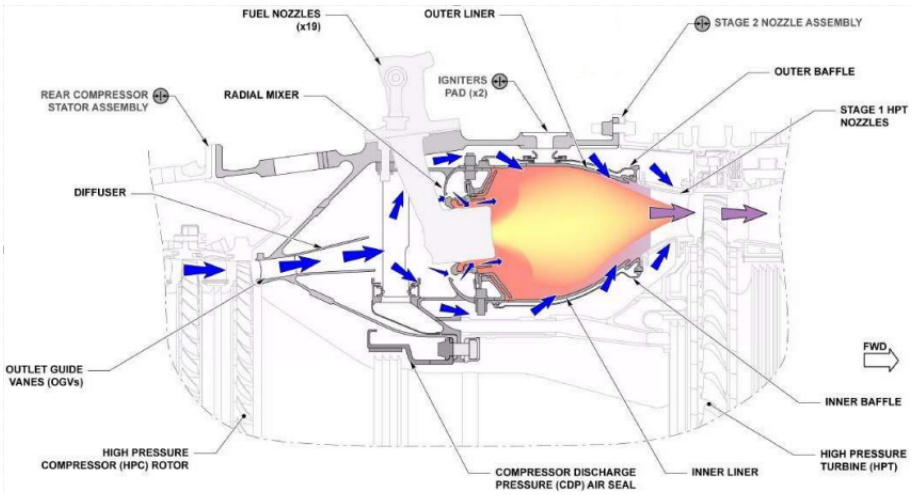


Figura 2.6: Câmara de combustão [12]

O *Low Pressure Turbine Major Module* é formado por 3 submódulos, designadamente: o veio da turbina de baixa pressão (LPT), o rotor e stator da LPT e o painel traseiro das turbinas. O veio da LPT transmite o momento captado pela turbina de baixa pressão para o compressor de baixa pressão e para a hélice, rodando estes 3 componentes com a mesma velocidade angular.

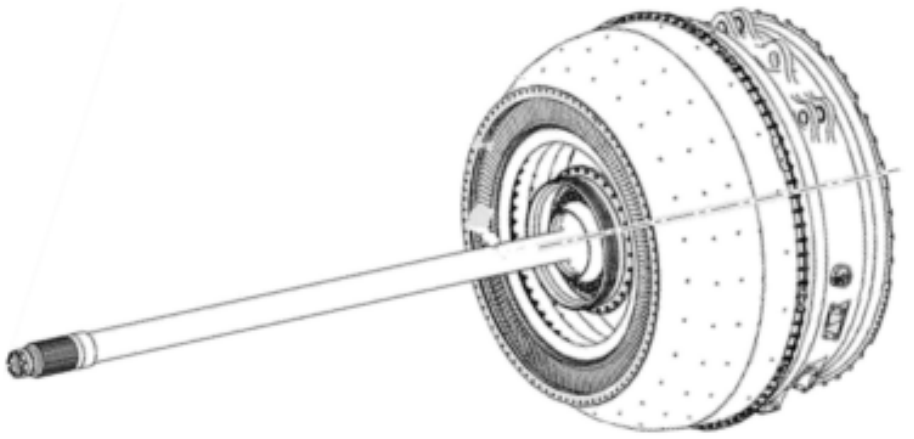


Figura 2.7: Módulo principal LPT [12]

A *Acessory Drive* tem 2 funções: i) no arranque, fornecer energia mecânica ao HPC para ligar o motor e ii) durante o funcionamento do motor, fornecer energia mecânica resultante da rotação do HPC à aeronave e componentes. As duas funcionalidades apresentam-se na Figura 2.8.

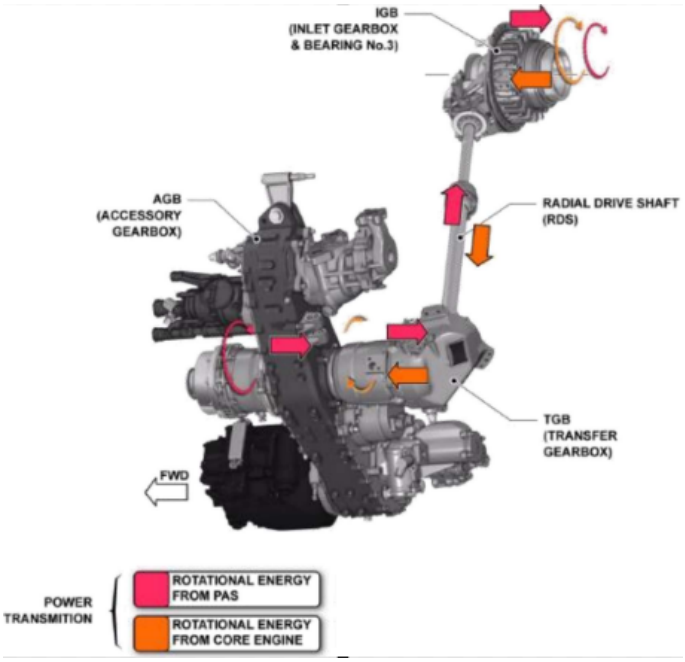


Figura 2.8: Funcionalidades do módulo principal *Acessory Drives* [12]

2.2.3 Comparação dos motores CFM56 e LEAP-1A

Existe uma diferença no tipo de motor utilizado nas famílias A320ceo e A320neo: cerca de 60% das aeronaves A320ceo utilizam o motor CFM56[14] e 45% dos A320neo utilizam o motor LEAP-1A[12]. Desta forma, ao serem produzidos pelo mesmo consórcio, é possível considerar que o LEAP-1A é sucessor do CFM56. As vantagens associadas ao LEAP-1A são as seguintes[12]:

- A eficiência da utilização de combustível é 15% superior à do CFM56 devido a um BPR maior (LEAP-1A é igual a 11:1 e no CFM56 é de 6:1);
- A poluição sonora é reduzida em 75% da verificada pelo motor CFM56;
- As emissões de NOx são 50% inferiores à do CFM56 [15].

Em termos de fiabilidade e custos de manutenção, o LEAP-1A é semelhante ao CFM56.

O LEAP-1A apresenta diferenças na composição das pás da hélice. Enquanto no motor CFM56 são feitas de titânio, no motor LEAP-1A são feitas de material compósito revestido por titânio. Isto faz com que o peso final dos componentes do avião seja menor, aumentando a eficiência no consumo de combustível. Adicionalmente, o material compósito aumenta a resistência das pás ao impacto de objetos.

No motor LEAP-1A foram implementados sistemas inovadores para proteção dos compressores contra a erosão causada por partículas e danos devido a impacto de objetos. Adicionalmente, o aumento do tamanho da hélice (e correspondente aumento da força centrífuga) afasta mais as partículas do compressor, encaminhando-as para o canal de

bypass (Figura 2.9). A tecnologia do rotor do compressor de alta pressão também foi melhorada no sentido de o tornar mais resistente à erosão.

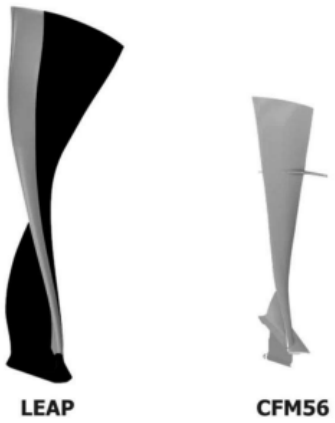


Figura 2.9: Pás do LEAP-1A e do CFM56 [12]

Em conclusão o motor LEAP-1A é mais económico, menos poluente e mais resistente, tendo um desempenho superior ao do CFM56.

2.3 Teoria Axiomática

2.3.1 Abordagem Axiomática ao Projeto

A Teoria Axiomática de Projeto (TA) tem por objetivo estabelecer uma base científica para o projeto e de melhorar a organização das atividades do projeto, através do fornecimento de fundamentos teóricos baseados em pensamentos e ferramentas lógicos e racionais[16]. De acordo com a teoria axiomática, os projetos organizam-se em 6 etapas: identificação de problemas; formalização dos requisitos; criação de soluções alternativas; análise das alternativas; seleção da melhor alternativa e implementação da alternativa selecionada[17]. Para auxiliar à execução destas etapas, a Teoria Axiomática considera 4 domínios tal como apresentados na Figura 2.10.

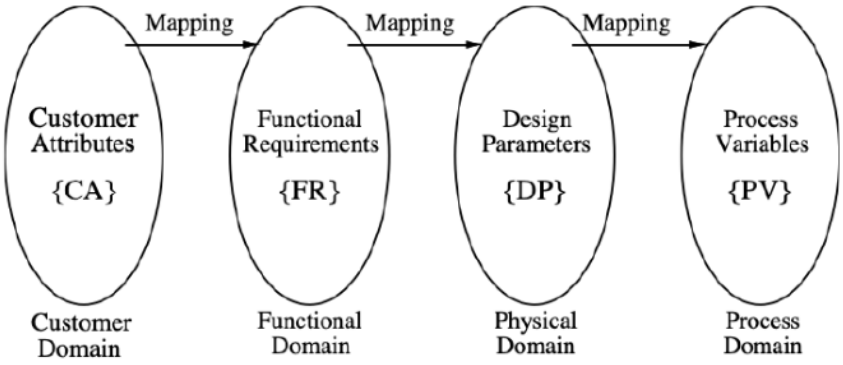
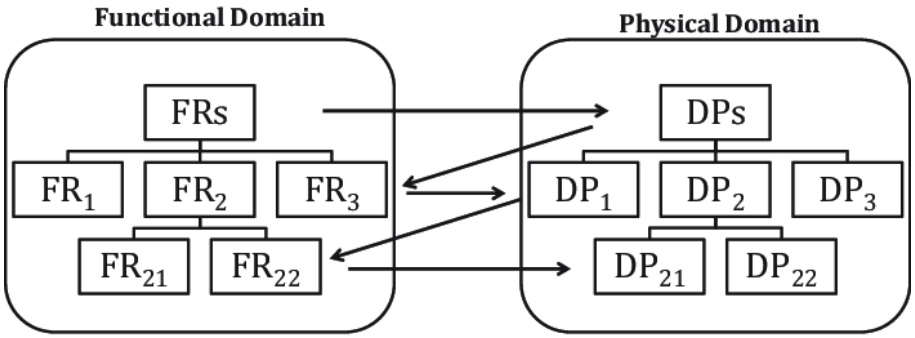


Figura 2.10: Domínios da Teoria Axiomática [18]

No **domínio do cliente** é onde se estabelecem os objetivos que o projeto tem de cumprir. As Necessidades do Cliente ou *Customer Attributes* (CA) são expressas em linguagem pouco técnica e vaga. No **domínio funcional** estabelecem-se os requisitos funcionais a desenvolver e as restrições existentes. Este domínio é expresso em linguagem neutra, tendo todos os Requisitos Funcionais ou *Functional Requirements* (FR) de ser objetivos e quantificáveis se possível. Os requisitos funcionais devem ser independentes entre si, ou seja, qualquer mudança que um sofra não pode afetar os restantes [19]. Os DP definem a composição física para satisfazer estes requisitos funcionais[17]. Estes parâmetros estão inseridos no **domínio físico**. O **domínio do processo** garante a execução destes componentes físicos, através das Variáveis de Processo ou *Process Variables* (PV).

O raciocínio da TA é desenvolvido através da resposta a um conjunto de perguntas. No domínio funcional o foco é o estabelecimento das funções a alcançar, ou seja, corresponde a "quês". No domínio físico o foco está na forma de como alcançar estes objetivos, ou seja, corresponde a "comos". Através das respostas às perguntas criadas são geradas novas perguntas mais concretas, criando assim uma ligação ziguezagueante entre os dois domínios. Com este processo surge uma hierarquia, que no topo corresponde aos conceitos mais abstratos e gerais, e na base, a conceitos mais concisos e aprofundados, tal como esquematizado na Figura 2.11. Quanto mais complexo um projeto é, mais útil esta decomposição hierárquica será.



.

Figura 2.11: Relação entre os domínios funcional e físico [17]

2.3.2 Axioma da Independência

O Axioma da Independência indica que cada requisito funcional deve responder somente a um parâmetro de projeto[19]. No entanto, tal nem sempre é possível devido a constrangimentos práticos. O importante é ser possível mudar um DP para satisfazer um FR sem prejudicar os outros FR. Para esquematizar a relação entre os FR e os DP, é normalmente utilizado uma matriz de projeto "[A]"(equação 2.1)[17].

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \tag{2.1}$$

A relação entre os FR e os DP é definida *a priori* pelo projetista. Esta análise ajuda o projetista a escolher a melhor solução para o projeto.

Uma matriz de projeto diagonal (equação 2.2) significa que o projeto encontra-se na condição perfeita de independência - projeto desacoplado.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \tag{2.2}$$

Quando a matriz de projeto é triangular (equação 2.3), o projeto é desacoplável. Este projeto pode ser independente se os DP forem definidos numa sequência específica.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ 0 & A_{22} & A_{23} \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \tag{2.3}$$

Um projeto redundante ocorre quando, embora havendo mais DP que FR, cada requisito possa ser alterado sem afetar os outros requisitos. Esta situação é exemplificada na equação 2.4.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} \\ 0 & A_{22} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} \tag{2.4}$$

Qualquer matriz que não corresponda às anteriores consiste numa matriz acoplada e não respeita o Axioma da Independência. Estas soluções são as menos ideais a serem escolhidas para o projeto. Exemplifica-se uma matriz acoplada na equação 2.5.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ 0 & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \tag{2.5}$$

O melhor projeto é o desacoplado, vindo a seguir o desacoplável e depois o redundante. O projeto acoplado deve ser evitado.

2.3.3 Axioma da Informação

O Axioma da Informação aplica-se depois do Axioma da Independência. Dado que, na situação de haver 2 soluções no mesmo nível de viabilidade, é preciso escolher uma das duas. A Teoria Axiomática é uma ferramenta lógica ao uso do projetista, de forma a que a escolha da melhor solução não seja arbitrária ou subjetiva. Para tal, inclui uma forma de quantificar o grau de satisfação dos requisitos impostos[17]. De acordo com Suh, quanto menor for o conteúdo de informação de um projeto, melhores serão as hipóteses de sucesso do mesmo[16]. A quantidade de informação de um projeto é calculada pela probabilidade que o projeto tem em conseguir satisfazer os FR[17]. A informação para um FR é calculada

de acordo com a equação 2.6.

$$I_i = -\log_2 p_i = \log_2(\frac{1}{p_i}) \tag{2.6}$$

Caso vários FR sejam independentes entre si, a informação destes pode ser somada. Para projetos desacoplados, é preciso recorrera à probabilidade condicionada. Para projetos acoplados é impossível calcular a quantidade de informação[19].

Portanto, o Axioma da Independência identifica boas soluções entre as soluções disponíveis e o Axioma da Informação seleciona a melhor das boas soluções

2.3.4 Aplicação da Teoria Axiomática no presente projeto

A utilização da Teoria Axiomática no projeto a desenvolver tem por objetivo facilitar e agilizar o desenvolvimento do mesmo. Deste forma, a Teoria Axiomática serve como base para uma análise metódica e detalhada de problemas e constrangimentos possíveis, assim como no delinear da melhor solução.

Pode ser de grande importância na altura de conceptualização das plataformas móveis o Axioma da Independência. Pois ao definir na totalidade todos os requisitos da plataforma, quer em termos das dimensões que deve ter, quer nas ferramentas que deverá armazenar, poderão ser encontradas as dependências e redundâncias possíveis de eliminar. Esta atenção à independência dos Requisitos Funcionais da plataforma poderá contribuir para aumentar a produtividade do processo de manutenção. Esse ganho de eficiência poderá ser benéfico para o funcionamento da TAP. O Axioma da Informação também é aplicável.

3

Abordagem Axiomática para a conceção do *Kit Core*

3.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a decomposição axiomática para a conceção do *Kit Core*. A decomposição axiomática baseia-se num exemplo retirado do livro "Axiomatic Design - Advances and Applications"[20]. A decomposição axiomática permite definir as características do carrinho.

O *Core Major Module* é retirado do motor na secção da montagem final, sendo levado para a secção dos componentes móveis na qual desmontam o módulo principal em submódulos.

As ferramentas do motor LEAP-1A encontram-se, na maioria, armazenadas em caixas de madeira, estando as ferramentas mais pequenas armazenadas em malas de plástico. Cada caixa de madeira armazena uma só ferramenta, sendo a sua dimensão significativamente maior que a ferramenta em si. Isto prejudica a manutenção de motores em diversos fatores:

- Aumento do espaço utilizado para arrumação de ferramentas
- Aumento do tempo necessário para transportar as ferramentas da ferramentaria para a área dos subconjuntos móveis
- Inexistência de um sistema físico que sirva para verificar se todas as ferramentas para a manutenção encontram-se presentes para limitar paragens a meio da manutenção.

No âmbito de otimização da manutenção do *Core* propôs-se assim ao autor desta dissertação projetar um carrinho de ferramentas. Neste capítulo será abordado o estudo do carrinho de ferramentas do Módulo Principal do *Core*.

Existem 53 ferramentas específicas para a montagem e desmontagem do Módulo Principal do *Core*. Embora haja mais que 5 classes que classificam as ferramentas, estas são as classes principais:

- *Fixture*: Desempenham a tarefa de remoção ou instalação de peças.
- *Tool Set*: Auxiliam no processo de remoção ou instalação de peças.
- *Stand*: Todos os suportes estáticos que existam para apoiar os módulos ou submódulos durante o processo de manutenção.
- *Dolly*: Transportam Motores, Módulos ou submódulos de forma segura pela oficina.
- *Adapter*: Permitem que, com a sua utilização, *stands* e *dollys* possam transportar submódulos diferentes do que foram designados para transportar.

Dado ao peso, geometria e funções que certas ferramentas têm, tornava-se pouco prático pôr todas as ferramentas necessárias para a manutenção do módulo principal do *Core* num só carrinho. As únicas ferramentas que estão inseridas em carrinhos são as *fixtures* e os *tool sets*. Para o módulo principal do *core* haverá dois carrinhos: o *kit* do *Core* e o carrinho para os *kink checks*. Os *kink checks* verificam se as superfícies do rotor da turbina de alta pressão encontram-se dentro do toleranciamento estipulado para a planicidade, concentricidade e coaxialidade. Neste capítulo será desenvolvido o *Kit Core* que contempla a montagem e desmontagem dos Submódulos (SM) SM56, SM54, HPT *stage* 2 *blades*, SM53, SM52, SM51, SM41, SM42, SM30 e SM32. A sequência de desmontagem pode ser visto na Figura 3.1. A sequência de montagem será o inverso da sequência de desmontagem.

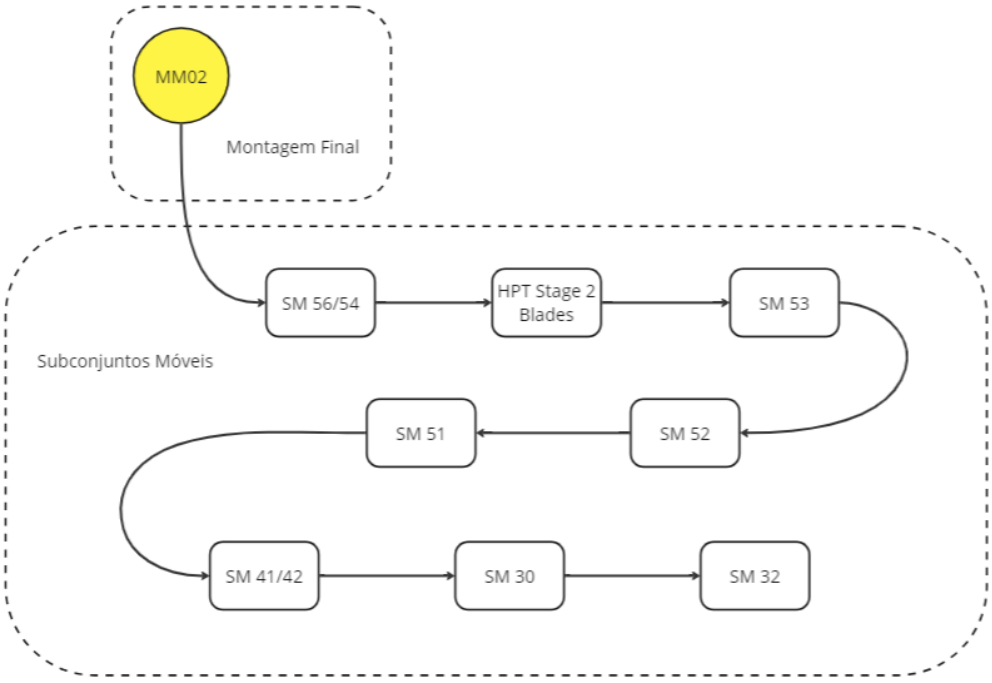


Figura 3.1: Sequência da tarefa de desmontagem do módulo principal do *Core*

O carrinho projetado executa duas tarefas: a montagem e desmontagem do módulo principal do *Core*. Cada uma destas tarefas está organizada em várias subtarefas relativas

à desmontagem ou montagem dos submódulos e componentes que compõem o MM02, ou seja, o módulo principal do *Core*.

O carrinho tem as seguintes dimensões (1610x960x1200) mm e um peso de 630 kgf. A arrumação das ferramentas será dividida em 3 prateleiras. As prateleiras de cima e de baixo são fixas e a do meio tem corrediças para facilitar o acesso. O carrinho está normalmente estacionado na ferramentaria e quando for requisitado irá para a secção dos subconjuntos móveis.

3.2 Decomposição Axiomática

As restrições (Cs) estabelecidas para o projeto do carrinho "LEAP Core Toolkit" são as seguintes: custo, *footprint*, organização, proteção, peso, manobrabilidade, manufactorabilidade e fiabilidade.

3.2.1 Primeiro nível de decomposição

3.2.1.1 Descrição de requisitos funcionais e parâmetros de projeto

No primeiro nível da decomposição de funções do *Kit Core* descrevem-se as funções principais (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Nível 0

	Requisitos Funcionais
	Agregar e transportar ferramentas necessárias à montagem/desmontagem do Módulo Principal em sub módulos
1	Otimizar gestão de *stocks* de ferramentas
2	Otimizar processo de montagem e desmontagem
3	Facilitar arrumação da plataforma
4	Estandardizar arrumação de ferramentas
5	Criar condições de ergonomia
6	Proteger ferramentas

	Parâmetros de Projeto
	Carrinho de ferramentas
1	Análise de risco e falhas das ferramentas
2	Análise de diferentes tarefas e tempos de utilização
3	Parâmetros de arrumação oficinal
4	Metodologia de otimização de *layout*
5	Métodos de higiene e segurança no trabalho
6	Sistema de proteção de ferramentas

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos requisitos funcionais (FRs) e parâmetros de projeto (DPs) identificados no primeiro nível.

- FR_1: Um fator importante deste projeto é a criação de um suporte logístico capaz de gerir qualquer falta de ferramentas que possa haver.
- DP_1: A análise do desgaste das ferramentas permite prever roturas de *stock*, tornando mais eficiente a manutenção de motores

- FR_2: Porque o aumento de eficiência e produtividade é um dos fatores mais importantes na indústria, o projeto do carrinho deve permitir a otimização dos processos de montagem e desmontagem.
- DP_2: Para satisfazer o FR_2 é necessário analisar as tarefas mais executadas e as que despendem mais tempo, de modo a posicionar de forma mais acessível as ferramentas mais utilizadas.
- FR_3: Porque atualmente existem limitações de espaço na oficina de motores da TAP, o projeto do carrinho deve permitir a mitigação deste problema e não agravá-lo.
- DP_3: Para satisfazer o FR_3 é necessário que o carrinho tenha o menor *footprint* possível, de modo a facilitar o transporte da ferramentaria para o chão de oficina.
- FR_4: A definição prévia de locais fixos para a colocação de ferramentas permite evitar ineficiências que atrasem o processo.
- DP_4: Na satisfação do FR_4, deve-se ter em atenção o melhor lugar para cada ferramenta ocupar, uma vez que, após o projeto do carrinho, será difícil fazer alterações.
- FR_5: O projeto do carrinho deve ter em consideração a salvaguarda do bem estar físico dos técnicos, devendo ser evitadas situações que resultem em esforço excessivo.
- DP_5: Na satisfação do FR_5 deve ser tido em atenção a legislação vigente e métodos de higiene e segurança no trabalho mais pertinentes.
- FR_6: A valia do *kit* de ferramentas resulta da proteção das ferramentas contra possíveis danos, reduzindo assim os custos operacionais da oficina.
- DP_6: Este parâmetro de projeto permite verificar se as ferramentas são corretamente armazenadas e protegidas. Indica que o FR_6 é concretizado através de um sistema de proteção.

3.2.1.2 Matriz de projeto

A equação 3.1 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \\ FR_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & X & X & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & X \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \\ DP_6 \end{Bmatrix} \tag{3.1}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

$A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{14}: Estes elementos são avaliados verificando se o FR_1 é afetado pelo DP_2 e pelo DP_4. Na otimização da gestão de *stocks*, é feita a análise das diferentes tarefas de modo a que seja sempre possível substituir as ferramentas mais utilizadas. A otimização do *layout* do carrinho facilita a identificação da falta de alguma ferramenta e, assim, fazer logo a sua encomenda.

A_{21}, A_{31}, A_{41}, A_{51}, A_{61}: As mudanças na análise do risco e de falhas das ferramentas não deveram afetar a otimização do processo de desmontagem, nem a arrumação da plataforma, nem a estandardização da arrumação, nem as condições de ergonomia nem a proteção de ferramentas.

A_{24}, A_{25}: A otimização do processo de montagem e desmontagem é afetada pelos DP_4 e DP_5. No primeiro caso, dependendo da forma de como as ferramentas estão posicionadas, pode ser acelerado o processo de manutenção. No segundo caso, pelo facto dos técnicos necessitarem de exercer menor esforço, a longo prazo será diminuída a probabilidade de baixas médicas.

A_{23}, A_{26}: A mudança do DP_3 e do DP_6 não deve afetar o FR_2.

A_{32}, A_{42}, A_{52}, A_{62}: Estes elementos são nulos. A mudança da análise de diferentes tarefas e tempo de utilização claramente não tem impacto na arrumação da plataforma e de ferramentas, nem nas condições de ergonomia e na proteção de ferramentas.

A_{34}, A_{35}, A_{36}, A_{43}, A_{53}, A_{63}: O requisito funcional FR_3 - facilitar arrumação oficinal não é afetado por nenhum DP nesta matriz, para além do DP3, tal como o DP3 não afeta nenhuma FR nesta matriz, para além do FR3.

A_{46}: O valor deste elemento é X, pois o sistema de proteção de ferramentas afeta a estandardização da arrumação. O inverso, no qual a otimização de layout das ferramentas afeta a proteção de ferramentas, não se aplica.

A_{64}: A importância da proteção da ferramenta é superior à otimização do *layout*. Deste modo, não se deverá alterar o *layout*, caso este ponha em risco a integridade estrutural da ferramenta.

A_{45}, A_{65}: Estes elementos têm valor nulo pois métodos de higiene e segurança no trabalho não têm impacto na proteção de ferramentas nem na estandardização da arrumação destas.

A_{54}, A_{56}: As metodologias de otimização de layout e o sistema de proteção de ferramentas não criam condições de ergonomia para o técnico tendo assim um valor nulo

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.2 Segundo nível de decomposição para análise de risco e falhas das ferramentas (DP_1)

3.2.2.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do segundo nível de decomposição, a Tabela 3.2 apresenta a decomposição da análise de risco e falhas das ferramentas.

Tabela 3.2: Decomposição de FR_1 e de DP_1

	Requisitos Funcionais
	Otimizar gestão de stocks de ferramentas
1	Analisar desgaste de ferramentas
2	Analisar o tempo que demora uma ferramenta a chegar
3	Identificar que ferramentas executam uma mesma tarefa
4	Otimizar tempo que uma ferramenta é requisitada pela equipa de produção

	Parâmetros de Projeto
	Análise de risco e falhas de ferramentas
1	Estudo de desgaste de ferramentas
2	Estudo de tempo de entrega
3	Estudo do manual em relação às tarefas executadas pelas ferramentas
4	Análise cronológica da ferramenta no chão da oficina

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no segundo nível do DP_1.

- FR_{11}: Para não haver falhas durante o funcionamento, o desgaste da ferramenta deve ser monitorizado.

- DP_{11}: A comunicação permanente com a produção permite obter atualizações sobre o estado da ferramenta e sobre o modo de utilização da mesma. Uma má utilização das ferramentas resulta numa diminuição do seu tempo de vida útil.

- FR_{12}: O conhecimento do *Lead Time* da encomenda de uma ferramenta é importante para prevenir a falta de ferramentas disponíveis na altura de troca.

- DP_{12}: A comunicação com os fornecedores permite prever o tempo de substituição de uma ferramenta, podendo assim evitar períodos de falha.

- FR_{13}: Existem ferramentas polivalentes cuja função é usada em diversas tarefas. A inoperacionalidade de uma destas ferramentas tem maior impacto no processo de manutenção do motor.

- DP_{13}: O estudo dos manuais Engine Shop Manual (ESM) e Ilustrated Tools & Equipment Manual (ITEM) permite identificar as ferramentas polivalentes. Este estudo deve ser complementado com contacto com a produção, pois pode haver outras soluções presentes no funcionamento da oficina.

- FR_{14}: A otimização do tempo de requisição de um carrinho pela equipa de produção permite melhorar a situação de espaço disponível na oficina.

- DP_{14}: Uma análise cronológica do carrinho de ferramentas no chão da oficina permite aferir se o FR_{14} é satisfeito.

3.2.2.2 Matriz de projeto

A equação 3.2 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{14} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{14} \end{Bmatrix} \tag{3.2}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Todos os elementos zero da matriz de projeto são estudos e análises separadas, não havendo assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.3 Segundo nível de decomposição para análise de diferentes tarefas e tempos de utilização (DP_2)

3.2.3.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do segundo nível de decomposição, a Tabela 3.3 apresenta a decomposição da análise de diferentes tarefas e tempos de utilização.

Tabela 3.3: Decomposição de FR_2 e de DP_2

	Requisitos Funcionais
	Otimizar processo de montagem e desmontagem
1	Possibilitar a execução simultânea da tarefa em vários motores
2	Fornecer informação importante relativa à tarefa a ser desempenhada
3	Destinar cada carrinho à execução de uma única tarefa
4	Sequenciar ferramentas de forma a que seja intuitivo o emprego da ferramenta seguinte
5	Agrupar todas as ferramentas necessárias para uma determinada tarefa num só carrinho
	Parâmetros de Projeto
	Análise de diferentes tarefas e tempo de utilização
1	Estudo cronológico do uso de ferramentas
2	Folha de trabalhos e advertências
3	Aquisição de stocks de forma a que ferramentas usadas em várias tarefas possam ficar num só kit
4	Estudo cronológico do uso de ferramentas
5	Estudo das ferramentas usadas na tarefa

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no segundo nível no DP_2.

- FR_{21}: Ao possibilitar a manutenção simultânea em diversos motores aumenta-se o WIP, que por sua vez aumenta a produtividade da oficina.

- DP_{21}: Para satisfazer o FR_{21} é necessário estudar se as ferramentas são de curta duração ou de longa duração. Caso sejam de longa duração pode ser necessário colocar várias ferramentas no carrinho.

- FR_{22}: O fornecimento de informação importante sobre a tarefa a ser executada permite aumentar a segurança para a boa utilização das ferramentas e para o seguimento correto dos processos de manutenção.
- DP_{22}: Para satisfazer o FR_{24} cria-se uma folha de trabalhos e advertências que esteja sempre presente no carrinho.
- FR_{23}: Destinar cada *kit* à execução de uma única tarefa permite que não haja confusão relativamente às ferramentas a usar para uma determinada tarefa.
- DP_{23}: A satisfação do FR_{23} implica a criação de um DP de modo que cada ferramenta seja usada numa única tarefa. Desta forma, ao eliminar-se a ambivalência das ferramentas implica aumentar o *stock* das mesmas.
- FR_{24}: A organização do *layout* das ferramentas com recurso a uma cadeia lógica de pensamento permite acelerar o processo de manutenção do motor. Além de facilitar os movimentos físicos necessários, esta organização auxilia o técnico a lembrar-se de qual será a próxima ferramenta a usar.
- DP_{24}: Para satisfazer o FR_{24} é necessário executar um estudo cronológico das ferramentas de modo a saber qual é a ordem de utilização de cada uma.
- FR_{25}: O agrupamento de todas as ferramentas necessárias num só carrinho para uma tarefa permite que os técnicos disponham logo à partida de todas as ferramentas necessárias. Não precisam assim, de ir buscar ferramentas a meio do processo, piorando a eficiência.
- DP_{25}: Com o estudo dos manuais ESM e ITEM e com o auxílio da produção é possível identificar as ferramentas necessárias para a montagem e a desmontagem do módulo principal do core.

3.2.3.2 Matriz de projeto

A equação 3.3 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{23} \\ FR_{24} \\ FR_{25} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X & X & X \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & X \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \\ DP_{24} \\ DP_{25} \end{Bmatrix} \tag{3.3}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}: Para se executar ações de manutenção em diversos motores a partir do mesmo carrinho é importante sequenciar o modo de como cada motor irá ser operado,

de forma a não faltar nenhuma ferramenta a meio da operação. Para tal, a cronologia do uso de ferramentas, o estudo das ferramentas usadas na tarefa, a aquisição de stocks extras, os cuidados específicos no manuseio de ferramentas e a análise de duração do uso de ferramentas são importantes para a satisfação deste requisito funcional.

A_{21}, A_{23}, A_{24}, A_{25}: A informação importante que deve estar presente é relativa ao bom manuseamento das ferramentas e às boas práticas no chão de oficina. Como não explicitam a sequência e a duração de utilização de ferramentas nem quais são as ferramentas usadas na tarefa, estes elementos terão o valor de zero.

A_{31}, A_{32}, A_{35}: A mudança na sequência de utilização das ferramentas, nas advertências e informações explicitadas na folha e na análise da duração de utilização das ferramentas em nada alteram o requisito funcional de destinar cada carrinho à execução de uma tarefa e uma tarefa só. Desta forma o valor destes elementos é nulo.

A_{34}: Dado à ambivalência que certas ferramentas possuem, para agrupar todas as ferramentas necessárias para a execução de uma determinada tarefa poderá ser preciso adquirir mais. Desta forma o DP_{44} poderá satisfazer o FR_{23}.

A_{41}, A_{42}, A_{43}: A aquisição de stocks, a mudança da folha de trabalhos ou a determinação da duração da utilização da ferramenta não devem afetar a sequência das ferramentas.

A_{45}: O estudo das ferramentas usadas na tarefa pode influenciar a sequência das ferramentas fazendo com que o valor deste elemento seja X. Visto que caso através do estudo se decida que uma ferramenta não deve ser usada, essa deve ser retirada da sequência.

A_{51}, A_{52}, A_{53}, A_{54}, A_{55}: Para se determinar quais são as ferramentas necessárias para uma tarefa somente é necessário o estudo das ferramentas numa tarefa. Desta forma só o DP_{25} satisfaz o FR_{25}, tendo assim os outros parâmetros de projeto um valor nulo.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.4 Segundo nível de decomposição para parâmetros de arrumação oficinal(DP_3)

3.2.4.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do segundo nível de decomposição, a Tabela 3.4 apresenta a decomposição dos parâmetros de arrumação oficinal.

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no segundo nível do DP_3.

- FR_{31}: A limitação de espaço na ferramentaria e no chão de oficina implica a utilização de carrinhos que ocupem espaço de forma eficiente.

- DP_{31}: A satisfação do FR_{31} é feita através da análise da otimização do *footprint* do carrinho.

Tabela 3.4: Decomposição de FR_3 e de DP_3

	Requisitos Funcionais
	Facilitar arrumação da plataforma
1	Ocupar o mínimo de espaço possível enquanto o *kit* se encontrar arrumado
2	Criar um carrinho com uma geometria que facilite a sua arrumação quando não está em uso
3	Criar um sistema para contabilização de carrinhos em uso
4	Facilitar a manobrabilidade do carrinho
	Parâmetros de Projeto
	Parâmetros de arrumação oficinal
1	*Footprint* reduzida
2	Formato paralelipipédico
3	Locais de arrumação delineados
4	Comprimento e largura com valores próximos

- FR_{32}: Este requisito relaciona-se com o FR_{31} no sentido em que não interessa só a área que ocupa como também a geometria do carrinho. Geometrias levam à criação de espaços mortos durante o armazenamento dos carrinhos, ou seja, a um mau aproveitamento da área disponível.

- DP_{32}: O melhor formato em termos de otimização de espaços de arrumação é o paralelipipédico. Portanto, este DP permite a satisfação do FR_{32}.

- FR_{33}: O conhecimento atualizado sobre o número e tipo de carrinhos em uso permite que qualquer parte interessada da manutenção de motores saiba que tarefas estão a ser realizadas. Esta contabilização otimizará o tempo despendido em tarefas de gestão.

- DP_{33}: Se houver lugares delineados para carrinhos específicos, facilmente se saberá que carrinhos estão no ativo.

- FR_{34}: Ao melhorar a manobrabilidade dos carrinhos, o seu transporte pela oficina será facilitado, assim como será otimizada a sua arrumação.

- DP_{34}: A manobrabilidade dos carrinhos é facilitada com valores próximos do comprimento e da largura. Esta configuração permite fazer as curvas mais facilmente. Este parâmetro de projeto também é benéfico para o FR_{32}.

3.2.4.2 Matriz de projeto

A equação 3.4 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{31} \\ FR_{32} \\ FR_{33} \\ FR_{34} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & X \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{31} \\ DP_{32} \\ DP_{33} \\ DP_{34} \end{Bmatrix} \tag{3.4}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}: O formato paralelipipédico permite a não criação de espaços mortos na arrumação do carrinho, os quais diminuem a eficiência do aproveitamento do espaço existente na oficina. Desta forma alterações no DP_{32} influenciam o FR_{31}.

A_{13}, A_{14}: Estes elementos são avaliados pelo impacto que têm no FR_{31}. Neste caso, a alteração de locais de arrumação definidos ou a alteração da proporção comprimento/largura do carrinho tê pouca influência na área ocupada pela carrinho. Esta análise só se aplica no DP_{34} caso a área que ocupe se mantenha idêntica embora o comprimento e a largura se alterem.

A_{24}: Devido à escassez de locais de armazenamento na ferramentaria, quanto mais uniforme for a geometria da estrutura, mais fácil será a arrumação dos carrinhos. Uma estrutura com proporções desequilibradas poderá impedir lugares de passagem.

A_{21}, A_{23}: O valor destes elementos é nulo pois não influencia de forma relevante a geometria do carrinho.

A_{31}, A_{33}, A_{34}: Os parâmetros de projeto relativos à área e geometria do carrinho não influenciam o sistema de contabilização dos carrinhos no ativo.

A_{41}, A_{42}, A_{43}: A área ocupada, a estrutura paralelipipédica e pré-definição dos lugares de arrumação em pouco influenciam a manobrabilidade dos carrinhos. Desta forma, o valor destes elementos é nulo.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.5 Segundo nível de decomposição para parâmetros de otimização de *layout*(DP_4)

3.2.5.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do segundo nível de decomposição, a Tabela 3.5 apresenta a decomposição dos parâmetros de otimização de *layout*.

Tabela 3.5: Decomposição de FR_4 e de DP_4

	Requisitos Funcionais
	Estandardizar arrumação de ferramentas
1	Otimizar o espaço ocupado pelas ferramentas no carrinho
2	Definir locais específicos para cada ferramenta
3	Posicionar cada ferramenta de forma a facilitar o seu acesso
4	Identificar carrinhos diferentes
	Parâmetros de Projeto
	Metodologia de otimização de layout
1	Estudo do *layout* das ferramentas no carrinho
2	Mapeamento das ferramentas nas prateleiras do carrinho
3	Estudo do peso e da geometria das ferramentas
4	Estudo das ferramentas que integram cada carrinho

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no segundo nível do DP_4.

- FR_{41}: A otimização do espaço ocupado pelas ferramentas no carrinho permite ter mais margem de manobra para a organização das ferramentas no mesmo.
- DP_{41}: Para se otimizar o espaço ocupado pelas ferramentas deve-se proceder ao estudo do layout das ferramentas na planta do carrinho. Desta forma, é possível analisar se uma mudança no *layout* se traduz numa redução do espaço ocupado.
- FR_{42}: Ao serem destinados espaços específicos para cada ferramenta, possibilita-se aos técnicos saberem imediatamente onde ir buscar essa ferramenta, otimizando tempos de manutenção e melhorando a gestão de equipamentos.
- DP_{42}: Um mapa estandardizado de ferramentas permite que, em qualquer carrinho que exerça a mesma tarefa, um técnico possa encontrar a ferramenta na mesma posição.
- FR_{43}: Ao posicionar-se todas as ferramentas de forma a serem facilmente acedidas, o processo de manutenção de motores será otimizado
- DP_{43}: Ao analisar-se o peso e a geometria das ferramentas é facilitado o planeamento de um *layout* que satisfaça o FR_{43}
- FR_{44}: Nem todos os carrinhos que executam a mesma tarefa armazenam as mesmas ferramentas. Isto deve-se ao facto de em certos casos haver ferramentas alternativas para a execução de uma subtarefa. A diferença de ferramentas entre carrinhos pode ser subtil, logo é necessário que seja possível identificar visualmente que carrinho se pretende usar sem recorrer à identificação das ferramentas presentes em cada carrinho.
- DP_{44}: Para satisfazer o FR_{44} procede-se ao estudo das ferramentas que integram cada carrinho, para ter uma noção de quantos tipos de carrinhos diferentes existem.

3.2.5.2 Matriz de projeto

A equação 3.5 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{41} \\ FR_{42} \\ FR_{43} \\ FR_{44} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X & X \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{41} \\ DP_{42} \\ DP_{43} \\ DP_{44} \end{Bmatrix} \tag{3.5}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}: Uma alteração no mapeamento das ferramentas e na sua geometria pode afetar o espaço ocupado por estas, quer seja pelo espaço verdadeiramente ocupado, quer seja pelo espaço morto que a sua geometria ou posição na superfície do carrinho possam causar. Por este motivo o valor destes elementos é X.

A_{14}: Para otimizar o espaço ocupado pelas ferramentas no carrinho é importante saber que ferramentas integram o carrinho.

A_{21}, A_{23}, A_{24}: A alteração nos DP_{21}, DP_{23} e DP_{24} em nada influenciam o local específico de cada ferramenta, tendo assim um valor nulo na matriz de projeto.

A_{31}, A_{32}, A_{34}: Para determinar a forma de acesso de uma ferramenta é preciso ter em conta duas variáveis: peso e geometria. Estas duas variáveis determinam em conjunto o quão próximo da borda do carrinho deve a ferramenta estar para um técnico conseguir acedê-la facilmente. Desta forma os outros DPs terão valor nulo.

A_{41}, A_{42}, A_{43}: O único DP que analisa as ferramentas que constituem o carrinho é o DP_{44}, logo o valor dos outros será nulo.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.6 Segundo nível de decomposição para parâmetros de métodos de higiene e segurança no trabalho(DP_5)

3.2.6.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do segundo nível de decomposição, a Tabela 3.6 apresenta a decomposição dos parâmetros de métodos de higiene e segurança no trabalho.

Tabela 3.6: Decomposição de FR_5 e de DP_5

	Requisitos Funcionais
	Criar condições de ergonomia
1	Respeitar os regulamentos de trabalho relativos à geometria do carrinho
2	Respeitar os regulamentos de trabalho relativos ao peso exercido durante o trabalho
3	Proteger os técnicos contra danos físicos

	Parâmetros de Projeto
	Métodos de higiene e segurança no trabalho
1	Estudo da legislação em higiene e segurança no trabalho aplicável à geometria do carrinho
2	Estudo da legislação em higiene e segurança no trabalho relativos à força que um técnico pode aplicar
3	Análise de possíveis situações capazes de causar dano físico a um técnico

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no segundo nível do DP_5.

- FR_{51}: Para preservar a saúde do técnico é necessário respeitar certas normas relativas à geometria do carrinho. Estas normas fazem com que um técnico não exerça demasiado esforço nas costas, por exemplo.

- DP_{51}: Para satisfazer o FR_{51} é necessário proceder a um estudo da legislação da higiene e segurança no trabalho relativa à geometria do carrinho.

- FR_{52}: Para a salvaguarda da saúde dos técnicos, é necessário respeitar as normas relativas ao esforço exercido por um técnico. Este esforço está relacionado tanto com o empurrar um carrinho como o manusear das ferramentas. Sempre que seja necessário manusear ferramentas que tenham um peso que possa afetar a segurança no trabalho, torna-se necessário posicioná-las para serem acedidas facilmente por um cadernal.

- DP_{52}: Para satisfazer o FR_{52} é necessário proceder a um estudo da legislação da higiene e segurança no trabalho relativa à força que um técnico pode exercer.

- FR_{53}: A salvaguarda da segurança dos técnicos é um dos fatores mais importantes no projeto do carrinho. Deste modo deve-se ter atenção qualquer situação que possa causar danos físicos aos trabalhadores.

- DP_{53}: Para garantir o FR_{53} é necessário proceder à análise de possíveis situações que possam resultar em risco para a saúde dos técnicos como resultado da utilização dos carrinhos.

3.2.6.2 Matriz de projeto

A equação 3.6 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{51} \\ FR_{52} \\ FR_{53} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{51} \\ DP_{52} \\ DP_{53} \end{Bmatrix} \tag{3.6}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}: O estudo da legislação relativa à força que um técnico pode exercer e as possíveis situações que um técnico pode sofrer dano físico em nada afetam as regulações de trabalho relativas à geometria do carrinho.

A_{21}, A_{23}: O estudo da legislação aplicável à geometria do carrinho e as possíveis situações que um técnico pode sofrer dano físico em nada afetam as regulações de trabalho relativas à força que um técnico pode exercer.

A_{31}: Caso não seja respeitada a legislação aplicável à geometria do carrinho, é possível acontecer dano físico nos técnicos, não satisfazendo o FR_{53}.

A_{32}:Caso não seja respeitada a legislação aplicável à força exercida por um técnico, este pode-se aleijar, é possível acontecer dano físico nos técnicos, não satisfazendo o FR_{53}.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.7 Segundo nível de decomposição para sistema de proteção de ferramentas (DP_6)

3.2.7.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do segundo nível de decomposição, a Tabela 3.7 apresenta a decomposição do sistema de proteção de ferramentas.

Tabela 3.7: Decomposição de FR_6 e de DP_6

	Requisitos Funcionais
	Proteger Ferramentas
1	Proteger as ferramentas contra danos
2	Manter as ferramentas no estado de qualidade atual

	Parâmetros de Projeto
	Sistema de proteção de ferramentas
1	Sistema de proteção de dano físico
2	Sistema de proteção de ferramentas contra pó e corrosão

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no segundo nível do DP_6.

- FR_{61}: Para garantir a viabilidade económica da manutenção de motores é necessário que o investimento em ferramentas tenha o máximo de retorno possível. Desta forma, é necessário aplicar medidas que protejam aintegridade física das ferramentas.
- DP_{61}: Para satisfazer o FR_{61} é necessário criar um sistema de proteção de ferramentas contra danos.
- FR_{62}:A aplicação de medidas contra o enferrujamento aumenta a longevidade das ferramentas.
- DP_{62}: Para satisfazer o FR_{62} é necessário criar um sistema de proteção de ferramentas contra pó e corrosão.

3.2.7.2 Matriz de projeto

A equação 3.7 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{61} \\ FR_{62} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{61} \\ DP_{62} \end{Bmatrix} \tag{3.7}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}: O valor deste elemento é zero pois a mudança num sistema de proteção contra pó e corrosão não deve alterar a proteção contra o dano físico

A_{21}: Para manter a qualidade das ferramentas no estado atual, é necessário que estas não sofram danos físicos.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.8 Verificação da consistência de projeto relativa ao 1.º e 2.º nível

A Tabela 3.8 apresenta a verificação de consistência entre o primeiro nível e o segundo. Para que um projeto seja consistente, a relação estabelecida entre FRs e DPs do primeiro nível deve ser idêntica à relação entre FRs e DPs do segundo nível. Ou seja, caso esta relação exista, pelo menos um FR proveniente do desdobramento do FR de primeiro nível deve estar relacionado com um DP proveniente do desdobramento do DP de primeiro nível. Caso não haja relação no primeiro nível, não há também relação entre FRs e DPs provenientes do desdobramento desse nível.

Tabela 3.8: Matriz de verificação de consistência do primeiro e segundo nível de decomposição

		DP 1.#				DP 2.#					DP 3.#				DP 4.#				DP 5.#			DP 6.#	
		1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	1	2
FR 1.#	1	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	X	0	X[1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	X	0	X[2]	0	0	0	0	0	0	0	X[3]	0	0	0	0	0	0	0	0
FR 2.#	1	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	X[4]	X[5]	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X[6]	X[6]	0	0
	5	0	0	0	0	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR 3.#	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR 4.#	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	X[7]	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0
FR 5.#	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	0	0
FR 6.#	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X

Como exemplo da leitura desta consistência na matriz de projeto, apresenta-se o modo em que na primeira decomposição uma mudança no DP_2 afeta o FR_1. Para ser consistente, um ou mais FRs resultantes da decomposição do DP_1 devem ser afetados por DPs resultantes da decomposição do DP_2. Neste caso, verifica-se que a decomposição do DP_{22} afeta o FR_{13} e a decomposição do DP_{21} afeta o FR_{14}. As justificações para as restrições identificadas com um elemento não nulo (sem ser a diagonal, pois essa corresponde

às matrizes apresentadas nos subcapítulos anteriores) na Tabela 3.8 são apresentadas seguidamente:

1. Uma mudança no estudo das ferramentas pode levar a uma forma de identificar diferente da previamente estabelecida das ferramentas que executam a mesma tarefa. Desta forma o valor deste elemento é X.

2. Para otimizar o tempo que uma ferramenta é requisitada pela equipa de produção é necessário o estudo cronológico do uso da ferramenta, para ser possível determinar o tempo que demora a ferramenta a ser utilizada até ser armazenada novamente.

3. Uma mudança no estudo do *layout* das ferramentas no carrinho pode contribuir para que as ferramentas mais utilizadas fiquem posicionadas para facilitar o seu acesso. Esta mudança permite diminuir o tempo de permanência do carrinho no chão da oficina, otimizando o tempo que as ferramentas são requisitadas pela equipa de produção.

4. O estudo do *layout* das ferramentas é importante para permitir o posicionamento das ferramentas no sentido de facilitar a utilização de uma sequência no emprego das ferramentas, como também permite otimizar o espaço ocupado pelas ferramentas no carrinho. Ambos fatores são de elevada importância, fazendo com que uma mudança no DP_{41} afeta o FR_{22}.

5. Um mapa estandardizado de ferramentas permite que, em qualquer carrinho que exerça a mesma tarefa, um técnico possa encontrar a ferramenta na mesma posição, tornando intuitivo a sequência da utilização das ferramentas.

6. Os DP_{52} e DP_{53} dizem respeito à saúde e segurança dos técnicos durante a utilização do carrinho e das suas respetivas ferramentas. Desta forma, uma mudança nestes DPs afeta o fornecimento de informações importantes relativas à tarefa a ser desempenhada. Isto deve-se à mudança dos cuidados a ter no manuseamento das ferramentas e do carrinho.

7. Ao definirem-se locais específicos para as diferentes ferramentas, é possível posicionar cada ferramenta no local que confere maior proteção contra danos físicos, tendo este elemento assim um valor de X.

Certas dependências de DPs e FRs são influências que não têm significado nem expressão sendo assim desprezadas.

3.2.9 Terceiro nível de decomposição para estudo de desgaste de ferramentas (DP_{11})

3.2.9.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.9 apresenta a decomposição do estudo do desgaste de ferramentas.

Tabela 3.9: Decomposição de $FR_{1.1}$ e de $DP_{1.1}$

	Requisitos Funcionais
	Analisar desgaste de ferramentas
1	Verificar antes de cada utilização se a ferramenta tem algum defeito
2	Verificar se a ferramenta é utilizada nas tarefas corretas e da forma correta
3	Verificar se a ferramenta já executou o número máximo de ciclos planeados para sua vida de utilização
4	Proceder à manutenção de rotina exigida pela CFM
	Parâmetros de Projeto
	Estudo de desgaste de ferramentas
1	Sistema de verificação visual do desgaste da ferramenta
2	Folha de utilizações corretas da ferramenta e advertências sobre o seu uso
3	Sistema de contabilização de utilizações da ferramenta
4	Planeamento de manutenção periódica da ferramenta

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{11}.

- FR_{111}: Para garantir que a ação de manutenção é feita corretamente e que não serão danificadas peças do motor, é necessário certificar que a ferramenta se encontra num estado físico adequado para as tarefas a desempenhar. Para isso, antes de qualquer ação de manutenção, é necessário verificar a integridade física da ferramenta. Este requisito não só promove a manutenção competente do motor, como evita danos permanentes na ferramenta.

- DP_{111}: Com auxílio de documentação fotográfica e de indicações dos indícios de defeitos que a ferramenta possa ter, o técnico poderá averiguar mais facilmente se a ferramenta tem algum defeito.

- FR_{112}: Algumas ferramentas podem ser utilizadas em diversas tarefas, apesar do seu uso não ser aconselhado para todas. Um uso incorrecto pode causar danos tanto na ferramenta como nas peças do motor. Por este motivo, é necessário estabelecer um sistema que defina os usos corretos de cada ferramenta.

- DP_{112}: O fornecimento de um documento que explicite as utilizações corretas da ferramenta e que contenha advertências sobre o seu uso, permite evitar situações de má utilização. Esta folha de utilização deve estar sempre presente no carrinho.

- FR_{113}: No caso das ferramentas possuírem componentes pneumáticos e devido à natureza do toleranciamento das ferramentas em questão (o qual poderá ser apertado), é necessário garantir que estas ferramentas estão dentro dos ciclos de

utilização definidos para as mesmas. Para tal, é necessário contabilizar quantas vezes as ferramentas são utilizadas, por forma a determinar se o número máximo de ciclos planeados para a sua vida de utilização já foi alcançado.

- DP_{113}: Para satisfazer o FR_{113} deve ser criada uma base de dados para registar o número de utilizações da ferramenta por ação de manutenção e para o total de motores servidos simultaneamente. Esta base de dados permite determinar se, para as ações planeadas, o número máximo de utilizações acontece a meio da ação de manutenção. A identificação precoce desta situação permite evitar uma interrupção da ação de manutenção.

- FR_{114}: A manutenção de rotina estabelecida pela CFM permite maximizar o tempo de vida útil das ferramentas. É importante identificar qual é a parte de manutenção de rotina possível executar na secção de componentes móveis e qual necessita de ser executada noutras secções.

- DP_{114}: A calendarização das manutenções periódicas permite cumprir com os requisitos de manutenção de rotina exigidos pela CFM.

3.2.9.2 Matriz de projeto

A equação 3.8 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{111} \\ FR_{112} \\ FR_{113} \\ FR_{114} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{111} \\ DP_{112} \\ DP_{113} \\ DP_{114} \end{Bmatrix} \tag{3.8}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}, A_{14}: A verificação visual de defeitos na ferramenta não é alterada por uma mudança na folha de utilizações na ferramenta, por uma mudança no sistema de contabilização de utilizações da ferramenta nem por uma mudança no planeamento de manutenção periódica da ferramenta. Desta forma, o valor destes elementos é nulo.

A_{21}, A_{23}, A_{24}: Uma mudança no sistema de verificação visual e no sistema de contabilização de utilizações em nada contribuiriam para verificar se a ferramenta é utilizada nas tarefas corretas ou não. Pelos mesmos motivos, uma mudança do planeamento de manutenção periódica não interfere com a verificação da utilização correta, tendo estes 3 elementos um valor nulo.

A_{32}, A_{33}, A_{34}: A verificação de se a ferramenta já executou o número máximo de ciclos planeados só consegue ser medida através de um sistema de contabilização de utilizações da ferramenta, sendo o valor do resto dos elementos nulo.

A_{41}, A_{42}: A manutenção de rotina é sempre executada, independentemente do desgaste da ferramenta e partindo do pressuposto que a ferramenta é sempre utilizada de forma correta. Deste modo estes elementos são nulos.

A_{43}: A manutenção periódica pode depender do número de ciclos que a ferramenta já executou, logo uma mudança no sistema de contabilização de utilizações da ferramenta pode alterar a manutenção de rotina, sendo o valor deste elemento X.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.10 Terceiro nível de decomposição para o estudo do tempo de entrega (DP_{12})

3.2.10.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.10 apresenta a decomposição do estudo do tempo de entrega.

Tabela 3.10: Decomposição de $FR_{1.2}$ e de $DP_{1.2}$

	Requisitos Funcionais
	Analisar o tempo que demora uma ferramenta a chegar
1	Cronometrar tempo que demora a ser feito o pedido de encomenda de uma ferramenta
2	Cronometrar tempo de transporte da ferramenta
3	Analisar tempo que demora ferramenta a ser posta no ativo

	Parâmetros de Projeto
	Estudo de tempo de entrega
1	Estudo do tempo que demora o pedido a ser feito
2	Estudo do tempo de transporte da ferramenta
3	Estudo do tempo de receção e operacionalização da ferramenta

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{12}.

- FR_{121}: Quando é efetuado o pedido de encomenda de uma ferramenta, esta não é automaticamente encomendada. A procura do melhor fornecedor tem em consideração aspectos monetários assim como o tempo de entrega. Este processo de procura pode demorar algum tempo.
- DP_{121}: Para satisfazer o FR_{121} cronometra-se o tempo desde que foi determinada a necessidade da ferramenta até à realização da sua encomenda.
- FR_{122}: O tempo de transporte da ferramenta corresponde ao intervalo de tempo entre o momento da encomenda e a entrada da encomenda na oficina. Trata-se de um aspecto crítico para a eficiência dos processos de manutenção, razão pela qual é um fator que influencia a escolha dos fornecedores da ferramenta.
- DP_{122}: Para satisfazer o FR_{122} cronometra-se o tempo desde que a ferramenta foi encomendada até chegar à oficina de motores da TAP.

- FR_{123}: Após a chegada à oficina, uma ferramenta não é colocada logo no ativo. Deve ser antes realizada uma verificação visual para averiguar eventuais danos durante o transporte e é também necessário definir um plano de manutenção para a sua utilização.
- DP_{123}: Para satisfazer o FR_{123} cronometra-se o tempo desde que a ferramenta chega à oficina de motores da TAP até ao momento que é considerada operacional.

3.2.10.2 Matriz de projeto

A equação 3.9 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{121} \\ FR_{122} \\ FR_{123} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{121} \\ DP_{122} \\ DP_{123} \end{Bmatrix} \tag{3.9}$$

A matriz é diagonal, sendo a melhor matriz para um projeto. Esta matriz é assim, pois cada DP só satisfaz um só FR, tendo um carácter modular.

A matriz é diagonal, pois cada DP satisfaz o estudo do período de tempo referido no seu respetivo FR.

3.2.11 Terceiro nível de decomposição para o estudo do manual em relação às tarefas executadas pela mesma ferramenta(DP_{13})

3.2.11.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.11 apresenta a decomposição do estudo do manual em relação às tarefas executadas pela mesma ferramenta.

Tabela 3.11: Decomposição de $FR_{1.3}$ e de $DP_{1.3}$

	Requisitos Funcionais
	Identificar que ferramentas executam uma mesma tarefa
1	Analisar cada subtarefa de desmontagem do módulo principal do *Core*
2	Analisar cada subtarefa de montagem do módulo principal do *Core*
3	Analisar outras tarefas que as ferramentas possam executar
4	Definir o nível de importância de cada ferramenta com base no número de tarefas que executa
	Parâmetros de Projeto
	Estudo do manual em relação às tarefas executadas pela mesma ferramenta
1	Estudo do subcapitulo "05"do capítulo do Módulo Principal do Core
2	Estudo do subcapitulo "10"do capítulo do Módulo Principal do Core
3	Estudo do manual ITEM de forma a avaliar quantos tarefas diferentes tem uma ferramenta
4	Estudo de todas as subtarefas diferentes que uma ferramenta pode executar

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{13}.

- FR_{131}: Ao analisar-se cada subtarefa de desmontagem é possível determinar que ferramentas executam a subtarefa. Após o estudo de cada subtarefa é possível averiguar que ferramentas são usadas em diferentes subtarefas.

- DP_{131}: Para se satisfazer o FR_{131} é necessário analisar-se cada página referente a cada subtarefa da desmontagem e esquematizar o uso das ferramentas.
- FR_{132}: O requisito é o mesmo que FR_{131} mas aborda o processo de montagem.
- DP_{132}: O parâmetro de projeto é o mesmo que DP_{131} mas aborda o processo de montagem.
- FR_{133}: Além das ações de manutenção do módulo principal, certas ferramentas também são usadas para a manutenção de outros módulos. Deste modo analisa-se as ações de manutenção de ferramentas nos diferentes módulos de forma a identificar as tarefas que as ferramentas têm em comum.
- DP_{133}: Através do manual ITEM é possível averiguar todas as tarefas para as quais as ferramentas são utilizadas.
- FR_{134}: Ao proceder-se à elaboração de uma lista de todas as tarefas e subtarefas nas quais a ferramenta é utilizada, simplifica-se a análise das ferramentas que executam a mesma tarefa de forma a identificar as ferramentas mais importantes.
- DP_{134}: Para se satisfazer o FR_{134} é necessário proceder-se a um estudo do resultado proveniente dos FR_{131}, FR_{132} e FR_{133}.

3.2.11.2 Matriz de projeto

A equação 3.10 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{131} \\ FR_{132} \\ FR_{133} \\ FR_{134} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ X & X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{131} \\ DP_{132} \\ DP_{133} \\ DP_{134} \end{Bmatrix} \tag{3.10}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}, A_{14}: A informação relativa à execução das subtarefas de desmontagem do módulo principal são referidas exclusivamente no subcapítulo "05"do capítulo do módulo principal do *Core*, sendo assim o estudo de outros subcapítulos e de outros manuais irrelevantes para a satisfação do FR_{131}. O valor destas células é deste modo nulo.

A_{21}, A_{23}, A_{24}: A informação relativa à execução das subtarefas de montagem do módulo principal são referidas exclusivamente no subcapítulo "10"do capítulo do módulo principal do *Core*, sendo assim o estudo de outros subcapítulos e de outros manuais irrelevantes para a satisfação do FR_{132}. O valor destas células é deste modo nulo.

A_{31}, A_{32}, A_{34}: Para analisar as tarefas diferentes para além das ações de montagem e desmontagem do módulo principal do *Core* recorre-se ao manual ITEM pois tem listadas

todas as tarefas em que a ferramenta pode ser analisada. Só o DP_{133} satisfaz esta análise holística tendo os outros então um valor nulo.

A_{41}, A_{42}, A_{43}: Para definir o nível de importância de cada ferramenta é importante estudar o trabalho que desempenha em cada tarefa de manutenção do motor, quer na montagem como na desmontagem. Para isso o estudo dos capítulos e subcapítulos do manual ESM e o estudo do manual ITEM satisfazem o DP_{134}, tendo estes elementos assim o valor de X.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.12 Terceiro nível de decomposição para a análise cronológica da ferramenta no chão da oficina(DP_{14})

3.2.12.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.12 apresenta a decomposição da análise cronológica da ferramenta no chão da oficina.

Tabela 3.12: Decomposição de $FR_{1.4}$ e de $DP_{1.4}$

	Requisitos Funcionais
	Otimizar tempo que uma ferramenta é requisitada pela equipa de produção
1	Otimizar tempo que o carrinho demora a ser transportado após o término da tarefa para a ferramentaria
2	Otimizar coordenação da tarefas de modo a ser mais eficiente o uso do carrinho no chão de oficina
3	Colocar ferramentas de LD em carrinhos diferentes de CD muito requisitados
	Parâmetros de Projeto
	Análise cronológica da ferramenta no chão da oficina
1	Sistema informático de *checklist* de tarefas
2	Diagrama de gantt com as tarefas a serem executadas
3	Estudo da duração de utilização das ferramentas

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{14}.

- FR_{141}: Sem uma boa comunicação entre a secção dos subconjuntos móveis e da ferramentaria o carrinho pode ficar muito tempo parado no chão de oficina a não ser utilizado. Isto é prejudicial pois o espaço útil no chão de oficina é reduzido. Uma boa comunicação entre a ferramentaria e os técnicos de manutenção permite diminuir o tempo de permanência do carrinho no chão de oficina após o término da tarefa.

- DP_{141}: Com a criação de um sistema informático que possibilite o registo do término de certas tarefas, os técnicos responsáveis pela ferramentaria serão alertados mais cedo para retirar o carrinho do chão de oficina.

- FR_{142}: Dado que o espaço disponível no chão de oficina é limitado, é necessário limitar a presença do carrinho no chão de oficina. Para tal, coordena-se a manutenção de motores de forma a que o carrinho execute diversas tarefas em simultâneo de forma a reduzir o seu tempo de permanência no chão de oficina.

- DP_{142}: Com a utilização de um diagrama de gantt é possível avaliar que tarefas serão executadas no mesmo espaço temporal. Para tal, é possível coordenar o início das tarefas para diminuir ao máximo o tempo que o carrinho fica no chão de oficina sem estar a ser usado.

- FR_{143}: Carrinhos com ferramentas de longa duração de utilização permanecem mais tempo no chão de oficina. Logo, projeta-se carrinhos específicos que armazenem apenas ferramentas de longa duração e que tenham uma menor dimensão visto ao número reduzido de ferramentas que armazenam. Esta medida permite diminuir o *footprint* ocupado na oficina em longos períodos de tempo, pois a maioria das ferramentas são retornadas mais rapidamente à ferramentaria.

- DP_{143}: Ao analisar-se o tempo de utilização de cada ferramenta é possível averiguar-se se a ferramenta é de longa duração de utilização ou de curta duração.

3.2.12.2 Matriz de projeto

A equação 3.11 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{141} \\ FR_{142} \\ FR_{143} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{141} \\ DP_{142} \\ DP_{143} \end{Bmatrix} \tag{3.11}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}: Diagramas e estudos que otimizem a eficiência do uso do carrinho e que diminuam o tempo de utilização deste não afetam o tempo que o carrinho demora a ser transportado. Deste modo, o valor destes elementos é nulo.

A_{21}, A_{23}: Uma *checklist* informatizada de tarefas e um estudo do tempo de utilização das ferramentas num motor não satisfazem a coordenação de tarefas em vários motores, sendo então o valor destes elemento nulo.

A_{31}: Uma mudança no sistema informático de *checklists* de tarefas em nada afeta a colocação de ferramentas LD em carrinhos diferentes de ferramentas CD. Deste modo, o valor destes elementos é nulo.

A_{32}: Um diagrama de *Gantt* com as tarefas a serem executadas permite determinar quais são as ferramentas mais requisitadas, tendo em conta que tarefas são executadas ao mesmo tempo. Desta forma o valor de A_{32} é X.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.13 Terceiro nível de decomposição para o estudo cronológico do uso de ferramentas(DP_{21})

3.2.13.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.17 apresenta a decomposição do estudo cronológico do uso de ferramentas.

Tabela 3.13: Decomposição de $FR_{2.1}$ e de $DP_{2.1}$

	Requisitos Funcionais
	Possibilitar a execução simultânea da tarefa em vários motores
1	Cronometrar o uso de cada ferramenta na desmontagem
2	Cronometrar o uso de cada ferramenta na montagem
3	Contabilizar as vezes que cada ferramenta é utilizada
4	Estudar interferências possíveis pela manutenção simultânea de 3 módulos principais do *Core*
5	Adquirir ferramentas criticas adicionais
	Parâmetros de Projeto
	Estudo cronológico do uso de ferramentas
1	Estudo do tempo de utilização de cada ferramenta na desmontagem
2	Estudo do tempo de utilização de cada ferramenta na montagem
3	Estudo do número de utilizações de cada ferramenta durante a manutenção
4	Diagrama de gantt dos procedimentos de manutenção do core de 3 motores
5	Aquisição de ferramentas sobresselente

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{21}.

- FR_{211}: Durante a manutenção as ferramentas encontram-se numa das 3 categorias:
  - São utilizadas uma vez durante um curto espaço de tempo.
  - São utilizadas várias vezes ao longo da desmontagem, mas cada utilização é curta
  - São utilizadas durante um longo espaço de tempo ao longo da tarefa

  É importante cronometrar o uso de cada ferramenta ao longo do processo de desmontagem do módulo principal do core para comparar com outros processos. Para tal, é importante elaborar uma lista de ferramentas utilizadas, classificando-as de acordo com as categorias apresentadas em cima.

- DP_{211}: Para cronometrar o uso de cada ferramenta, observa-se uma ação de desmontagem do módulo principal do core e estuda-se o tempo de utilização de cada ferramenta.

- FR_{212}: Este requisito funcional é igual ao FR_{211} mas aplica-se ao processo de montagem.

- DP_{212}: Idêntico ao DP_{211}, mas o estudo do tempo de utilização é referente à montagem do módulo principal do *Core*.

- FR_{213}: A contabilização do número de vezes que cada ferramenta é utilizada permite identificar as ferramentas que são mais críticas para a execução da tarefa.
- DP_{213}: Para contabilizar as vezes que cada ferramenta foi utilizada procede-se à contagem das utilizações da ferramenta.
- FR_{214}: Ao estudar interferências possíveis para a manutenção simultânea de 3 módulos principais do *Core*, número necessário para se poder obter um WIP 10, é possível determinar ferramentas adicionais que poderão ser consideradas críticas. Estas ferramentas podem vir a ser consideradas críticas devido ao *timing* da manutenção simultânea de vários motores, no qual as tarefas a executar podem requisitar a mesma ferramenta.
- DP_{214}: O diagrama de *Gantt* dos procedimentos da manutenção de 3 módulos principais em simultâneo permite determinar que subtarefas são executadas em simultâneo. A identificação das tarefas que são executadas em simultâneo permite determinar se é necessário ferramentas adicionais, caso haja necessidade de utilizar simultaneamente a mesma ferramenta em tarefas diferentes.
- FR_{215}: Para possibilitar a manutenção simultânea em vários motores é necessário adquirir ferramentas critica adicionais, de forma a mitigar qualquer falta destas durante o processo de manutenção.
- DP_{215}: Para satisfazer ao FR_{215} procede-se à aquisição de ferramentas críticas sobresselentes.

3.2.13.2 Matriz de projeto

A equação 3.16 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{211} \\ FR_{212} \\ FR_{213} \\ FR_{214} \\ FR_{215} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ X & X & X & X & 0 \\ X & X & X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{211} \\ DP_{212} \\ DP_{213} \\ DP_{214} \\ DP_{215} \end{Bmatrix} \tag{3.12}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}: Para cronometrar o uso de cada ferramenta na desmontagem é necessário registar o início e o fim do período de utilização dessa ferramenta. Uma mudança na forma de estudar o tempo de utilização na montagem não afeta a forma de cronometrar uma ferramenta na desmontagem. A aquisição de ferramentas, diagramas de gantt e estudo do número de utilização de cada ferramenta também não afetam a forma de cronometrar o uso de cada ferramenta na desmontagem.

A_{21}, A_{23}, A_{24}, A_{25}: O FR_{252} também só é satisfeito pelo DP_{212} pelas mesmas razões explicitadas na alínea anterior.

A_{31}, A_{32}, A_{34}, A_{35}: Para satisfazer o FR_{213} o necessário é contabilizar as vezes que cada ferramenta é utilizada. Assim, só uma mudança no estudo do número de utilizações durante a manutenção é que pode provocar mudanças na forma de contabilizar as vezes que a ferramenta é utilizada. Mudanças na forma de estudar o tempo de utilização, na aquisição de ferramentas e na forma de produzir diagramas de *Gantt* em nada alteram a contabilização. Sendo assim o valor destes elementos nulo.

A_{41}, A_{42}, A_{43}: Para estudar interferências possíveis pela manutenção simultânea de 3 módulos principais do *Core* é necessário contabilizar as vezes que cada ferramenta é utilizada e saber quanto tempo a ferramenta é usada por tarefa. É importante analisar os casos de montagem assim como os casos de desmontagem do motor, pois na manutenção simultânea tanto pode haver motores a serem montados com a serem desmontados. Desta forma os DP_{211}, DP_{212} e o DP_{213} afetam o FR_{214}, tendo estes elementos um valor de X

A_{45}: Uma mudança na forma de adquirir ferramentas em nada afeta o estudo de interferências possíveis devido à manutenção simultânea de 3 módulos principais do *Core*.

A_{51}, A_{52}, A_{53}, A_{54}: Uma ferramenta crítica é uma ferramenta que utilizada durante bastante tempo, utilizada bastante vezes numa tarefa e que várias tarefas diferentes requeiram a sua utilização. Desta forma uma alteração nos DP_{211}, DP_{212}, DP_{213} e DP_{214} podem levar a uma ferramenta começar a ser considerada crítica ou deixar de ser crítica.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.14 Terceiro nível de decomposição para a folha de trabalhos e advertências (DP_{22})

3.2.14.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.16 apresenta a decomposição da folha de trabalhos e advertências.

Tabela 3.14: Decomposição de $FR_{2.2}$ e de $DP_{2.2}$

	Requisitos Funcionais
	Fornecer informação importante relativa à tarefa a ser desempenhada
1	Alertar sobre possíveis situações de uso incorreto de ferramentas
2	Alertar sobre rotinas de manutenção a serem feitas
3	Alertar sobre cuidados para prevenção de eventuais danos físicos nos técnicos
4	Alertar sobre especificações importantes a desempenhar nas tarefas
	Parâmetros de Projeto
	Folha de trabalhos e advertências
1	Capítulo de advertências relativas à má utilização das ferramentas
2	Capítulo sobre rotinas de manutenção
3	Capítulo sobre segurança durante a utilização das ferramentas
4	Capítulo relativo a especificações de cada tarefa

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{22}.

- FR_{221}: Para um bom desempenho da tarefa é importante que o técnico seja sensibilizado para possíveis situações de má utilização das ferramentas.
- DP_{221}: A folha de trabalhos e o carrinho devem conter advertências relativas à má utilização das ferramentas.
- FR_{222}: É prioritário garantir-se uma boa manutenção das ferramentas. Para tal, devem ser facilmente acessíveis as rotinas de manutenção a serem desempenhadas para preservação das ferramentas.
- DP_{222}: Para satisfazer o FR_{222} é importante que a folha de trabalhos explicite as ações de manutenção que têm de ser executadas e em que situações. Assim, é importante alertar para as situações em que a manutenção de rotina da ferramenta é feita noutras secções.
- FR_{223}: Uma das informações-chave relativas à tarefa a ser desempenhada diz respeito aos cuidados a ter para uma utilização segura das ferramentas.
- DP_{223}: Para alertar para os cuidados que o técnico deve ter para não incorrer em danos físicos, deve ser criado um capítulo de trabalhos e advertências relativo à segurança durante a utilização das ferramentas.
- FR_{224}: Algumas tarefas podem ter especificações importantes, por exemplo: a pressão de utilização no caso de uma ferramenta pneumática. Assim, todas as especificações importantes devem ser facilmente consultáveis.
- DP_{224}: Para facilitar a consulta das especificações deve ser criado um capítulo com a lista destas.

3.2.14.2 Matriz de projeto

A equação 3.15 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{221} \\ FR_{222} \\ FR_{223} \\ FR_{224} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{221} \\ DP_{222} \\ DP_{223} \\ DP_{224} \end{Bmatrix} \tag{3.13}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Cada capítulo contêm informação específica para cada situação explicitada nos FRs, não havendo assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.15 Terceiro nível de decomposição para a aquisição de stocks de forma a que ferramentas usadas em várias tarefas fiquem num só kit (DP_{23})

3.2.15.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.15 apresenta a decomposição da aquisição de stocks de forma a que ferramentas usadas em várias tarefas fiquem num só kit.

Tabela 3.15: Decomposição de $FR_{2.3}$ e de $DP_{2.3}$

	Requisitos Funcionais
	Destinar cada carrinho à execução de uma única tarefa
1	Planear o projeto de carrinhos para que todas as tarefas de manutenção sejam executadas
2	Adquirir ferramentas adicionais para utilização exclusiva em cada carrinho
3	Identificar cada carrinho visualmente de acordo com a tarefa executada
	Parâmetros de Projeto
	Aquisição de stocks de forma a que ferramentas usadas em várias tarefas fiquem num só kit
1	Lista de todas as tarefas necessárias para a manutenção e das respetivas ferramentas
2	Pedido de encomenda das ferramentas necessárias
3	Pintura da estrutura de cada carrinho

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{23}.

- FR_{231}: A atribuição de uma única tarefa para cada carrinho diminui o risco da utilização errada de ferramentas nas diferentes tarefas. É importante garantir que todas as tarefas de manutenção de motor são executadas.

- DP_{231}: A listagem de todas as tarefas necessárias permite destinar um carrinho à execução de cada uma. De forma semelhante, a listagem das respetivas ferramentas requeridas por tarefa permite definir quais as ferramentas que o carrinho deve armazenar.

- FR_{232}: Dado que várias ferramentas são polivalentes, isto é, podem ser usadas em diversas tarefas, ao restringir-se cada ferramenta a uma dada tarefa poderá levar a que não haja ferramentas suficientes para cumprir este requisito. Para tal, é aconselhável que a aquisição de ferramentas seja feita numa quantidade correspondente ao número de carrinhos em devem ser colocadas.

- DP_{232}: Para adquirir ferramentas, é necessário criar um pedido de encomenda.

- FR_{233}: No caso de existência de vários carrinhos, é importante identificar que tarefa executa um carrinho através da utilização de um código visual, aumentando-se assim o ritmo de trabalho.

- DP_{233}: A identificação dos carrinhos facilita a identificação da tarefa associada aos mesmos, nomeadamente que parte do motor opera e em que secção é utilizado.

3.2.15.2 Matriz de projeto

A equação 3.14 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{231} \\ FR_{232} \\ FR_{233} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{231} \\ DP_{232} \\ DP_{233} \end{Bmatrix} \tag{3.14}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}: O projeto de carrinhos para que todas as tarefas de manutenção sejam executadas depende exclusivamente do estudo dos manuais disponibilizados pela CFM. Desta forma, a encomenda de ferramentas e pintura das estruturas dos carrinhos não afetam o FR_{231}, tendo um valor nulo.

A_{21}: As ferramentas a serem adquiridas dependem da lista de todas as tarefas necessárias para a manutenção. Desta forma, uma mudança na lista das tarefas, resulta numa mudança no pedido de encomendas das ferramentas. O valor deste elemento é então X.

A_{23}: A alteração da pintura do carrinho em nada afeta a aquisição de ferramentas por ser uma alteração estética. Por este motivo o valor do elemento da matriz A_{23} é nulo.

A_{31}, A_{32}: Para identificar carrinhos diferentes, apenas é necessária uma mudança visual nas estruturas dos mesmos. Desta forma, uma mudança no pedido de encomenda de ferramentas ou na lista de tarefas em nada afeta a forma de identificar os carrinhos.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.16 Terceiro nível de decomposição para o estudo cronológico do uso de ferramentas(DP_{24})

3.2.16.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.13 apresenta a decomposição do estudo cronológico do uso de ferramentas.

Tabela 3.16: Decomposição de $FR_{2.4}$ e de $DP_{2.4}$

	Requisitos Funcionais
	Sequenciar ferramentas de forma a que seja intuitivo o emprego da ferramenta seguinte
1	Definir sequências de utilização de ferramentas para a desmontagem e para a montagem
2	Posicionar ferramentas que são utilizadas em várias tarefas numa posição mais proeminente
3	Posicionar ferramentas utilizadas em conjunto em locais próximos
4	Posicionar peças que compõem uma ferramenta em locais próximos
	Parâmetros de Projeto
	Estudo cronológico do uso de ferramentas
1	Cadeia de utilização com duas sequências
2	Estudo do uso de cada ferramenta
3	Estudo do manual ESM
4	Estudo das peças que constituem as ferramentas

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{24}.

- FR_{241}: Ao definir-se um posicionamento das ferramentas que faça com que o uso das ferramentas siga uma determinada sequência, a escolha da próxima ferramenta a ser utilizada será intuitiva. Isto aumenta o ritmo de trabalho da manutenção, pois o técnico não tem de decidir a próxima ferramentas que necessita para executar a tarefa.
- DP_{241}: Um sistema que explicite a sequência lógica de utilização das ferramentas, tendo em atenção que certas ferramentas são utilizadas mais que uma vez, satisfaz o FR_{211}.
- FR_{242}: O ritmo de trabalho é otimizado através da colocação das ferramentas mais utilizadas em local acessível.
- DP_{242}: Para satisfazer o FR_{242} é necessário proceder a um estudo do número de vezes que uma ferramenta é utilizada. Este estudo permite identificar as ferramentas que devem estar colocadas em locais de mais fácil acesso.
- FR_{243}: Existem certas ferramentas que devido à natureza da sua função têm de ser utilizadas em conjunto com outras ferramentas de forma a executar a tarefa de manutenção. Para aumentar a rapidez da manutenção e evitar falhas na utilização das ferramentas, é importante colocar próximo as ferramentas utilizadas em conjunto.
- DP_{243}: O estudo do manual ESM é importante para uma correta identificação das ferramentas necessárias para efetuar cada tarefa. Este manual também fornece informação sobre as situações em que é necessário o uso conjunto de ferramentas.
- FR_{244}: Algumas ferramentas vêm desmontadas no carrinho, sendo necessário a sua montagem para as utilizar. Assim, é importante a colocação em local próximo das peças para ser intuitivo a montagem da ferramenta.
- DP_{244}: O estudo das peças que constituem as ferramentas permite identificar claramente quais as peças que devem ser montadas durante a tarefa.

3.2.16.2 Matriz de projeto

A equação 3.12 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{241} \\ FR_{242} \\ FR_{243} \\ FR_{244} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 \\ X & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{241} \\ DP_{242} \\ DP_{243} \\ DP_{244} \end{Bmatrix} \tag{3.15}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}, A_{14}: A existência de uma sequência de utilização para montagem e outra sequência para desmontagem é reproduzida pelo posicionamento das ferramentas no carrinho. Desta forma, uma alteração no estudo do uso de cada ferramenta, no manual ESM ou nas peças que constituem cada ferramenta em nada afeta a disposição e a arrumação das ferramentas no carrinho. O valor destes elementos é desta forma nulo.

A_{21}, A_{31}, A_{41} : Uma mudança na cadeia de utilização de ferramentas pode alterar o posicionamento das ferramentas. O mais importante a ser respeitado no sequenciamento de ferramentas, para que seja intuitivo o uso da próxima ferramenta, é a existência de uma cadeia de utilização com duas sequências, uma para a montagem e outra para a desmontagem. Logo o posicionamento que cada ferramenta tem, deve respeitar esta cadeia. Caso seja possível, a ferramenta deve ser posicionada de forma a estar numa posição mais proeminente, ou mais próxima de ferramentas ou peças usadas em conjunto. Desta forma, uma mudança no DP_{211} afeta todos os FRs desta decomposição.

A_{23}, A_{24}: O estudo do manual ESM e o estudo das peças que constituem as ferramentas apenas determinam que ferramentas são utilizadas para uma determinada tarefa, não analisando que ferramentas são mais utilizadas. Logo, uma alteração nestes dois estudos em nada afeta o FR_{212}.

A_{32}, A_{34}: O estudo do uso de cada ferramenta apenas indica o número de vezes que uma ferramenta individual é utilizada. Desta forma, uma mudança no estudo do uso de cada ferramenta e no estudo das peças em nada afeta o posicionamento de ferramentas utilizadas em conjunto.

A_{42}, A_{43}: O manual ESM não contém informação relativa às partes que constituem uma ferramenta, sendo esta informação apresentada no manual ITEM. Desta forma, uma mudança no estudo do uso de cada ferramenta e no estudo do manual ESM em nada afeta o posicionamento das peças que constituem uma ferramenta.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.17 Terceiro nível de decomposição para o estudo das ferramentas usadas na tarefa (DP_{25})

3.2.17.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.14 apresenta a decomposição do estudo das ferramentas usadas na tarefa.

Tabela 3.17: Decomposição de $FR_{2.5}$ e de $DP_{2.5}$

	Requisitos Funcionais
	Agrupar todas as ferramentas necessárias para uma determinada tarefa num só carrinho
1	Definir as ferramentas requisitadas para a tarefa
2	Identificar que ferramentas são necessárias para a tarefa
3	Agrupar as ferramentas usadas por subtarefas
4	Destinar um carrinho a certas subtarefas tendo em consideração as ferramentas que irá transportar
	Parâmetros de Projeto
	Estudo das ferramentas usadas na tarefa
1	Estudo do manual ESM
2	Análise das operações da equipa de produção
3	Sistema lógico de agrupamento de ferramentas
4	Análise de limitações do carrinho

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{25}.

- FR_{251}: A definição das ferramentas requisitadas para a execução de uma tarefa permite projetar o carrinho destinado à arrumação das mesmas.
- DP_{251}: O estudo do manual ESM permite analisar não só as subtarefas necessárias para a realização da tarefa, como também as ferramentas requisitadas para executar cada subtarefa.
- FR_{252}: Existem ferramentas que apesar de serem identificadas no manual ESM para a execução da tarefa não são utilizadas diretamente na manutenção do motor. Isto pode dever-se à sua utilização prévia noutros sectores ou por serem de uso opcional.
- DP_{252}: Nem todas as ferramentas requisitadas pelo manual ESM são utilizadas no processo de manutenção da TAP. Desta forma, a análise da execução da manutenção do motor no chão da oficina permite definir quais das ferramentas requeridas pelo manual ESM são essenciais para a manutenção.
- FR_{253}: Algumas tarefas de manutenção requisitam um número elevado de ferramentas. A atribuição das ferramentas por subtarefas permite a sua organização por vários carrinhos, mantendo a independência de cada carrinho.
- DP_{253}: Para satisfazer o FR_{223} agrupam-se as ferramentas por subtarefas a executar. É importante que ferramentas referentes à execução de uma subtarefa não fiquem agrupadas em dois grupos diferentes.
- FR_{254}: A determinação do peso máximo que cada carrinho pode transportar permite definir as ferramentas que podem ser armazenadas nos carrinhos. Para uma utilização ótima do carrinho, é preciso colocar ferramentas que executem a mesma subtarefa, como foi determinado no FR_{223}.
- DP_{254}: Os carrinhos têm limitações em termos do peso e volume das ferramentas que conseguem transportar. A partir de uma análise de limitações do carrinho é

possível definir que ferramentas este pode transportar, tendo em conta os grupos de ferramentas previamente organizados.

3.2.17.2 Matriz de projeto

A equação 3.13 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{251} \\ FR_{252} \\ FR_{253} \\ FR_{254} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 \\ X & X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{251} \\ DP_{252} \\ DP_{253} \\ DP_{254} \end{Bmatrix} \tag{3.16}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}, A_{14}: Uma mudança nas limitações do carrinho, na forma de agrupar as ferramentas ou nas operações da equipa de produção no chão de fábrica em nada alteram as ferramentas requisitadas para a tarefa pela CFM. Desta forma, estes elementos têm um valor nulo.

A_{21}: Este elemento tem o valor de X pois, para verificar com a equipa de produção que ferramentas são necessárias para a tarefa, antes é necessário estudar o manual ESM para conhecer quais as ferramentas que devem ser utilizadas na execução da tarefa.

A_{23}, A_{24}: A forma de agrupar ferramentas e as limitações do carrinho em nada afetam as ferramentas necessárias para a equipa de produção executar a tarefa.

A_{31}, A_{32}: Para agrupar as ferramentas usadas por subtarefas é necessário estudar o manual ESM e verificar com a equipa de produção quais efetivamente são necessárias para executar a tarefa. Por exemplo, uma mudança na forma de manutenção do motor no chão de oficina pode levar a uma mudança na forma de agrupar as ferramentas por subtarefa. Visto que o DP_{251} e DP_{252} podem afetar o FR_{253}, o valor destes elementos é X.

A_{34}: As limitações do carrinho de ferramentas em nada afetam a forma de agrupar as subtarefas, pois esta depende da CFM e da equipa de produção.

A_{41}, A_{42}, A_{43}: Para destinar um carrinho a certas subtarefas tendo em consideração as limitações físicas do mesmo é necessário definir as subtarefas. Desta forma, qualquer mudança na forma de definir subtarefas pode alterar a forma de destinar o carrinho a estas. Por este motivo o elemento A_{43} tem um valor de X. Tal como foi referido anteriormente, as subtarefas são definidas através do estudo do manual ESM e da análise das operações da equipa de produção. Logo, assim, havendo uma mudança nas subtarefas, pode existir uma mudança na forma de como agrupar as ferramentas, que por sua vez pode alterar o FR_{254}, sendo assim o valor dos elementos A_{41} e A_{42} X.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.18 Terceiro nível de decomposição para *footprint* reduzida (DP_{31})

3.2.18.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.18 apresenta a decomposição da *footprint* reduzida.

Tabela 3.18: Decomposição de $FR_{3.1}$ e de $DP_{3.1}$

	Requisitos Funcionais
	Ocupar o mínimo espaço possível no chão de oficina
1	Criar várias prateleiras de forma a que se ocupe menos espaço em termos de *footprint*
2	Escolher um perfil para a estrutura do carrinho que economize espaço
3	Arrumar ferramentas compridas de geometria cilíndrica na vertical
4	Analisar se a ferramenta arrumada ocupa menos espaço montada ou desmontada
	Parâmetros de Projeto
	Footprint reduzida
1	Estudo da quantidade de prateleiras necessárias para conter todas as ferramentas
2	Utilização de perfil cantoneira
3	Furos na prateleira de cima
4	Comparação da footprint produzida pela ferramenta montada e desmontada

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{31}.

- FR_{311}: Uma estrutura que permita armazenamento na vertical terá naturalmente uma *footprint* mais reduzida. Para tal, a utilização de prateleiras nos carrinhos aumenta a capacidade de armazenamento na vertical.
- DP_{311}: Para satisfazer o FR_{311} é necessário proceder ao estudo de quantas prateleiras são necessárias para albergar as ferramentas tendo em conta a área que o carrinho irá ocupar.
- FR_{312}: O carrinho é composto por prateleiras e pela estrutura de suporte, a qual confere apoio estrutural. A escolha de um perfil estrutural que economize espaço é mais uma forma de diminuir a *footprint* do carrinho.
- DP_{312}: Escolheu-se a utilização de perfil em cantoneira, pois possibilita o suporte das prateleiras com um mínimo de espaço morto.
- FR_{313}: Arrumar ferramentas compridas de geometria cilíndrica na vertical vai de acordo com a lógica do FR_{311}, permitindo diminuir as dimensões do carrinho. Caso contrário, a colocação na horizontal iria levar ao aumento do comprimento ou da largura do carrinho.
- DP_{313}: A existência de furos na prateleira de cima permite o armazenamento de ferramentas cilíndricas que tenham um diâmetro maior numa das extremidades. Desta forma, a superfície da parte de maior diâmetro da ferramenta assenta na superfície da prateleira, com a imobilização da ferramenta.

- FR_{314}: Existem ferramentas constituídas por várias peças, sendo preciso avaliar se arrumadas com as peças montadas ocupam mais espaço no carrinho devido à geometria da ferramenta montada.

- DP_{314}: Ao comparar a *footprint* gerada pela ferramenta montada com a *footprint* da ferramenta desmontada é possível averiguar o espaço que a ferramenta ocupa em cada disposição.

3.2.18.2 Matriz de projeto

A equação 3.17 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{311} \\ FR_{312} \\ FR_{313} \\ FR_{314} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{311} \\ DP_{312} \\ DP_{313} \\ DP_{314} \end{Bmatrix} \tag{3.17}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Cada FR aborda uma situação distinta (número de prateleiras, estrutura, ferramentas de geometria cilíndrica e as peças que constituem cada ferramenta), não havendo assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.19 Terceiro nível de decomposição para formato paralelipipédica(DP_{32})

3.2.19.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.19 apresenta a decomposição do formato paralelipipédico.

Tabela 3.19: Decomposição de $FR_{3.2}$ e de $DP_{3.2}$

	Requisitos Funcionais
	Criar um carrinho com uma geometria que facilite a sua arrumação quando não está em uso
1	Arranjar um sistema de arrumação em que os carrinhos são arrumados em cima dos outros
2	Certificar que o comprimento e largura do carrinho são relativamente proporcionais
3	Implementar um mecanismo de retração das prateleiras do carrinho para facilitar a arrumação
4	Certificar que a geometria das pegas não criam espaços mortos na arrumação
	Parâmetros de Projeto
	Formato paralelipipédica
1	Prateleiras de armazenamento de carrinhos
2	Proporção de comprimento para largura não exceder os 1,7
3	Prateleiras com corrediças
4	Pegas com até 200 mm fora do carrinho

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{32}.

- FR_{321}: Tal como no FR_{311}, arranjar várias prateleiras para as ferramentas, permite fazer com que os carrinhos ocupem menos espaço. Ao aproveitar o espaço vertical disponível na ferramentaria, torna-se possível aumentar o número de carrinhos arrumados.

- DP_{321}: Para arrumar vários carrinhos na vertical é necessário projetar prateleiras de armazenamento na ferramentaria. O pé direito da ferramentaria e a existência maquinaria para colocação/retirada dos carrinhos das prateleiras permite a aplicação desta solução.

- FR_{322}: A razão de proporcionalidade entre o comprimento e largura dos carrinhos condiciona os locais onde os mesmos podem ser armazenados. Por exemplo, numa zona de passagem não é possível o armazenamento de carrinhos por ficarem salientes.

- DP_{322}: Para satisfazer o FR_{322} definiu-se que a melhor proporção a seguir seria a de *Fibonacci* (a proporção do comprimento para a largura é de 1,62). Para abranger mais possibilidades de projeto do carrinho aceita-se que a proporção não exceda 1,7. No carrinho em questão a proporção foi de 1,675, tendo assim um erro de 3% relativo à proporção de *Fibonacci*.

- FR_{323}: Para otimizar o espaço de armazenamento é possível diminuir a distância entre prateleiras, desde que, para depois facilitar o acesso às ferramentas nelas armazenadas, seja possível puxar e retrair a prateleira.

- DP_{323}: Para ser possível puxar e retrair prateleiras, colocam-se corrediças nas prateleiras, que deslizam por calhas montadas na estrutura.

- FR_{324}: A geometria das pegas cria um espaço morto. Este é criado devido à saliência das pegas, dificultando assim a sua arrumação.

- DP_{324}: Para mitigar o espaço morto criado pelas pegas, delimita-se o comprimento das pegas até 200 mm.

3.2.19.2 Matriz de projeto

A equação 3.18 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{321} \\ FR_{322} \\ FR_{323} \\ FR_{324} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{321} \\ DP_{322} \\ DP_{323} \\ DP_{324} \end{Bmatrix} \tag{3.18}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Cada FR aborda uma situação distinta (arrumação e dimensão dos carrinhos, prateleiras deslizantes e espaços mortos), não havendo assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.20 Terceiro nível de decomposição para locais de arrumação delineados (DP_{33})

3.2.20.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.20 apresenta a decomposição dos locais de arrumação delineados.

Tabela 3.20: Decomposição de $FR_{3.3}$ e de $DP_{3.3}$

	Requisitos Funcionais
	Criar um sistema para contabilização de carrinhos em uso
1	Definir um local específico para a arrumação dos carrinhos
2	Delimitar uma área específica para a manutenção do módulo principal do core no chão de oficina
3	Criar um sistema lógico relativo à forma como se ocupa as áreas de manutenção do core na oficina
4	Arranjar sistema de segurança para os carrinhos ficarem armazenados corretamente
	Parâmetros de Projeto
	Locais de arrumação delineados
1	Rectângulo pintado no chão identificando o local de arrumação
2	Rectângulo pintado no chão identificando o local de manutenção
3	Numeração dos retângulos pintados no chão de oficina
4	Verificação diária dos locais para arrumação ocupados

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{33}.

- FR_{331}: A definição um local específico para arrumação dos carrinhos permite determinar pela observação dos locais vazios quantos carrinhos estão em uso.
- DP_{331}: Para satisfazer FR_{331} pintar retângulos no chão que identifiquem os locais de arrumação dos carrinhos na ferramentaria.
- FR_{332}: A definição de um local específico para a manutenção do módulo principal do *Core* no chão da oficina permite determinar pela observação os carrinhos que estão a ser utilizados.
- DP_{332}: Este DP é semelhante ao DP_{331}, no entanto, o rectângulo é pintado no chão de oficina de forma a establecer o local onde os carrinhos devem permanecer durante a manutenção do módulo principal do *Core*.
- FR_{333}: Na secção de subconjuntos móveis é possível utilizar entre um a dois carrinhos, devendo assim haver dois lugares específicos para os mesmos. Para guiar a colocação dos carrinhos no local correto deve ser criado uma ordem de ocupação dos locais delineados. Além disso, quando o segundo local está ocupado é suposto o primeiro local estar ocupado.

- DP_{333}: Ao numerar os retângulos pintados no chão da oficina, torna-se intuitivo a ordem de ocupação de cada espaço traçado.

- FR_{334}: O chão de oficina é um local muito movimentado e com diversas atividades a acontecer. Nestas situações é possível que carrinhos e ferramentas fiquem arrumados em sítios errados. Para evitar esta situação o mais possível é necessário implementar um sistema que verifique a correta arrumação dos carrinhos.

- DP_{334}: Se houver uma verificação diária pelos técnicos encarregues da ferramentaria dos lugares ocupados pelos carrinhos na arrumação e dos lugares ocupados pelos carrinhos no chão da oficina, é possível detetar facilmente se algum carrinho se encontra armazenado incorretamente.

3.2.20.2 Matriz de projeto

A equação 3.19 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{331} \\ FR_{332} \\ FR_{333} \\ FR_{334} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{331} \\ DP_{332} \\ DP_{333} \\ DP_{334} \end{Bmatrix} \tag{3.19}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Cada FR aborda uma situação distinta (locais de arrumação e manutenção, sistema de contabilização de áreas de manutenção ocupadas e sistema de segurança contra a má arrumação), não havendo assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.21 Terceiro nível de decomposição para comprimento e largura com valores próximos(DP_{34})

3.2.21.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.21 apresenta a decomposição do comprimento e largura com valores próximos.

Tabela 3.21: Decomposição de $FR_{3.4}$ e de $DP_{3.4}$

	Requisitos Funcionais
	Facilitar a manobrabilidade do carrinho
1	Tornar o carrinho mais ergonómico
2	Facilitar a forma de fazer as curvas
3	Limitar o atrito entre as rodas e o chão
4	Adaptar o carrinho à tranposição de degraus pequenos
5	Dimensionar o carrinho de forma a ser facilmente manuseado por um técnico
6	Tornar possível a condução do carrinho do carrinho por dois técnicos
	Parâmetros de Projeto
	Comprimento e largura com valores próximos
1	Colocação de pegas no lado da largura
2	Colocação de 4 rodas giratórias
3	Utilização de rodas em teflon
4	Diâmetro das rodas deve ser superior a 100 mm
5	Estudo do peso total do carrinho
6	Colocação de pegas em duas pontas opostas do carrinho

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{34}.

- FR_{341}: O carrinho não será motorizado, logo é necessário haver uma estrutura de apoio de mãos para facilitar a sua condução.
- DP_{341}: A colocação das pegas facilita a manobrabilidade do carrinho. Isto deve-se ao facto do formato das pegas ser mais ergonómico do que a estrutura do carrinho.
- FR_{342}: O trajeto entre a ferramentaria e o chão de oficina não é em linha recta. Deste modo, é necessário que o carrinho possa fazer curvas sem dificuldade.
- DP_{342}: Se todas as rodas do carrinho forem giratórias o movimento curvilíneo do carrinho é facilitado.
- FR_{343}: Limitando o atrito entre as rodas e o chão diminui-se a força necessária a exercer de forma a deslocar o carrinho. Ao diminuir a força, a manobrabilidade do carrinho aumenta.
- DP_{343}: O uso de teflon nas rodas resulta no menor atrito do que as rodas pneumáticas.
- FR_{344}: O chão de oficina apresenta alguns desníveis. Assim, para um transporte seguro das ferramentas, o carrinho deve poder passar por degraus pequenos sem dificuldade.
- DP_{344}: O carrinho facilmente ultrapassa degraus presentes no seu caminho (com cerca de 30 mm de desnível) com rodas de diâmetro de 100 mm.

- FR_{345}: É importante permitir que o carrinho possa ser manobrado por apenas uma pessoa. Designadamente, nos casos em que só haja uma pessoa disponível para movimentar os carrinhos
- DP_{345}: É importante estudar o peso do carrinho de modo a permitir o seu transporte e segurança por uma só pessoa.
- FR_{346}: Embora o carrinho esteja desenhado para poder ser movimentado por uma única pessoa, para diminuir o esforço exercido pelos técnicos é considerado sistema que facilite o seu transporte por dois técnicos.
- DP_{346}: Ao existirem pegas localizadas nos dois extremos do carrinho é mais fácil a sua condução por dois técnicos.

3.2.21.2 Matriz de projeto

A equação 3.20 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{341} \\ FR_{342} \\ FR_{343} \\ FR_{344} \\ FR_{345} \\ FR_{346} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X & X & X & X \\ X & X & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & X \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{341} \\ DP_{342} \\ DP_{343} \\ DP_{344} \\ DP_{345} \\ DP_{346} \end{Bmatrix} \tag{3.20}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

$A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12},A_{13}, A_{14}, A_{15}, A_{16}: A ergonomia do carrinho é aumentada através da mudança em tudo o que diminua a força necessária para manobrar o carrinho e facilite o movimento do carrinho tornará o manuseamento do carrinho mais ergonómico.

A_{23},A_{24}, A_{26}: Uma mudança do material ou do diâmetro das rodas não afeta em princípio a capacidade de curvar do carrinho, uma vez que o raio de curvatura é afetado essencialmente pela espessura das rodas[citacao]. A existência de pegas em duas pontas também não afeta a forma de fazer curvas. Desta forma, o valor destes elementos será nulo.

A_{21}, A_{25}: Uma mudança do lado da colocação das pegas no lado do comprimento do carrinho resulta na necessidade de aplicar mais força para o movimentar visto as extremidades estarem mais afastadas e assim ser criado mais momento. O peso do carrinho afeta a capacidade de movimentar o carrinho, afetando também a facilidade do carrinho fazer as curvas. Estes elementos têm assim valor de X.

A_{31},A_{32}, A_{36}: O atrito não depende da área de superfície, logo uma mudança do número de rodas não afeta o atrito entre as rodas e o chão. Da mesma forma, uma mudança do posicionamento de pegas ou número de pegas apenas altera o modo como é distribuída

e exercida a força aplicada no transporte do carrinho. O atrito não depende dessa força, dependendo só do peso. Dado que a mudança destes DPs em nada afeta o FR_{342}, estes elementos têm um valor nulo.

A_{34}, A_{35}: A força de atrito é calculada por $F_a = \mu \times N$, sendo que μ é o coeficiente de atrito e depende do material e N é a força normal e depende do peso total do carrinho. Desta forma, uma mudança no material das rodas ou no peso do carrinho afetaria o atrito, tendo estes elementos um valor de X. Importante mencionar que o coeficiente de atrito não é o único fator importante para a escolha do material das rodas, sendo a rigidez do material também muito importante. Rodas compostas por material pouco rígido farão com que o formato esférico da roda seja deformado, criando mais atrito.

A_{41},A_{42}, A_{43}, A_{45}: Uma mudança no número de rodas e no material das rodas em nada afeta a capacidade do carrinho superar pequenos obstáculos como degraus baixos. O mesmo se aplica para o peso total do carrinho ou para a posição da colocação das pegas, pois o carrinho está projetado para a possibilidade de superar pequenos degraus, desta forma, uma mudança no peso não afeta grandemente a capacidade de superar degraus pequenos.

A_{46}: A existência de pegas em pontas opostas do carrinho facilita a subida de degraus, pois ao exercer força num só ponto, as rodas do carrinho encravam mais facilmente. Desta forma, o valor deste elemento é X.

A_{51},A_{52}, A_{53}, A_{54}, A_{56}: A única forma de possibilitar a manobra do carrinho por dois técnicos é a colocação de mais do que uma pega no mesmp. Desta forma estes elementos são nulos.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.22 Terceiro nível de decomposição para o estudo do layout das ferramentas no carrinho(DP_{41})

3.2.22.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.22 apresenta a decomposição do estudo do layout das ferramentas no carrinho.

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{41}.

Tabela 3.22: Decomposição de $FR_{4.1}$ e de $DP_{4.1}$

	Requisitos Funcionais
	Otimizar o espaço ocupado pelas ferramentas no carrinho
1	Colocar na mesma prateleira todas as caixas paralelipipédicas de armazenamento das ferramentas
2	Posicionar as caixas que armazenam as ferramentas a 30 mm de distância umas das outras
3	Arrumar as caixas na face que gere menor *footprint*
4	Otimizar o espaço ocupado pelas *shadowboxes*
5	Posicionar a *shadowbox* de ferramentas cilíndricas no interior do furo
	Parâmetros de Projeto
	Estudo do layout das ferramentas no carrinho
1	Estudo das ferramentas armazenadas em caixas paralelipipédicas
2	Estudo do *layout* das caixas paralelipipédicas
3	Estudo da geometria das caixas paralelipipédicas
4	Paredes das *shadowboxes* com 20 mm de espessura
5	Estudo do layout das ferramentas cilíndricas

- FR_{411}: A colocação de todas as caixas paralelipipédicas na mesma prateleira permite reduzir o espaço morto no armazenamento. Isto deve-se ao formato paralelipipédico ser mais eficiente relativamente ao espaço utilizado.
- DP_{411}: Deve fazer-se um levantamento de quais são as ferramentas armazenadas em caixas paralelipipédicas e das dimensões de cada um das caixas de forma a saber como as posicionar numa mesma prateleira.
- FR_{412}: Dado que as caixas que armazenam as ferramentas são carregadas manualmente e o seu peso não ultrapassa os 15 kg, devem ser manobradas facilmente sem exigir esforço físico exagerado aos trabalhadores. A distância de 30 mm verificada entre caixas é determinada pela *shadowbox* que se encontra no meio e pela distância necessária para retirar as caixas com facilidade.
- DP_{412}: Com o estudo do *layout* das caixas paralelipipédicas é possível otimizar o posicionamento destas para economizar espaço ocupado.
- FR_{413}: Ao arrumar as caixas na face que gera menor *footprint* é possível diminuir o espaço ocupado por ferramentas. Este requisito só pode ser cumprido quando não existe uma posição preferencial para o armazenamento da caixa que contém a ferramenta.
- DP_{413}: Para saber qual é a face da caixa paralelipipédica que gera menor *footprint* deve-se proceder ao estudo da sua geometria
- FR_{414}: As *shadowboxes* têm de ter uma determinada espessura para aguentarem estruturalmente os esforços exercidos pelas ferramentas mas devem ter uma espessura reduzida para otimizar o espaço ocupado. Este FR refere-se às *shadowboxes* que definem o lugar das caixas paralelipipédicas.
- DP_{414}: Determinou-se que uma espessura de 20 mm para as *shadowboxes* confere estabilidade estrutural suficiente sem ter uma grande *footprint*.

- FR_{415}: Ao posicionar as *shadowboxes* de ferramentas cilíndricas no interior do furo, otimiza-se o espaço ocupado na prateleira. O posicionamento da *shadowbox* nesta situação só é possível caso a ferramenta não seja composta por duas metades, nessa situação a *shadowbox* tem de ser exterior.

- DP_{415}: Nem todas as ferramentas cilíndricas possuem um *layout* que permita posicionar uma *shadowbox* no interior do furo. Logo, deve-se proceder a um estudo do *layout* de cada ferramenta cilíndrica para verificar a possibilidade do posicionamento da *shadowbox* no interior do furo.

3.2.22.2 Matriz de projeto

A equação 3.21 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{411} \\ FR_{412} \\ FR_{413} \\ FR_{414} \\ FR_{415} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{411} \\ DP_{412} \\ DP_{413} \\ DP_{414} \\ DP_{415} \end{Bmatrix} \tag{3.21}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{14}, A_{15}: Uma mudança na espessura das *shadowboxes* ou no estudo do *layout* em nada afeta a possibilidade de colocar todas as ferramentas na mesma prateleira. Desta forma estes elementos têm valor nulo.

A_{12}, A_{13}: Além de ser importante saber quais são as ferramentas armazenadas em caixas paralelipipédicas, é igualmente importante o estudo do *layout* e da geometria das caixas paralelipipédicas, para determinar a forma de as posicionar e otimizar o espaço utilizado. Uma mudança tanto na geometria como no *layout* pode afetar a possibilidade de posicionar todas as ferramentas que estão arrumadas em caixas paralelipipédicas na mesma prateleira.

A_{21}, A_{24}, A_{25}: Uma mudança da espessura das *shadowboxes* e no *layout* das ferramentas cilíndricas em nada afetam a garantia que as ferramentas estão a 30 mm de distância entre si.

A_{23}: Uma mudança na geometria pode fazer com que seja impossível colocar uma caixa e garantir que cada lado está a 30 mm de outras caixas. Nesta situação seria necessário criar um novo *layout* das caixas paralelipédicas. Por este motivo, o valor deste elemento é X.

A_{31}, A_{32}, A_{34}, A_{35}: Para arrumar cada caixa de forma a gerar menor *footprint* só depende do *layout* da face da caixa em si. Uma mudança na espessura das *shadowboxes* e no *layout* das ferramentas cilíndricas em nada afeta a *footprint* ocupada pelas caixas paralelipipédicas. A geometria da caixa em si interfere com a forma de posicionar essa caixa em relação a

outras na prateleira e não com a forma de posicionar a caixa para gerar menor *footprint*, desta forma, o valor destes elementos é nulo.

A_{41}, A_{42}, A_{43}, A_{45}: O espaço ocupado pelas *shadowboxes* não está relacionado com as características das ferramentas cilíndricas e de ferramentas arrumadas em caixas paralelipipédicas, sendo assim o valor destes elementos nulo.

A_{51}, A_{52}, A_{53}, A_{54}: O *layout* das ferramentas cilíndricas não é afetado por características de ferramentas armazenadas em caixas paralelipipédicas nem por características das *shadowboxes*.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.23 Terceiro nível de decomposição para o mapeamento das ferramentas na superfície do carrinho(DP_{42})

3.2.23.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.23 apresenta a decomposição do mapeamento das ferramentas na superfície do carrinho.

Tabela 3.23: Decomposição de $FR_{4.2}$ e de $DP_{4.2}$

	Requisitos Funcionais
	Definir locais específicos para cada ferramenta
1	Criar shadowboxes
2	Colocar identificação da ferramenta no seu local de arrumação
	Parâmetros de Projeto
	Mapeamento das ferramentas na superfície do carrinho
1	Estudo da geometria da ferramenta que assenta na prateleira
2	Plaquetas com o P/N das ferramentas

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{42}.

- FR_{421}: Com a criação de *shadowboxes* é possível definir um local de arrumação específico para as ferramentas, assim como, uma forma específica de arrumar caixas ou ferramentas. As *shadowboxes* também servem de proteção das ferramentas contra danos físicos.

- DP_{421}: Para criar *shadowboxes* com geometrias compatíveis com as das ferramentas é necessário estudar a geometria destas últimas.

- FR_{422}: Além da *shadowbox* é necessário colocar alguma identificação no lugar de armazenamento das ferramentas, pois certas ferramentas têm geometrias semelhantes.

- DP_{422}: A colocação de uma plaqueta com o P/N da ferramenta permite identificar o lugar de arrumação desta.

3.2.23.2 Matriz de projeto

A equação 3.22 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{421} \\ FR_{422} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{421} \\ DP_{422} \end{Bmatrix} \tag{3.22}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Cada FR aborda uma situação distinta para verificar que a ferramenta é arrumada no local correto do carrinho, através de: i) criar o negativo da ferramenta em espuma para a ferramenta só poder ser arrumada naquele local em específico; ii) identificar cada local com o *part number* da ferramenta. Não há assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.24 Terceiro nível de decomposição para o estudo do peso e da geometria das ferramentas(DP_{43})

3.2.24.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.24 apresenta a decomposição do estudo do peso e da geometria das ferramentas.

Tabela 3.24: Decomposição de $FR_{4.3}$ e de $DP_{4.3}$

	Requisitos Funcionais
	Posicionar cada ferramenta de forma a facilitar o seu acesso
1	Possibilitar o acesso às ferramentas independentemente do lado onde o técnico se encontra
2	Colocar as ferramentas mais pesadas junto da borda do carrinho para facilitar a sua retirada manual se aplicável
3	Posicionar as ferramentas que precisam de cadernal numa posição que seja facilmente acedida pelo mesmo
4	Colocar corrediças em prateleiras de difícil acesso
5	Posicionar ferramentas mais difíceis de manusear na prateleira de cima
	Parâmetros de Projeto
	Estudo do peso e da geometria das ferramentas
1	Largura do carrinho ser inferior a 1000 mm
2	Estudo do peso das ferramentas que não necessitam de cadernal
3	Estudo das ferramentas que precisam de cadernal
4	Estudo da acessbilidade de cada prateleira
5	Estudo da ergonomia de ferramentas

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{43}.

- FR_{431}: Aumenta-se a cadência de trabalho se o técnico não tiver de se deslocar fisicamente de um lado do carrinho para outro, estando todas as ferramentas ao alcance dos braços.

- DP_{431}: Se a largura do carrinho for inferior a 1000 mm, uma pessoa debruçada de braços estendidos consegue aceder às ferramentas colocadas no lado oposto do carrinho.

- FR_{432}: A colocação das ferramentas mais pesadas junto da borda do carrinho torna o seu manuseio mais seguro. Este FR também evita danos físicos nas ferramentas ao diminuir a probabilidade de contacto com outras.

- DP_{432}: Para satisfazer o FR_{432} deve-se proceder ao estudo do peso das ferramentas que não necessitam de cadernal para selecionar as mais pesadas.

- FR_{433}: As ferramentas que necessitam do cadernal necessitam de ser localizadas na prateleira de cima para serem facilmente acedidas pelo cadernal. Caso fossem colocadas noutra prateleira, o técnico teria de manualmente retirá-las do carrinho para serem acedidas pelo cadernal. Atendendo ao peso elevado que as ferramentas que necessitam de cadernal têm, isto prejudicaria a saúde do técnico e poderia pôr a ferramenta em possíveis situações de dano.

- DP_{433}: Para otimizar o posicionamento das ferramentas que necessitem de cadernal é necessário conhecer o seu formato para facilitar a utilização do mesmo.

- FR_{434}: Prateleiras de difícil acesso devem ter corrediças para permitir um melhor manuseamento das ferramentas que contêm.

- DP_{434}: Para satisfazer o FR_{434} deve-se avaliar a facilidade de acesso a cada prateleira. É desnecessário a colocação de corrediças em prateleiras de fácil acesso.

- FR_{435}: Ferramentas mais difíceis de manusear devem ser colocadas na prateleira de cima para o técnico ter mais controlo sobre o manuseamento da ferramenta.

- DP_{435}: Para determinar quais são as ferramentas a ser posicionadas na prateleira de cima é necessário proceder à análise das condições ergonómicas que facilitem o seu manuseio.

3.2.24.2 Matriz de projeto

A equação 3.23 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{431} \\ FR_{432} \\ FR_{433} \\ FR_{434} \\ FR_{435} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{431} \\ DP_{432} \\ DP_{433} \\ DP_{434} \\ DP_{435} \end{Bmatrix} \tag{3.23}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Todos os elementos zero da matriz de projeto são estudos e análises separadas, não havendo assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.25 Terceiro nível de decomposição para o estudo das ferramentas que integram cada carrinho(DP_{44})

3.2.25.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.25 apresenta a decomposição do estudo das ferramentas que integram cada carrinho.

Tabela 3.25: Decomposição de $FR_{4.4}$ e de $DP_{4.4}$

	Requisitos Funcionais
	Identificar carrinhos diferentes
1	Diferenciar visualmente os carrinhos diferentes
2	Conter informação relativa à quantidade e tipos de ferramentas presentes no carrinho
3	Esquematizar *layouts* semelhantes nos carrinhos que executam as mesmas tarefas mas têm ferramentas diferentes
	Parâmetros de Projeto
	Estudo das ferramentas que integram cada carrinho
1	Pintura das estruturas dos carrinhos
2	Folha informativa relativa às ferramentas presentes no carrinho
3	Estudo da estandardização do *layout*

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{44}.

- FR_{441}: Para otimizar o tempo de transporte do carrinho da ferramentaria ao chão de oficina é necessário facilitar o processo da identificação do carrinho a usar. Como verificar as ferramentas diferentes que distinguem o carrinho é um processo demorado, opta-se por usar outro aspeto que permita a sua identificação visual.

- DP_{441}: Uma forma de diferenciar visualmente carrinhos diferentes é definir um código de cores para a estrutura dependendo das funcionalidades de cada.

- FR_{442}: Além de identificação visual é necessário conter informação relativa à quantidade e ao tipo de ferramentas presentes no carrinho de forma a não causar constrangimentos a meio do processo de manutenção.

- DP_{442}: Uma folha informativa relativa às ferramentas presentes no carrinho é uma forma de apresentar a informação para os técnicos.

- FR_{443}: Para facilitar a identificação das ferramentas diferentes, as ferramentas idênticas devem ser arrumadas em locais idênticos nos carrinhos.

- DP_{443}: Para satisfazer o FR_{443} é necessário analisar os *layouts* de todos os carrinhos que executam as mesmas tarefas para ver se é possível que as ferramentas idênticas em locais idênticos, tendo em conta as geometrias de ferramentas diferentes.

3.2.25.2 Matriz de projeto

A equação 3.24 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{441} \\ FR_{442} \\ FR_{443} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{441} \\ DP_{442} \\ DP_{443} \end{Bmatrix} \tag{3.24}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Os elementos da matriz de projeto correspondem necessidades diferentes para a identificação do carrinho (visual, informação disponível, *layouts*), não havendo assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.26 Terceiro nível de decomposição para o estudo da legislação da higiene e segurança no trabalho aplicável à geometria do carrinho(DP_{51})

3.2.26.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.26 apresenta a decomposição do estudo da legislação da higiene e segurança no trabalho aplicável à geometria do carrinho.

Tabela 3.26: Decomposição de $FR_{5.1}$ e de $DP_{5.1}$

	Requisitos Funcionais
	Respeitar os regulamentos de trabalho relativos à geometria do carrinho
1	Colocar a prateleira mais alta a 1200 mm do chão
2	Colocar as pegas entre 910 mm a 1120 mm do chão
3	Colocar a prateleira mais baixa a pelo menos 160 mm do chão
4	Utilizar pegas com aplitude até 460 mm
	Parâmetros de Projeto
	Estudo da legislação da higiene e segurança no trabalho aplicável à geometria do carrinho
1	Estudo da altura das rodas e da estrutura
2	Estudo do posicionamento das pegas no carrinho
3	Estudo do posicionamento da prateleira mais baixa
4	Estudo da geometria das pegas

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{51}.

- FR_{511}: As bancadas de trabalho normalmente têm uma altura de 1200 mm. A prateleira mais alta tem armazenadas as ferramentas que necessitam de cadernal, sendo, por esse motivo, necessário apertar e desapertar roscas de forma a montá-las ou a desmontá-las no cadernal. Assim, é necessário que a prateleira de cima tenha uma altura adequada a este trabalho.

- DP_{511}: Para garantir que o carrinho tem uma altura de 1200 mm é necessário estudar a altura das rodas e da estrutura. No cálculo da altura da estrutura é necessário contabilizar os 20 mm de altura relativos às prateleiras de *teflon* que assentam na estrutura.

- FR_{512}: O técnico, ao apoiar as mãos em pegas que estão entre 910 mm e 1120 mm de altura, consegue empurrar o carrinho numa posição de costas direitas, evitando lesões corporais.

- DP_{512}: As pegas são também constituídas por perfis de aço estrutural e estão ligadas por soldadura ao resto da estrutura. O desenho da estrutura pode não permitir facilmente a colocação das pegas, sendo necessário encontrar um posicionamento que seja o mais aproximado dos limites impostos no FR_{512} e no FR_{511}.

- FR_{513}: A prateleira inferior deve permitir um fácil acesso às ferramentas. A sua colocação a 160 mm do chão permite um acesso sem grande esforço às ferramentas do meio da prateleira (caso mais crítico).

- DP_{513}: O posicionamento da prateleira inferior na estrutura deve ter em consideração as rodas, outros elementos estruturais e de eventuais obstáculos existentes no chão que interfiram com a passagem do carrinho. Quanto mais alta esta prateleira estiver posicionada, mais fácil será o acesso às ferramentas, mas a estabilidade do carrinho será menor.

- FR_{514}:Pelo KODAK, o ser humano exerce esforço excessivo nas costas caso as mãos estejam espaçadas mais de 460 mm. Para tal, o espaçamento dado às barras é inferior a 460 mm (no caso do *kit* do *Core* é 390 mm) para possibilitar o seu que seja empurrado sem um espaçamento excessivo das mãos.

- DP_{514}: Para não permitir um espaçamento entre os dois extremos das pegas de 460 mm é importante estudar a geometria das pegas, para definir se aplicam 2 pegas mais pequenas ou uma pega grande.

3.2.26.2 Matriz de projeto

A equação 3.25 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{511} \\ FR_{512} \\ FR_{513} \\ FR_{514} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{511} \\ DP_{512} \\ DP_{513} \\ DP_{514} \end{Bmatrix} \tag{3.25}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{12}, A_{13}: Uma mudança no posicionamento da prateleira inferior em nada afeta o posicionamento da prateleira superior, pois a posição da prateleira inferior é definida pelo tamanho das rodas. O posicionamento das pegas é definido *à posteriori* depois da estrutura do carrinho estar concebida, não afetando assim a posição da prateleira superior. Desta forma, ambos os elementos têm um valor nulo.

A_{14}, A_{24}, A_{34}: A geometria das pegas deve criar condições ergonómicas para empurrar o carrinho, não afetando assim a posição das prateleiras nem das pegas, sendo assim o valor destes elementos nulo.

A_{23}: Uma mudança no posicionamento da prateleira inferior não afeta a estrutura. Como as pegas estão inseridas na estrutura também não seriam afetadas.

A_{21}: Uma mudança no estudo do diâmetro das rodas e da estrutura afeta a distância das pegas ao chão, pois as pegas são soldadas à estrutura. Deste modo, o valor deste elemento é X.

A_{31}: O posicionamento da prateleira inferior é afetado pelo diâmetro das rodas. Logo, uma mudança no diâmetro das rodas afeta a possibilidade da prateleira estar a pelo menos 160 mm do chão, tendo assim este elemento um valor de X.

A_{32}: Uma mudança no posicionamento das pegas do carrinho em nada afeta o posicionamento do carrinho, tendo este elemento então um valor nulo

A_{41}, A_{42}, A_{43}: A geometria das pegas serve para criar um apoio ergonómico para empurrar o carrinho, não sendo afetada desta forma pelo posicionamento das prateleiras e da estrutura, nem pelo posicionamento das pegas, sendo assim o valor destes elementos nulo.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.27 Terceiro nível de decomposição para o estudo da legislação em higiene e segurança no trabalho relativos à força que um técnico pode aplicar(DP_{52})

3.2.27.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.27 apresenta a decomposição do estudo da legislação em higiene e segurança no trabalho relativos à força que um técnico pode aplicar.

Tabela 3.27: Decomposição de $FR_{5.2}$ e de $DP_{5.2}$

	Requisitos Funcionais
	Respeitar os regulamentos de trabalho relativos ao peso exercido durante o trabalho
1	Exercer uma força até 320 N para iniciar o movimento do carrinho
2	Exercer uma força até 230 N para o carrinho permanecer em movimento
3	Dimensionar o carrinho com até 700 kg
4	Colocar ferramentas com até 12 kg na prateleira debaixo
5	Deslocar o carrinho até 30 metros por utilização
	Parâmetros de Projeto
	Estudo da legislação em higiene e segurança no trabalho relativos à força que um técnico pode aplicar
1	Estudo do coeficiente de atrito estático das rodas
2	Estudo do coeficiente de atrito de rolamento
3	Estudo do peso total do carrinho
4	Estudo do peso das ferramentas a serem transportadas pelo carrinho
5	Estudo do percurso feito da ferramentaria à secção de subconjuntos móveis

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{52}.

- FR_{521}: De acordo com as normas técnicas do manual [21], o esforço exercido pelo técnico para iniciar o movimento do carrinho não deve ultrapassar os 320 N. Ao empurrar o carrinho na horizontal, exerce-se mais força nos braços e nas pernas, partes menos vulneráveis, podendo assim sustentar esforços maiores. É possível exercer mais força no início do movimento porque do esforço é limitada a alguns segundos, até à colocação do carrinho em movimento.

- DP_{521}: Para determinar a força para iniciar o movimento do carrinho é necessário conhecer o coeficiente de atrito estático do material das rodas.

- FR_{522}: Dado que o tempo despendido para manter o carrinho em movimento é 2 ordens de grandeza superior ao tempo despendido para iniciar o movimento do carrinho, a força exercida para manter o carrinho em movimento tem de ser menor (230 N).

- DP_{522}: Para determinar a força para manter o carrinho em movimento é necessário conhecer o coeficiente de atrito de rolamento das rodas.

- FR_{523}: Ao dimensionar um carrinho com até 700 kg, respeitam-se as normas técnicas estabelecidas na indústria para o peso que um carrinho de 4 rodas não motorizado pode ter [21].

- DP_{523}: Para projetar um carrinho que não exceda os 700 kg é necessário estudar o peso das ferramentas, da estrutura, das prateleiras e todos os órgãos de máquinas que constituem o carrinho. Caso o carrinho exceda os 700 kg é necessário mudar as especificações das prateleiras e da estrutura de forma ao peso total se encontrar dento do intervalo estipulado.

- FR_{524}: Na prateleira debaixo só se encontram ferramentas que são manipuladas manualmente, visto que o cadernal não tem acesso nessa prateleira. A colocação de ferramentas com até 12 kg na prateleira debaixo evita que o técnico exerça esforços específicos para a manipulação das ferramentas.

- DP_{524}: Para selecionar as ferramentas que podem ser colocadas na prateleira debaixo é importante determinar o peso de todas as ferramentas transportadas pelo carrinho.

- FR_{525}: Para minimizar o esforço exercido na deslocação do carrinho, é importante definir um caminho específico. A distância máxima recomendada para empurrar o carrinho é 30 metros.

- DP_{525}: Para respeitar o FR_{525}, ou seja, um técnico não movimenta um carrinho mais do que 30 metros, é necessário estudar o percurso. Caso este seja maior do que 30

m, defini-se um local onde o técnico responsável pela ferramentaria deve deixar o carrinho para que um TMA realize a parte restante da deslocação do carrinho.

3.2.27.2 Matriz de projeto

A equação 3.26 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{521} \\ FR_{522} \\ FR_{523} \\ FR_{524} \\ FR_{525} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & X & X & 0 \\ 0 & X & X & X & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{521} \\ DP_{522} \\ DP_{523} \\ DP_{524} \\ DP_{525} \end{Bmatrix} \tag{3.26}$$

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}: Os elementos da diagonal serão X pois cada DP foi escolhido para satisfazer o seu respetivo FR.

A_{13}, A_{14}: Para iniciar o movimento do carrinho é necessário exercer uma força que tenha um valor maior que a força de atrito estático. A força de atrito estático é calculada da seguinte forma: $F_e = N \times \mu_e$, sendo N a força normal do carrinho e μ_e o coeficiente do atrito estático. Desta forma, uma alteração no peso ou no coeficiente de atrito poderão afetar a satisfação do FR_{521}.

A_{12}, A_{15}: O valor destes elementos é nulo porque uma mudança na distância em que o carrinho é deslocado ou no coeficiente de atrito de rolamento em nada alteram a força de atrito estático.

A_{23}, A_{24}: Para o carrinho permanecer em movimento é necessário exercer uma força que tenha um valor maior ou igual à força de atrito de rolamento. A força de atrito de rolamento é calculada da seguinte forma: $F_R = N \times C_{rr}$, sendo N a força normal do carrinho e μ_c o coeficiente do atrito de rolamento. Desta forma, uma alteração no peso ou no coeficiente de atrito poderão afetar a satisfação do FR_{522}.

A_{22}, A_{25}: O valor destes elementos é nulo porque uma mudança na distância que o carrinho é deslocado ou no coeficiente de atrito estático em nada alteram a força de atrito de rolamento.

A_{34}: No cálculo do peso total do carrinho, o peso das ferramentas é contabilizado, pois as ferramentas são parte integrante do carrinho. Desta forma, o valor deste elemento é X.

A_{31}, A_{32}, A_{35}: Os coeficientes de atrito e a distância percorrida pelo carrinho em nada afetam o peso total do carrinho.

A_{41}, A_{42}, A_{43}, A_{45}: O peso das ferramentas é uma característica inerente a estas, não sendo alterado por nenhum fator no projeto do carrinho. Desta forma, o valor deste elemento é nulo.

A_{51}, A_{52}, A_{53}, A_{54}: A distância percorrida pelo carrinho é uma característica cujo valor não muda visto depender da distância entre a ferramentaria e a secção dos submódulos móveis.

A matriz é desacoplável, o que significa que a independência é possível.

3.2.28 Terceiro nível de decomposição para a análise de possíveis situações capazes de causar dano físico a um técnico (DP_{53})

3.2.28.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.28 apresenta a decomposição da análise de possíveis situações capazes de causar dano físico a um técnico.

Tabela 3.28: Decomposição de $FR_{5.3}$ e de $DP_{5.3}$

	Requisitos Funcionais
	Proteger os técnicos contra danos físicos
1	Proteger o técnico contra eventuais colisões com a estrutura exterior do carrinho
2	Proteger o técncio contra eventuais colisões com as prateleiras com corrediças
3	Proteger o técncio eventuais lesões nos dedos durante a arrumação das ferramentas
4	Proteger o técnico contra a possibilidade de ser atingido por um carrinho descontrolado
	Parâmetros de Projeto
	Análise de possíveis situações capazes de causar dano físico a um técnico
1	Utilização de proteções de espuma nas arestas da estrutura do carrinho
2	Utilização de trancas nas prateleiras com corrediças
3	Utiização de uma distância mínima de 20 mm entre ferramentas manipuladas manualmente
4	Utilização de travões nas rodas da frente

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{53}.

- FR_{531}: Como a estrutura do carrinho é composta por arestas vivas e é feita em aço, é necessário revestir estas arestas com um material de proteção maleável.
- DP_{531}: Para diminuir o impacto de uma colisão, colocam-se proteções de espuma na estrutura do carrinho que irão absorver a força e diminuir a possibilidade de danos físicos no técnico.
- FR_{532}: As prateleiras com corrediças podem sair de posição caso não sejam travadas. Para prevenir danos físico no técnico, colocam-se trancas na prateleira para a manter na mesma posição durante o transporte do carrinho.
- DP_{532}: As trancas nas prateleiras com corrediças impedem que as mesmas desloquem autonomamente em consequência do movimento do carrinho, satisfazendo assim o FR_{532}.
- FR_{533}: As peças manipuladas manualmente requerem uma distância mínima entre elas, de forma a ser possível posicionar a peça sem existir o risco de entalar os dedos, por exemplo
- DP_{533}: A distância de segurança entre ferramentas para a proteção dos dedos é de 20 mm, dado que a espessura média dos dedos é 10 mm.

- FR_{534}: Um carrinho pode ter um peso até 700 kg. Este facto faz com que o impacto de um carrinho em movimento descontrolado possa resultar em graves danos, tanto humanos como materiais.

- DP_{534}: Para evitar que movimentos descontrolados do carrinho, colocam-se travões nas duas rodas frontais a serem acionados durante as operações de manutenção.

3.2.28.2 Matriz de projeto

Os elementos da matriz de projeto são apresentados seguidamente.

$$\begin{Bmatrix} FR_{531} \\ FR_{532} \\ FR_{533} \\ FR_{534} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{531} \\ DP_{532} \\ DP_{533} \\ DP_{534} \end{Bmatrix} \tag{3.27}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Cada elemento da matriz de projeto corresponde à forma de proteger um técnico de situações diferentes, não havendo assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.29 Terceiro nível de decomposição para o sistema de proteção de dano físico(DP_{61})

3.2.29.1 Descrição dos FRs e dos DPs

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.29 apresenta a decomposição do sistema de proteção de dano físico.

Tabela 3.29: Decomposição de $FR_{6.1}$ e de $DP_{6.1}$

	Requisitos Funcionais
	Proteger as ferramentas contra danos
1	Projetar a prateleira de forma a suportar o peso de todas ferramentas
2	Posicionar as ferramentas de forma a não serem danificadas por objetos exteriores
3	Posicionar as ferramentas manipuladas pelo cadernal a pelo menos 70 mm de distância entre elas
4	Posicionar as ferramentas manipuladas manualmente a pelo menos 50 mm de distância entre elas
5	Proteger os locais de arrumação das ferramentas
	Parâmetros de Projeto
	Sistema de proteção de dano físico
1	Prateleiras com 20 mm de espessura
2	Distância de 30 mm entre a ferramenta e a borda do carrinho
3	Estudo do *layout* das ferramentas manipuladas pelo cadernal
4	Estudo do *layout* das ferramentas manipuladas manualmente
5	Utilização de *shadowboxes* revestidas de espuma

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{61}.

- FR_{611}: É importante certificar que as prateleiras têm resistência estrutural suficiente para o armazenamento das ferramentas, nomeadamente se são capazes de sustentar o peso destas.

- DP_{611}: Determinou-se através da análise estrutural que uma espessura na prateleira de 20 mm confere resistência estrutural suficiente para sustentar o peso das ferramentas da prateleira de cima (situação onde é exercido maior peso).

- FR_{612}: Durante o transporte do carrinho, existe o risco de as ferramentas embaterem em objetos exteriores que se encontram na oficina e assim serem danificadas. Para evitar esta situação, colocam-se as ferramentas a alguma distância da borda de forma a estarem mais protegidas de eventuais embates.

- DP_{612}: Uma distância de 30 mm entre as ferramentas e a borda do carrinho fornece uma distância suficientemente segura e que, simultaneamente, não exija muito espaço não utilizado no carrinho.

- FR_{613}: A utilização do cadernal resulta em alguma oscilação das ferramentas posicionadas nas *shadowboxes*. Para que uma ferramenta não bata noutra, podendo levar ao dano físico das mesmas, é criado um espaçamento de 70 mm entre elas.

- DP_{613}: Para ser possível posicionar as ferramentas que precisam de cadernal na prateleira do carrinho com um espaçamento de 70 mm é importante estudar o seu *layout* de forma determinar o posicionamento que melhor aproveite o espaço disponível na prateleira.

- FR_{614}: Embora manipulação manual das ferramentas seja mais precisa que a manipulação com cadernal, para segurança do técnico e para evitar danos nas ferramentas, define-se uma distância de pelo menos 50 mm entre elas. Esta distância é suficiente para diminuir o risco de contacto das ferramentas, mesmo as que são inclinadas para a sua retirada.

- DP_{614}: Para satisfazer o FR_{614} é necessário estudar o *layout* das ferramentas que são manipuladas manualmente, de forma a determinar a sua posição na prateleira a uma distância mínima de 50 mm das outras e, em simultâneo, otimizar o *footprint* total do carrinho.

- FR_{615}: As prateleiras são fabricadas com um material rígido por motivos estruturais. Para diminuir o risco embate com a ferramenta nesse material, reveste-se os locais de arrumação com um material maleável.

- DP_{615}: Para satisfazer o FR_{615}, reveste-se as *shadowboxes* com espuma.

3.2.29.2 Matriz de projeto

A equação 3.28 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{611} \\ FR_{612} \\ FR_{613} \\ FR_{614} \\ FR_{615} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{611} \\ DP_{612} \\ DP_{613} \\ DP_{614} \\ DP_{615} \end{Bmatrix} \tag{3.28}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Cada elemento da matriz de projeto corresponde à forma de proteger ferramentas de situações diferentes, não havendo assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.30 Terceiro nível de decomposição para o sistema de proteção de ferramentas contra pó e corrosão(DP_{62})

No âmbito do terceiro nível de decomposição, a Tabela 3.30 apresenta a decomposição do sistema de ferramentas contra pó e corrosão.

Tabela 3.30: Decomposição de $FR_{6.2}$ e de $DP_{6.2}$

	Requisitos Funcionais
	Manter as ferramentas no estado de qualidade atual
1	Projetar as prateleiras de um material que não absorva o óleo das ferramentas
2	Colocar uma proteção removível contra a acumulação de pó
3	Certificar que as ferramentas mantêm uma camada de óleo de proteção
	Parâmetros de Projeto
	Sistema de proteção de ferramentas contra pó e corrosão
1	Prateleiras de teflon
2	Capa de proteção
3	Sistema de aplicação de óleo após utilização da ferramenta

Apresenta-se de seguida uma breve caracterização dos FRs e DPs identificados no terceiro nível do DP_{62}.

- FR_{621}: O óleo de conservação protege as ferramentas da corrosão e mantém as suas peças lubrificadas. É importante colocar as ferramentas numa superfície não absorvente de forma a que o óleo se mantenha na ferramenta.
- DP_{621}: O *teflon* não absorve o óleo e é um material com elevada resistência química.não sendo assim corroído pelo óleo de proteção.
- FR_{622}: A acumulação de partículas de pó pode levar ao mau funcionamento das ferramentas e consequentemente a um ciclo de vida mais curto. O pó prejudica o movimento de partes móveis, aumentando o atrito. Com o aumento da força necessária à utilização da ferramenta, as partes mais sensíveis são danificadas. Por esta razão é preciso prevenir a acumulação de pó na ferramenta.

- DP_{622}: Para satisfazer o FR_{622} coloca-se uma capa de proteção por cima do carrinho. Esta capa deve envolver as ferramentas posicionadas na prateleira de cima.

- FR_{623}: Durante a utilização da ferramenta na secção dos subconjuntos móveis, a camada de óleo aplicada na superfície da ferramenta diminui. Para garantir a existência de uma camada de óleo durante o armazenamento de uma ferramenta, é necessário avaliar após cada utilização se é preciso fazer um novo revestimento.

- DP_{623}: Para satisfazer o FR_{623} é criado um procedimento de verificação da espessura da camada de óleo no final da utilização de cada ferramenta.

3.2.30.1 Matriz de projeto

A equação 3.29 apresenta a matriz de projeto do primeiro nível de decomposição.

$$\begin{Bmatrix} FR_{621} \\ FR_{622} \\ FR_{623} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{621} \\ DP_{622} \\ DP_{623} \end{Bmatrix} \tag{3.29}$$

Esta matriz é diagonal, correspondendo à melhor matriz para um projeto. Nesta matriz cada DP satisfaz um só FR, tendo assim, um carácter modular.

Cada elemento da matriz de projeto corresponde a diferentes ações de manutenção de ferramentas, não havendo assim nenhuma restrição entre eles.

3.2.31 Representação gráfica da arquitetura do sistema

A arquitetura do sistema para o carrinho de ferramentas do módulo principal do *Core* do LEAP-1A está representada na Figura 3.2. Este esquema apresenta a arquitetura do sistema com 3 níveis de decomposição. Através deste fluxograma é possível identificar as dependências entre parâmetros de projetos, sem ser necessário recorrer às matrizes de projeto.

No fluxograma, os retângulos maiores que envolvem os outros retângulos, representam o primeiro nível de decomposições. Os retângulos mais pequenos representam o segundo nível de decomposições. As circunferências com "C" significam o seguinte: uma mudança no elemento que vai para "C" afeta a decomposição do elemento que parte de "C". As circunferências com "S" representam a conclusão do sistema daquela decomposição específica. As circunferências com um "F" correspondem ao elo entre dois elementos acoplados entre si.

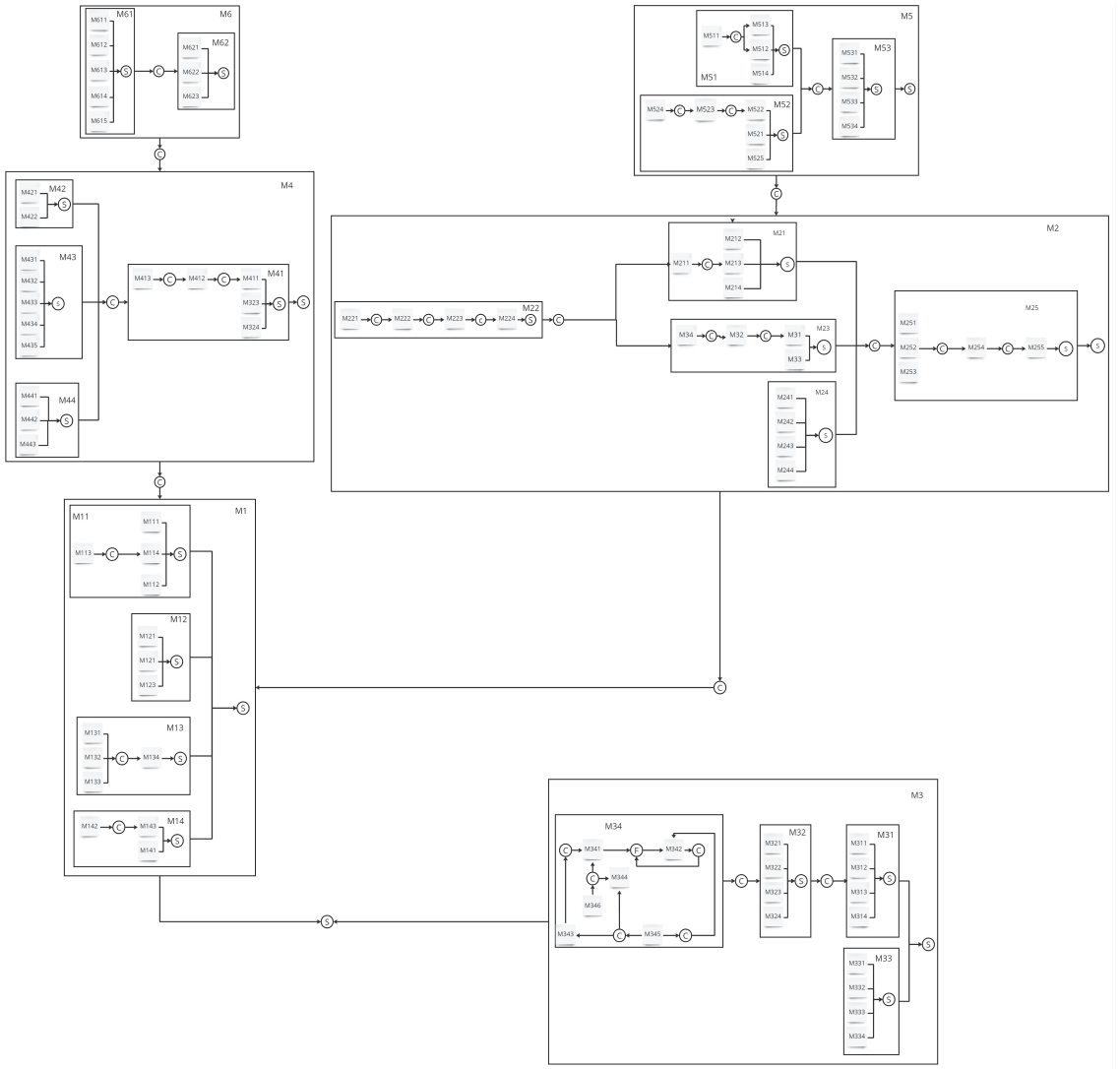


Figura 3.2: Fluxograma do projeto do carrinho *Kit Core* com a identificação dos 3 níveis de decomposição

Na Figura 3.2, na parte superior estão representadas os aspetos não acoplados do projeto: M5 (Métodos de higiene e segurança no trabalho) e M6 (Sistema de proteção de ferramentas). Os elementos representados em seguida no fluxograma são o M4 (Metodologia de otimização de layout) que é dependente do M6, e o M2 (Análise de diferentes tarefas e tempos de utilização) que é dependente do M5. Seguidamente, é apresentado o M1 (Análise de risco e falhas das ferramentas) que é dependente do M2 e do M4. Finalmente, é apresentado o último elemento, que é o M3 (Parâmetros de arrumação oficinal) o qual é dependente do M1.

A Figura 3.3 apresenta uma forma alternativa de representação da arquitetura do projeto na sua totalidade, focando os domínios funcionais e físicos. No entanto, só são apresentados o primeiro nível de decomposição, pois não seria de leitura fácil a apresentação dos três níveis numa folha A4.

É de referir que, embora num determinado nível se possa considerar haver independência entre FRs e DPs, não significa que não se possa verificar alguma forma de depedência num nível de maior detalhe, ou que as influências não possam ser desprezadas.

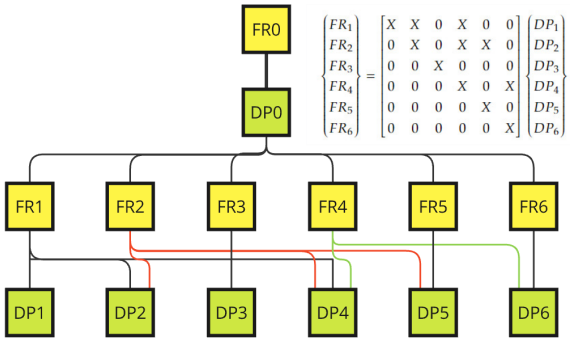


Figura 3.3: Primeiros 2 níveis do processo de decomposição axiomática do carrinho de ferramentas (DP0)

As Figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 representam as decomposições do segundo e terceiro níveis referentes a cada um dos 6 parâmetros de projeto indentificados no primeiro nível.

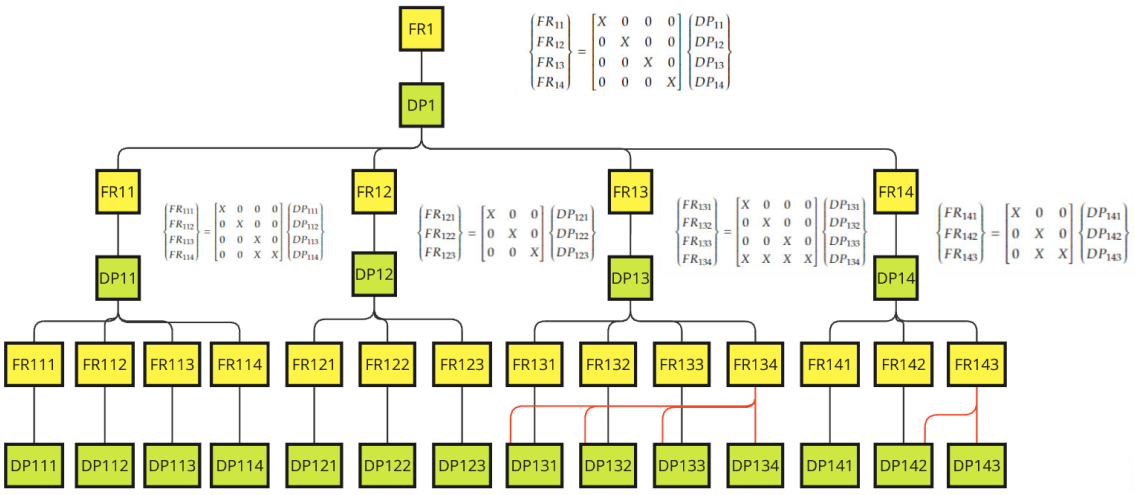


Figura 3.4: Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente à análise de risco e falhas das ferramentas (DP1)

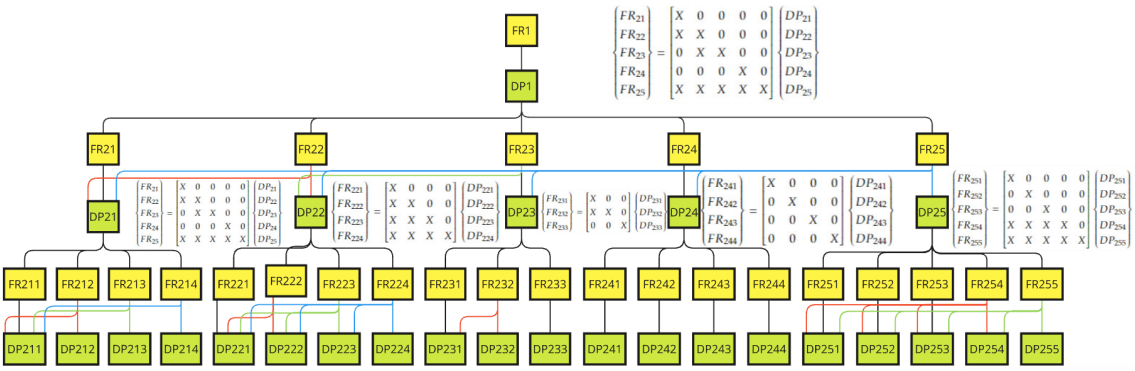


Figura 3.5: Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente à análise de diferentes tarefas e tempos de utilização (DP2)

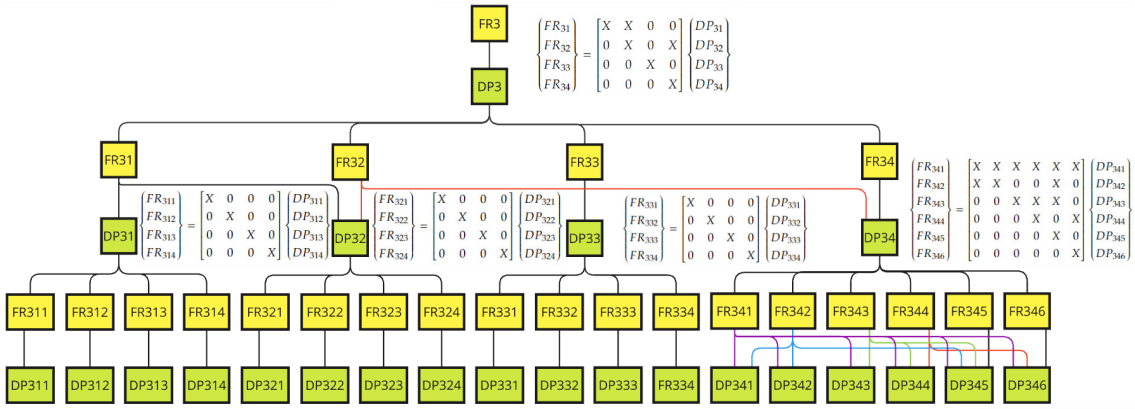


Figura 3.6: Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente aos parâmetros de arrumação oficinal (DP3)

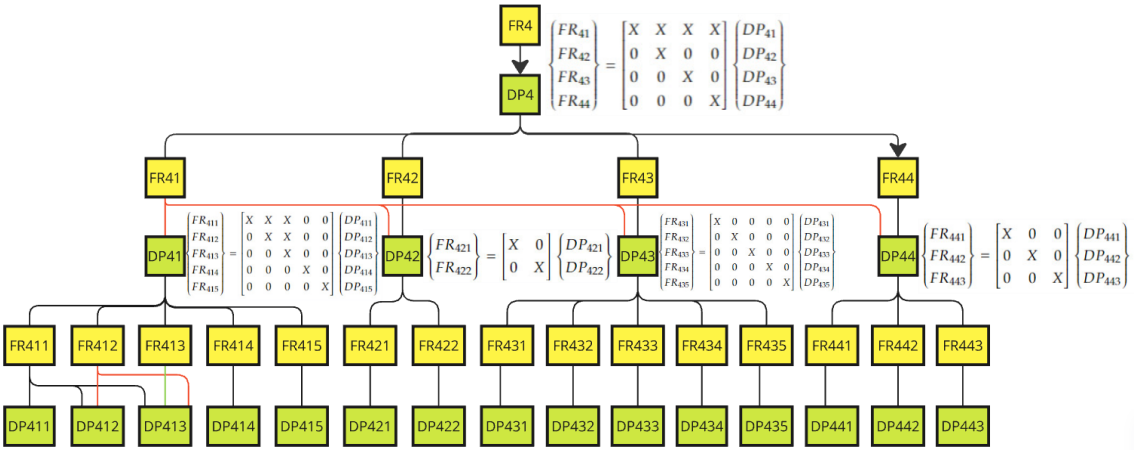


Figura 3.7: Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente à metodologia de otimização de *layout* (DP4)

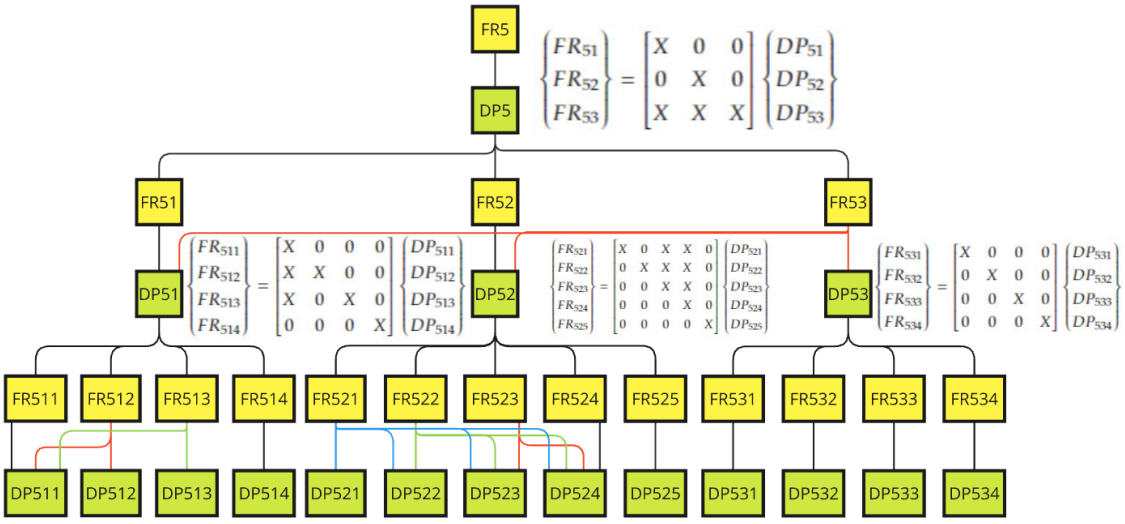


Figura 3.8: Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente aos métodos de higiene e segurança no trabalho (DP5)

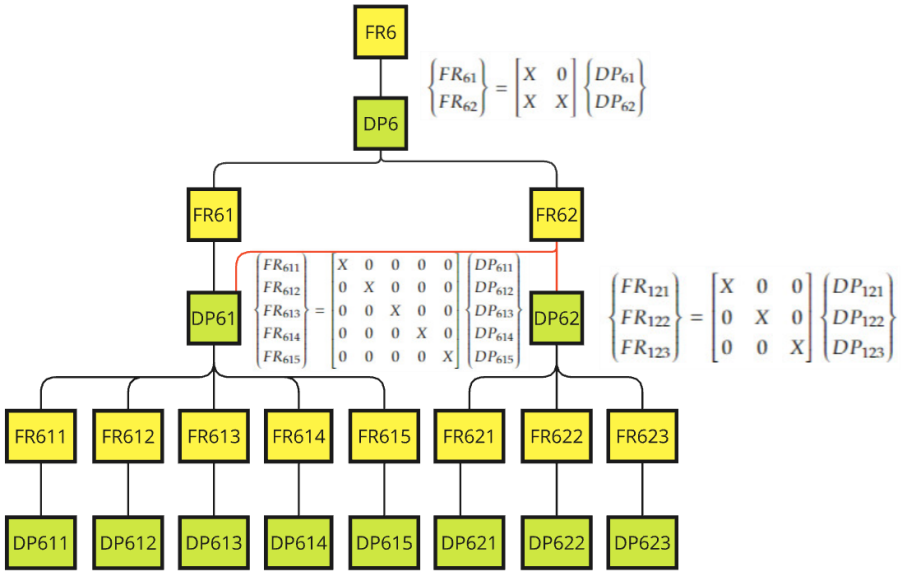


Figura 3.9: Processo de decomposição axiomática do segundo e terceiro nível referente ao sistema de proteção de ferramentas (DP6)

4

Análise estrutural para o dimensionamento do *kit Core*

4.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a análise estrutural para o *kit Core*. O dimensionamento dos materiais e dos perfis e o cálculo dos esforços são feitos analiticamente, sendo verificada a sua validade através de uma simulação no programa *SolidWorks*.

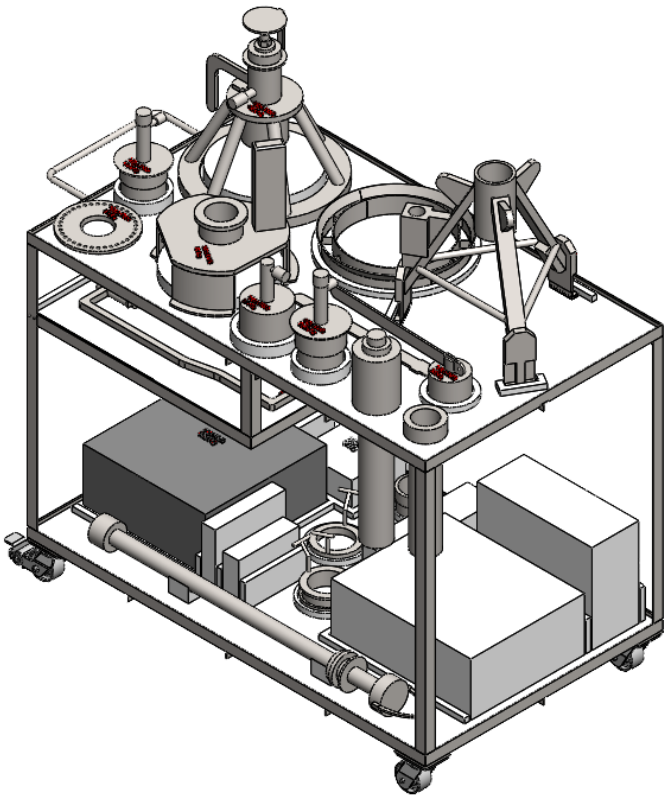


Figura 4.1: Representação gráfica da configuração do *Kit Core*

4.2 Materiais escolhidos

O material selecionado para a estrutura do carrinho é o aço estrutural S355 J2. O S355 é um tipo de aço de construção sem liga, de média resistência e baixo teor de carbono (Tabela 4.1), facilmente soldável e é resistente ao impacto. Estas características possibilitam a manufatura do carrinho nas instalações da TAP e conferem durabilidade ao mesmo. Existem perfis compostos por este aço no armazém de metais ferrosos da TAP, o que é uma vantagem em termos de sustentabilidade económica e ambiental desta solução.

Tabela 4.1: Composição química do aço S355 [22]

Elemento	%
Carbono (C)	$\leq 0,22$
Manganês (Mn)	$\leq 1,60$
Fósforo (P)	$\leq 0,05$
Enxofre (S)	$\leq 0,05$
Sílica (Si)	$\leq 0,05$

A Tabela 4.2 apresenta valores das propriedades mecânicas do aço S355 usados para o cálculo da estabilidade estrutural do carrinho.

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas do aço S355 [23]

Propriedade	Valor
Massa específica (ρ)	7850 kg/m^3
Módulo de elasticidade (E)	210000 MPa
Módulo de elasticidade transversal (G)	81000 MPa
Tensão de cedência (σ_c)	355 MPa
Tensão de fratura (σ_f)	490 MPa
Coeficiente de Poisson (μ)	0,3
Coeficiente de expansão térmica (α)	$12 \times 10^{-6} K^{-1}$

Para a construção das prateleiras será utilizado Politetrafluoretileno (PTFE), também conhecido como *teflon*. A escolha deste polímero baseia-se nas seguintes características[24]:

- facilmente maquinável, visto ter um módulo de elasticidade e dureza baixos;
- elevada resistência química, não sendo corroído pelo óleo de motor nem por querosene;
- resistente a uma amplitude térmica elevada (-200 °C a 260 °C). Isto é importante pois no processo de desmontagem recorre-se à utilização de azoto líquido que chega aos -196 °C e no processo de montagem a *heat tool gun* chega aos 200 °C;
- massa específica mais baixa que o aço, possibilitando a redução do peso total do carrinho e, assim, aumentar o número de ferramentas armazenadas no *kit*;

Teflon apresenta com inconveniente o facto de ser um material dispendioso.

As propriedades mecânicas do PTFE consideradas na análise estrutural são apresentadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Propriedades mecânicas do *teflon* [25]

Propriedade	Valor
Massa específica (ρ)	2300 kg/m^3
Módulo de elasticidade (E)	575 MPa
Tensão de cedência (σ_c)	40 MPa
Tensão de fratura (σ_f)	25,6 MPa
Coeficiente de Poisson (ν)	0,46
Coeficiente de expansão térmica (α)	151 $\times 10^{-6} C^{-1}$
Coeficiente de fricção estática (μ_e)	0,0524

Para a construção do carrinho, além da soldadura são utilizadas outro tipo de ligações: as ligações aparafusadas. Na análise estrutural, considera-se que os parafusos são feitos em AISI 304 para motivos de cálculo, que é um aço austenítico inoxidável com uma tensão de cedência de 540 MPa [26]. Este aço é também selecionado para a corrediça.

Finalmente, o material considerado para as trancas da prateleira do meio e as rodas do carrinho é o polipropileno.

4.3 Perfis usados

No projeto do carrinho, são considerados os seguintes 4 perfis de aço estrutural:

- Cantoneira de abas iguais, para apoio horizontal das prateleiras e para utilização nos pés do carrinho;
- Barra de ferro em T, para apoio horizontal das prateleiras. Com a utilização de barras de ferro em T consegue-se diminuir o valor da flecha máxima da prateleira;
- Tubo estrutural redondo, para as pegas que serão utilizadas na condução do carrinho;
- Barra rectangular, que funciona como elemento de união entre as rodas e o resto da estrutura.

As informações relativas a estes perfis foram retiradas do catálogo da empresa CHAGAS[27]. Os estudos da integridade estrutural do carrinho limitam-se aos perfis de cantoneira de abas iguais e da barra de ferro em T, representados na Figura 4.2, porque os restantes perfis não desempenham funções estruturais.

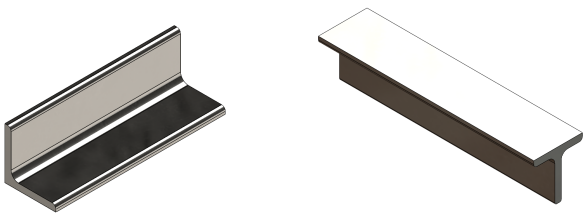


Figura 4.2: Desenho 3D em *SolidWorks* dos perfis cantoneira (esquerda) e barra em T (direita)

Para a cantoneira de abas iguais, considerou-se a geometria apresentada na Figura 4.3. Os valores das dimensões e da massa são apresentados na Tabela 4.4. A Tabela 4.5 apresenta os valores das variáveis dos momentos de inércia do perfil. Finalmente, a Figura 4.4 ilustra os momentos de inércia do perfil desta cantoneira.

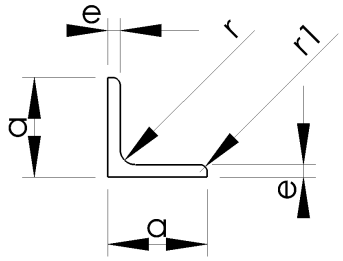


Figura 4.3: Geometria do perfil de cantoneira de abas iguais

Tabela 4.4: Dimensões e massa do perfil de cantoneira de abas iguais [27]

Dimensões				Massa
a (mm)	e (mm)	r (mm)	r1 (mm)	p (kg/m)
40	5	6	3	2,97

Tabela 4.5: Variáveis dos momentos de inércia do perfil de cantoneira de abas iguais [27]

Posição do centróide de área			Momentos de Inércia			Secção
d (cm)	V1 (cm)	Z1 (cm)	Ix=Iy (cm^4)	Iz (cm^4)	Iv (cm^4)	A (cm^2)
1,16	1,64	2,83	5,43	8,60	2,26	3,79

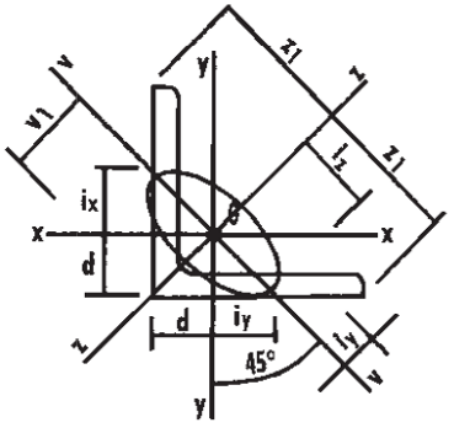


Figura 4.4: Momentos de inércia do perfil de cantoneira de abas iguais [27]

Para a barra em T, considerou-se a geometria apresentada na Figura 4.5. Os valores das dimensões e da massa são apresentados na Tabela 4.6. A Tabela 4.7 apresenta os valores das variáveis dos momentos de inércia do perfil. Finalmente, a Figura 4.6 ilustra os momentos de inércia do perfil desta cantoneira.

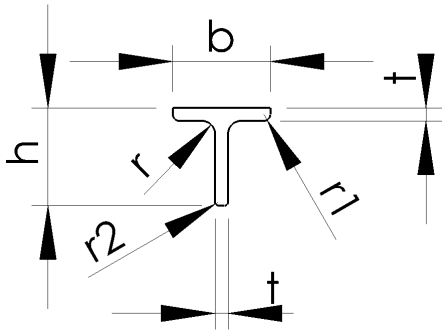


Figura 4.5: Geometria do perfil de barra em T

Tabela 4.6: Dimensões e massa do perfil de barra em T [27]

Dimensões						Massa
h (mm)	b (mm)	t (mm)	r (mm)	r1 (mm)	r2 (mm)	p (kg/m)
30	30	4	4	2	1	1,77

Tabela 4.7: Variáveis dos momentos de inércia do perfil de barra em T [27]

Posição do centróide de área	Momento de Inércia		Secção
ex (cm)	Ix (cm^4)	Iy (cm^4)	A (cm^2)
0,85	1,72	0,87	2,26

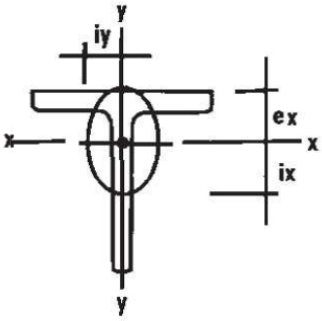


Figura 4.6: Momentos de inércia do perfil de barra em T [27]

4.4 Análise dos esforços na prateleira de cima

O conjunto da prateleira de cima é composto por uma prateleira de *teflon*, pelas ferramentas posicionadas na prateleira de cima, e por 4 perfis de cantoneira e 4 de barra em T que servem de apoio estrutural à prateleira de *teflon*. Seguidamente apresentam-se os cálculos para o peso total, flecha máxima e tensão máxima para esta prateleira. Refere-se que estes cálculos têm por pressuposto que os perfis em cantoneira de abas iguais não irão deformar.

4.4.1 Cálculo do peso

A Figura 4.7 apresenta a prateleira de *teflon* que irá ser instalada na parte superior do carrinho. Esta prateleira é composta por 8 *shadowboxes* e apresenta 2 furos para posicionamento de duas ferramentas com geometria cilíndrica.

A Tabela 4.8 apresenta os valores de massa das ferramentas armazenadas na prateleira de cima e das respetivas *shadowboxes*. A informação sobre a massa das ferramentas foi retirada do manual ITEM. Para o cálculo da massa das *shadowboxes* foi considerado o valor de volume fornecido pelo programa *SolidWorks* e, com recurso à densidade do PTFE, foi possível estimar a respetiva massa. Algumas ferramentas são transportadas desmontadas e, em certos casos, as partes podem estar colocadas em diferentes prateleiras. Na análise estrutural foi considerado individualmente o peso das partes específicas das ferramentas.

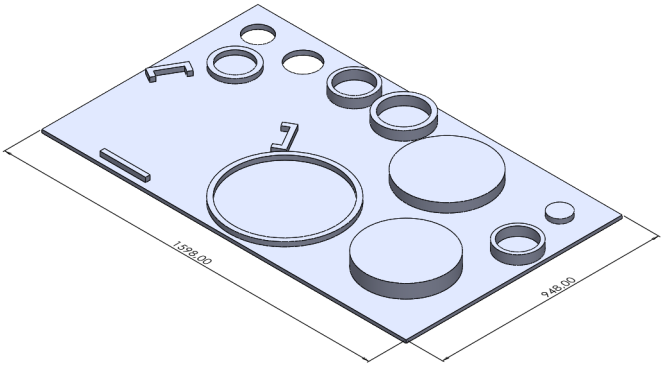


Figura 4.7: Prateleira de *teflon* do conjunto da prateleira de cima

Tabela 4.8: Valores calculados da massa das ferramentas e das suas respetivas *shadowboxes*

Objeto	Volume(mm^3)	Peso(kg)
956A1005	-	43,5
956A1005 SB	5772676,5	13,3
Guia	-	5,0
956A1050	-	10,5
956A1050 SB	292168,1	0,7
956A1063	-	4,2
956A1063 SB	127234,5	0,3
956A1033	-	16,0
956A1033 SB	4071504,0	9,4
956A1030	-	3,3
956A1030 SB	584336,2	1,3
956A1039	-	9,1
956A1039 SB	477522,0	1,1
956A1048	-	10,9
956A1048 SB	292168,1	0,7
956A1221	-	16
956A1221 SB1	120000,0	0,3
956A1221 SB2	96000,0	0,2
956A1002	-	2,6
956A1002 SB	194778,7	0,4
9429M14	-	4,6
956A1227	-	27,2
Total		180,5

c

4.4.2 Estudo da Resistência e Rigidez da prateleira de *teflon*

Na análise da deflexão da prateleira de *teflon* quando está sujeita aos esforços resultantes das condições de funcionamento normal foram consideradas as seguintes simplificações:

- A prateleira tem comportamentos estruturais de um elemento de viga;
- a prateleira é apoiada em apenas duas extremidades opostas (Tabela 4.9 - Carregamento);
- os furos da prateleira são ignorados;
- a carga suportada está uniformemente distribuída pela prateleira;
- os perfis em cantoneira de abas iguais não irão deformar;
- os carregamentos foram considerados como sendo aplicados como estáticos e não foram considerados esforços dinâmicos, ou de impacto de quedas das peças sobre a prateleira.

A consideração de elementos estruturais de um elemento de tipo viga permite calcular a flecha máxima da prateleira. Dado que as ferramentas estão distribuídas pela prateleira toda e a prateleira encontra-se apoiada sem estar encastrada aos perfis do tipo de cantoneiras, o tipo de carregamento selecionado que a prateleira sofre é apresentado na Figura 4.8.

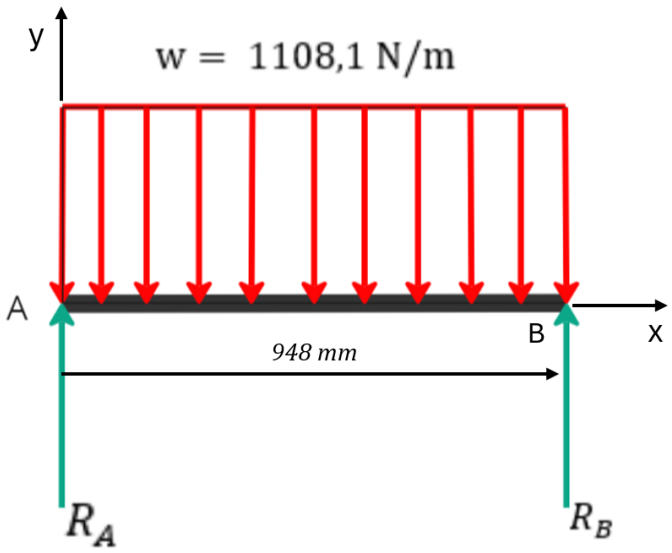


Figura 4.8: Diagrama de corpo livre da prateleira de *teflon* de cima

Existem dois sentidos de flexão possíveis para a prateleira: no sentido do comprimento ou no sentido da largura. Selecionou-se o estudo da flexão no sentido da largura porque ao estabelecer limites para esta deformação está-se a condicionar a deflexão no limite do comprimento, que seria a mais gravosa. Para o cálculo da flecha máxima assumiu-se que

os lados da prateleira apoiados na estrutura são os do comprimento, sendo a distância entre apoios (L) igual a 948 mm.

De acordo com a Tabela 4.8, a prateleira suporta uma massa de até 180,5 kg. O carregamento uniformemente distribuído no comprimento da viga (w) é calculado através da equação 4.1.

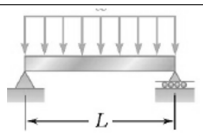
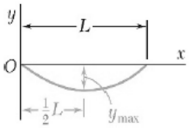
$$w = \frac{F}{L} = \frac{m \times g}{L} = \frac{180,5 \times 9,81}{0,948} = 1867,8\ N/m \tag{4.1}$$

Visto existirem dois esforços de reação, o valor de cada esforço é calculado através da equação 4.2.

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} = \frac{m \times g}{2} = \frac{180,5 \times 9,81}{2} = 885,4\ N \tag{4.2}$$

Esta equação resulta das equações de equilíbrio de forças e de momentos da estática, para o caso particular de um problema simétrico relativamente aos apoios.

Tabela 4.9: Carregamento e respetiva flecha máxima da prateleira de *teflon* de cima [28]

Carregamento	Linha Elástica	Flecha Máxima
		$-\frac{5\omega L^4}{384EI}$

A flecha máxima da prateleira (f) é apresentada na equação 4.3.

$$f = \frac{5wL^4}{384EI} \tag{4.3}$$

em que,
E — módulo de elasticidade, sendo igual a 575 MPa (Tabela 4.3)
I — "momento de inércia"ou momento de segunda ordem da área da secção transversal da viga, calculado relativamente à direcção perpendicular ao plano de curvatura da viga, sendo calculado na equação 4.4

$$I_z = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{1598 \times 20^3}{12} = 1065333,3\ mm^4 \tag{4.4}$$

em que,
b — comprimento da prateleira
h — altura da prateleira

A flecha máxima calculada para a prateleira de *teflon* é igual a 32 mm, sendo o seu cálculo apresentado na equação seguinte,

$$f = \frac{5 \times 1867,8 \times (0,948)^4}{384 \times (575 \times 10^6) \times (1065333,3 \times 10^{-12})} = 0,032\ m = 32\ mm \tag{4.5}$$

Este valor da deflexão exige a utilização de perfis em T para sustentar a prateleira, diminuindo a sua deflexão.

4.4.3 Estudo da Resistência e Rigidez do suporte de perfis em T da prateleira

A colocação de perfis em T tanto no sentido do comprimento como da largura do carrinho permite suportar a prateleira de cima e as suas respetivas ferramentas, tal como apresentado na Figura 4.9.

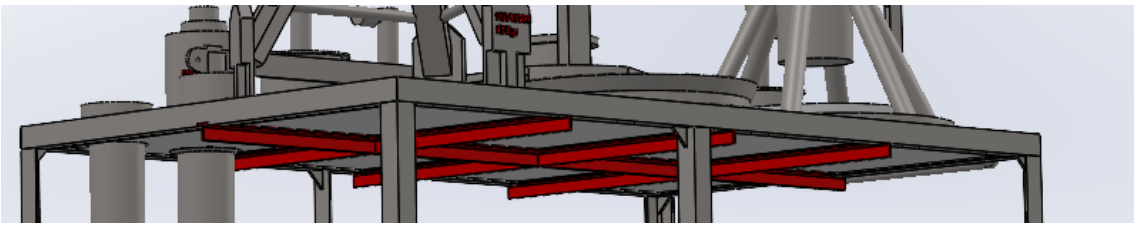


Figura 4.9: Vista dos perfis de barra em T que suportam a prateleira de *teflon* de cima (assinaladas a vermelho)

Como pode ser observado na Figura anterior, a prateleira é suportada por um perfil com a dimensão do comprimento e 6 perfis com dimensão correspondente metade da largura. Para efeitos de cálculo será analisada a flecha máxima de um perfil em T com a distância entre apoios igual à largura da prateleira de cima. O tipo de carregamento aplicado é idêntico ao da prateleira de *teflon* e é apresentado na Figura 4.10.

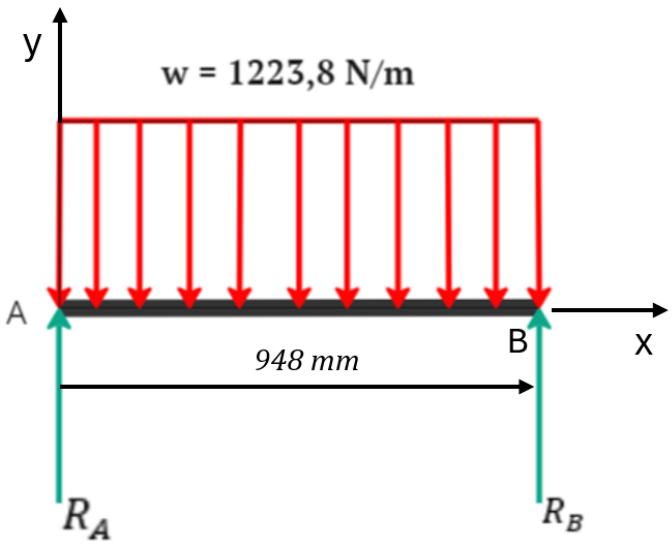


Figura 4.10: Diagrama de corpo livre do perfil de barra em T no conjunto da prateleira de cima

Neste caso, o peso suportado pela viga é o das ferramentas e das respetivas *shadowboxes* adicionado ao peso da prateleira de *teflon*, tal como apresentado na equação 4.6.

$$m_{total} = m + m_{Prateleira} = 180,5 + 69 = 249,5\ kg \tag{4.6}$$

em que,
m_{total} — massa da prateleira de *teflon*, das ferramentas e das suas respetivas *shadowboxes*
$m_{Prateleira}$ — massa da prateleira de *teflon*, sendo calculada na equação 4.7
m — massa total das ferramentas

$$m_{Prateleira} = V \times \rho = 0,948 \times 1,598 \times 0,02 \times 2300 = 69\ kg \tag{4.7}$$

em que,
ρ — densidade do *teflon* (Tabela 4.3)
V — volume da prateleira de *teflon*

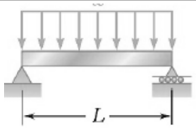
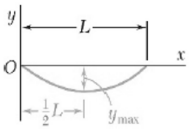
Assim, a carga distribuída é calculada na equação 4.8.

$$w = \frac{F}{L} = \frac{m_{total} \times g}{L} = \frac{249,5 \times 9,81}{0,948} = 2581,9\ N/m \tag{4.8}$$

Visto existirem dois esforços de reação, o valor de cada esforço é calculado através da equação 4.9.

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} = \frac{m \times g}{2} = \frac{249,5 \times 9,81}{2} = 1223,8\ N \tag{4.9}$$

Tabela 4.10: Carregamento e respetiva flecha máxima do perfil de barra em T [28]

Carregamento	Linha Elástica	Flecha Máxima
		$-\frac{5\omega L^4}{384EI}$

A flecha máxima da prateleira é calculada através da equação 4.3, sendo igual a 8 mm (tal como se apresenta de seguida).

Neste caso, o momento de inércia (I) será multiplicado por 3 para simular os 3 perfis em T que suportam a placa de *teflon* no sentido da largura.

$$f = \frac{5 \times 2581,9 \times (0,948)^4}{384 \times (210000 \times 10^6) \times (3 \times 1,72 \times 10^{-8})} = 0,0029\ m = 2,9\ mm \tag{4.10}$$

Seguidamente, é necessário calcular a tensão máxima a que os perfis estão sujeitos e comparar à tensão de cedência do material dos perfis, sendo esta 355 MPa.

O cálculo da tensão máxima (σ_{max}) a que os perfis estão sujeitos é apresentada na equação 4.11 [29].

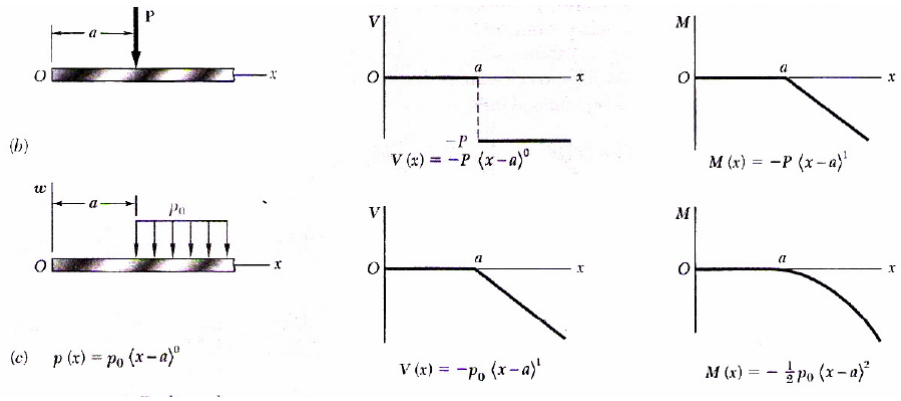
$$\sigma_{max} = \frac{-M_Z}{I} \times y \tag{4.11}$$

em que,
M_Z — momento fletor, sendo calculado na equação 4.12 a partir das fórmulas dadas na Tabela 4.11
y — distância dos pontos da área da secção transversal da viga ao plano neutro da flexão.

Como não existe existe carregamento axial, o plano neutro de flexão inclui o centroide da área da secção transversal da viga. Logo, y é calculada pela seguinte equação, os valores foram retirados do catálogo CHAGAS [27]:

$$y = 30 - 8,5 = 21,5mm \tag{4.12}$$

Tabela 4.11: Momento fletor e esforço transverso causados pelo carregamento de carga distribuída [30]



O ponto com maior deflexão é o ponto do meio da barra, x=474 mm.

$$M_Z = -\frac{1}{2}w[x]^2 + R_A[x]^1 + R_B[x-0,948]^1 = -\frac{1}{2}\times 2581,9[0,474]^2 + 1223,8[0,474] = 290\ Nm \tag{4.13}$$

Logo,

$$\sigma_{max} = \frac{-290}{3\times 1.72\times 10^{-8}} \times 21,5\times 10^{-3} = -120,83\ MPa \tag{4.14}$$

Como a tensão de cedência do aço estrutural S355 é 355 MPa, o perfil em T está no regime elástico da deformação e o fator de segurança é de 2,94.

4.5 Análise dos esforços na prateleira do meio

Não são utilizadas na prateleira do meio é deslizante para uma maior facilidade de acesso às ferramentas. Neste caso é necessário avaliar as duas posições em que ela pode estar: recolhida ou para fora.

4.5.1 Cálculo do peso

Não são utilizadas *shadowboxes* na prateleira do meio. Neste caso a única força exercida na prateleira é o peso das duas ferramentas que contém, as quais são apresentadas na Figura 4.12.

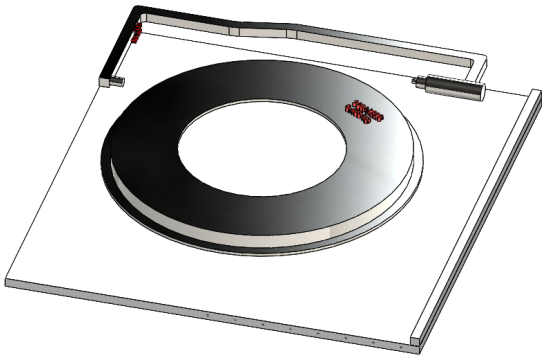


Figura 4.11: Prateleira de *teflon* do conjunto da prateleira do meio com as respetivas ferramentas

Os valores de massa total aplicada na prateleira são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.12: Pesos das ferramentas da prateleira do meio

Objeto	Volume(mm^3)	Peso(kg)
956A1225	-	0,5
956A1063	-	7,3
Total		7,8

O cálculo do peso exercido na prateleira do meio é feito de forma semelhante ao realizado para a prateleira de cima.

4.5.2 Estudo da Resistência e Rigidez da prateleira de teflon recolhida

Para a situação da prateleira recolhida, a análise é feita no sentido de avaliar se a prateleira tem integridade estrutural para suportar o peso das ferramentas.

Como a prateleira é apoiada em 3 perfis cantoneiras, o estudo da flecha máxima é feito na direção em que existem dois pontos de apoio. A forma como a prateleira está apoiada na posição recolhida é apresentada na Figura 4.12.

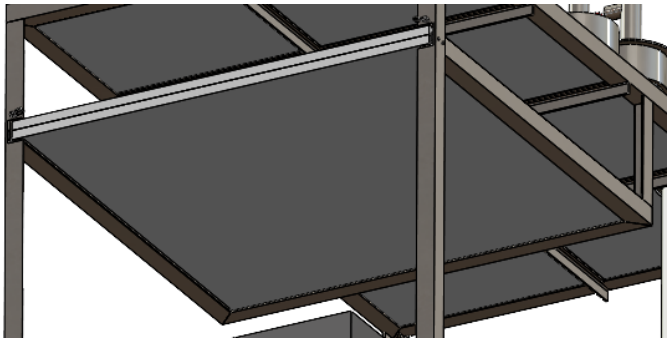


Figura 4.12: Vista dos perfis de cantoneira que suportam a prateleira de *teflon* do meio

A distância entre os dois pontos de apoio é equivalente à largura total da prateleira, ou seja, 932 mm.

Na análise da deflexão da prateleira de teflon quando está sujeita aos esforços resultantes das condições de funcionamento normal foram consideradas as seguintes simplificações:

- A prateleira tem comportamentos estruturais de um elemento de viga;
- a prateleira é apoiada apenas em duas extremidades opostas, tal como mostra o carregamento ilustrado na Figura 4.15;
- as ligações aparafusadas da prateleira às corrediças podem ser ignoradas;
- a carga que suporta está uniformemente distribuída pela prateleira.

O diagrama de corpo livre está representado na Figura 4.13.

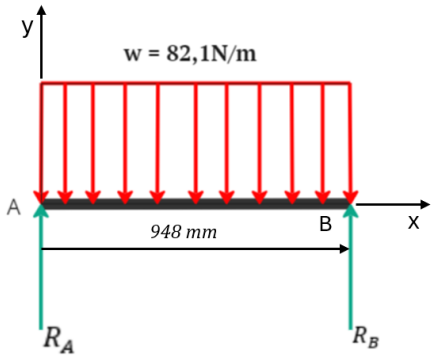


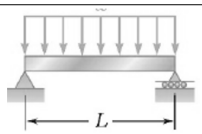
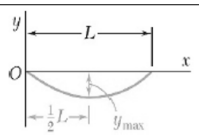
Figura 4.13: Diagrama de corpo livre do perfil da prateleira de *teflon* do meio

Assim sendo, visto haver dois esforços de reação, cada esforço irá exercer a força calculada na equação 4.16.

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} = \frac{m \times g}{2} = \frac{7,8 \times 9,81}{2} = 38,3\ N \tag{4.15}$$

A Tabela 4.13 ilustra o tipo de carregamento que a prateleira tem, tendo em consideração os pressupostos atrás apresentados.

Tabela 4.13: Carregamento e respetiva flecha máxima da prateleira de *teflon* do meio recolhida[28]

Carregamento	Linha Elástica	Flecha Máxima
		$-\frac{5\omega L^4}{384EI}$

De acordo com a Tabela 4.12, a prateleira suporta uma massa de 7,8 kg, logo a carga aplicada é de:

$$w = \frac{F}{L} = \frac{m \times g}{L} = \frac{7,8 \times 9,81}{0,932} = 82,1\ N/m \tag{4.16}$$

A flecha máxima (f) da prateleira é calculada através da equação 4.3, sendo considerado que $E = 575MPa$ (Tabela 4.3).

O momento de inércia é calculado pela equação 4.17, em que b é o comprimento da prateleira e que h é a altura desta:

$$I_z = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{900 \times 20^3}{12} = 600000\ mm^4 \tag{4.17}$$

Assim,

$$f = \frac{5 \times 82,1 \times (0,932)^4}{384 \times (575 \times 10^6) \times (600000 \times 10^{-12})} = 0,002\ m = 2\ mm \tag{4.18}$$

Como este valor é bastante inferior à flecha máxima de 8 mm, corresponde a um fator de segurança superior. Como este última é 2,5, garante-se que a prateleira de *teflon* do meio recolhida encontra-se no regime elástico da deformação.

4.5.3 Estudo da estabilidade com a prateleira de *teflon* estendida para fora

As corrediças permitem um deslocamento de 450 mm da prateleira para fora da estrutura do carrinho como apresentado na Figura 4.14.

Um dos riscos associados à colocação da prateleira para fora é alguém poder apoiar-se nesta. Assim, é necessário verificar que a prateleira não se deforma plasticamente numa situação destas.

Para efeitos de simplificação de análise, a corrediça é considerada como parte da prateleira de *Teflon*. Deste modo, a prateleira de *Teflon* será apoiada nos 4 parafusos que unem a mesma à estrutura do carrinho. A ligação aparafusada é apresentada na Figura 4.15.

Nesta análise, considera-se a situação de um técnico com 80 kg apoiar-se totalmente na prateleira (por exemplo, sentar-se). Assim, além da carga distribuída das ferramentas, considera-se que existirá uma carga pontual na extremidade de fora da prateleira, tal como

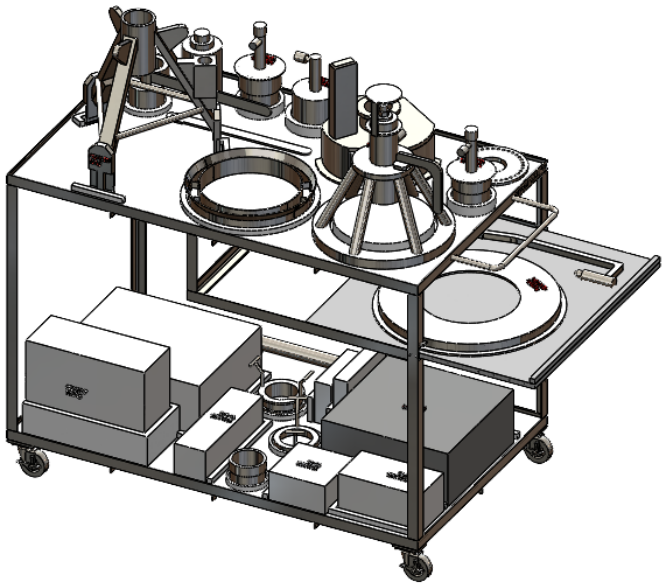


Figura 4.14: Vista do carrinho com a prateleira do meio para fora

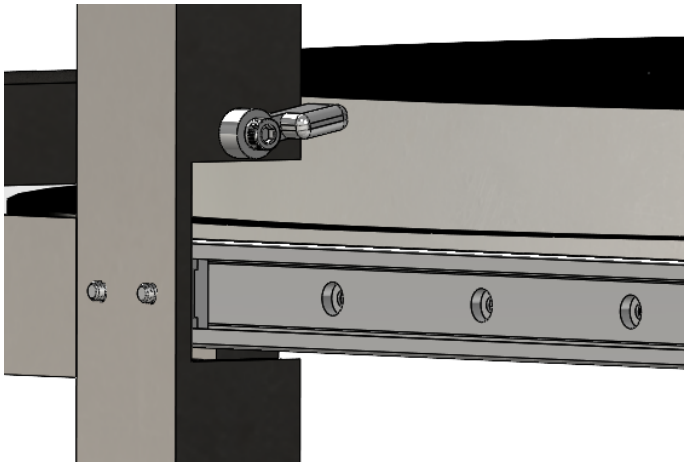


Figura 4.15: Corrediças da prateleira do meio e respetivos 2 parafusos de apoio (visíveis no lado esquerdo do desenho)

representado no diagrama de corpo livre da Figura 4.16. Os apoios são os dois parafusos que ligam à estrutura composta por cantoneiras e estão com as letras A e B.

A carga pontual é calculada pela equação 4.19 e a carga distribuída é calculada pela equação 4.20.

$$P = m_{tecnico} \times g = 80 \times 9,81 = 784,7\ N \tag{4.19}$$

$$w = \frac{F}{L} = \frac{m_{ferramentas} \times g}{L} = \frac{7,8 \times 9,81}{0,9} = 85\ N/m \tag{4.20}$$

Visto existirem dois esforços de reação, o valor de cada esforço é calculado através da equação 4.21.

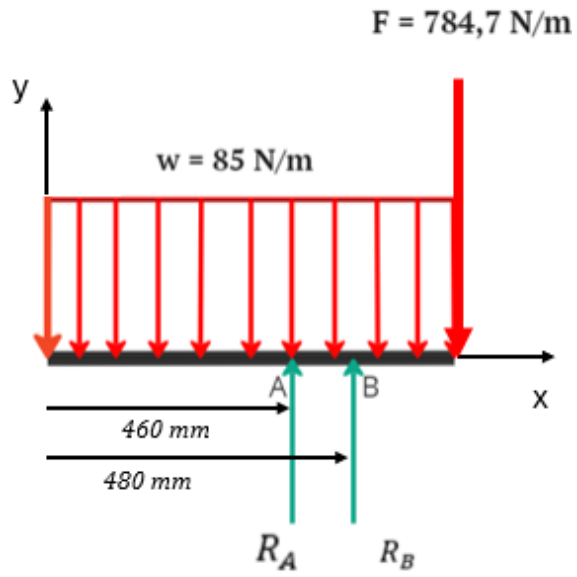


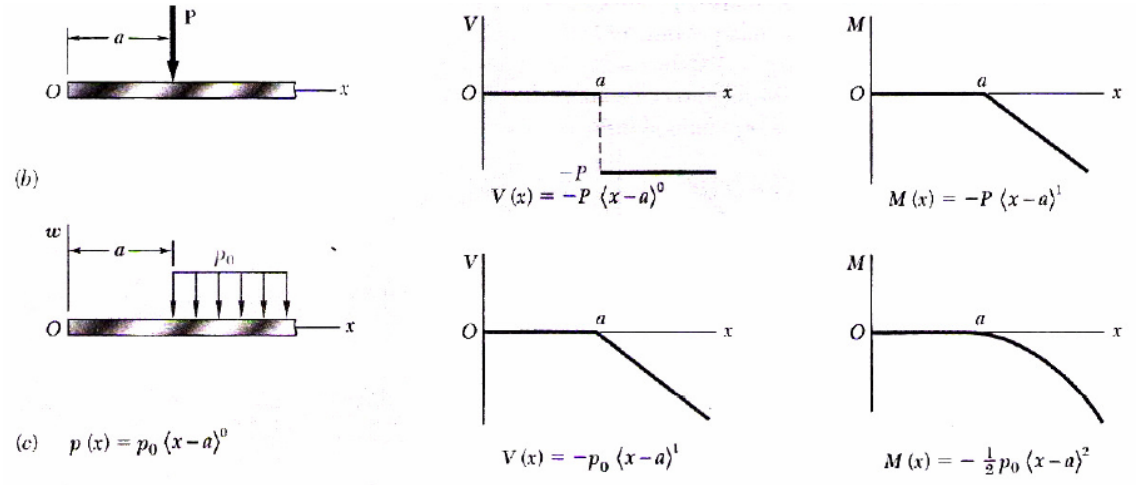
Figura 4.16: Diagrama de corpo livre do perfil da prateleira de *teflon* do meio para fora com a carga pontual de um técnico apoiado

$$R_a = R_b = \frac{P_{total}}{2} = \frac{m_{total} \times g}{2} = \frac{(m_{ferramentas} + m_{tecnico}) \times g}{2} = \frac{87,8 \times 9,81}{2} = 430,7\ N \tag{4.21}$$

Neste caso, a flecha máxima é analisada no sentido do comprimento da prateleira (900 mm), uma vez que o efeito do peso do técnico compromete a integridade estrutural neste sentido.

A Tabela 4.14 ilustra o tipo de carregamentos a que a prateleira está sujeita, assim como o cálculo do respetivo momento fletor.

Tabela 4.14: Momento fletor e esforço transverso causados pelos esforços presentes na prateleira do meio para fora [30]



A equação de singularidade para o momento fletor é apresentada na equação 4.22.

$$M(x) = -P[x-a]^1 - \frac{1}{2}w[x-a]^2 + R_a[x-a]^1 + R_b[x-a]^1 = -P[x]^1 - \frac{1}{2}w[x]^2 + R_a[x-0,46]^1 + R_b[x-0,48]^1 \tag{4.22}$$

Para o cálculo da flecha máxima integrou-se duas vezes a equação 4.22, como apresentado em baixo, pelas equações 4.23 e 4.24:

$$EI\frac{dy}{dx} = -\frac{P}{2}(x)^2 - \frac{1}{6}w(x)^3 + \frac{R_a}{2}(x-0,46)^2 + \frac{R_b}{2}(x-0,48)^2 + C_1 \tag{4.23}$$

$$EIy = -\frac{P}{6}(x)^3 - \frac{1}{24}w(x)^4 + \frac{R_a}{6}(x-0,46)^3 + \frac{R_b}{6}(x-0,48)^3 + C_1x + C_2 \tag{4.24}$$

Procede-se agora ao estudo das condições de fronteira. Na zona de apoio dos parafusos, não haverá deslocamento transversal, logo $y = 0$. Assim, as condições de fronteira são nas posições dos parafusos, $x = 460$ mm e $x = 480$ mm.

Para $x = 0,46 \implies y = 0$:

$$0 = -\frac{784,7}{6}(0,46)^3 - \frac{1}{24}\times 85\times(0,46)^4 + \frac{430,7}{6}(0)^3 + \frac{430,7}{6}(-0,02)^3 + C_1\times 0,46 + C_2 \Leftrightarrow 12,89 = C_1\times 0,46 + C_2 \tag{4.25}$$

Para $x = 0,48 \implies y = 0$:

$$0 = -\frac{784,7}{6}(0,48)^3 - \frac{1}{24}\times 85\times(0,48)^4 + \frac{430,7}{6}(0,02)^3 + \frac{430,7}{6}(0)^3 + C_1\times 0,48 + C_2 \Leftrightarrow 14,65 = C_1\times 0,48 + C_2 \tag{4.26}$$

Criando um sistema de equação para determinar as incógnitas C_1 e C_2:

$$\begin{cases} 12,89 = C_1 \times 0,46 + C_2 \Leftrightarrow C_1 = 88 \\ 14,65 = C_1 \times 0,48 + C_2 \Leftrightarrow C_2 = -27,83 \end{cases} . \tag{4.27}$$

Desta forma, o deslocamento transversal é dado pela equação 4.28.

$$EIy = -\frac{P}{6}(x)^3 - \frac{1}{24}w(x)^4 + 88 \times x - 27,83 \tag{4.28}$$

O ponto localizado mais fora da prateleira ($x = 0$) corresponde ao deslocamento transversal máximo (*i.e*, flecha máxima) originado tanto pelos esforços exercidos naquele ponto, como pela distância a que está dos apoios. A flecha máxima (f) da prateleira é calculada através da equação 4.3, sendo considerado que $E = 575$ MPa (Tabela 4.3).

$$f = \frac{27,83}{575 \times 10^6 \times (600000 \times\ 10^-12)} = 0,0807\ m = 80,7\ mm \tag{4.29}$$

O momento será máximo no ponto do primeiro parafuso ($x = 460$ mm) sendo calculado pela equação 4.22.

$$M(x) = -P[0,46]^1 - \frac{1}{2}w[0,46]^2 + R_A[0]^1 = \\ = -784,7 \times [0,46]^1 - \frac{1}{2} \times 85 \times [0,46]^2 = -370\ N.m \tag{4.30}$$

O momento de inércia para a prateleira de *teflon* do meio é calculada na equação 4.31, em que b corresponde à largura da prateleira e h corresponde à altura.

$$I_x = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{938 \times 20^3}{12} = 625333,3\ mm^4 \tag{4.31}$$

Pela equação 4.11, sendo o resultado apresentado na equação 4.32.

$$\sigma_{max} = \frac{-M_Z}{I} \times y = \frac{370}{625333,3 \times 10^{-12}} \times 80,7 \times 10^{-3} = 47,7\ MPa \tag{4.32}$$

Como a tensão máxima (47,4 MPa) é maior que a tensão de cedência do *teflon* (40 MPa, Tabela 4.3), a prateleira do meio irá deformar-se plasticamente na situação descrita anteriormente. Para evitar que esta situação aconteça, é necessário informar a equipa de produção para os riscos de se apoiarem na prateleira do meio enquanto estiver para fora. A deformação na realidade será menor, pois não foi contabilizado o efeito que as corrediças de metal têm na integridade estrutural da prateleira de *teflon*. A formação dos técnicos na utilização do carrinho permite evitar usar maior espessura na prateleira do meio, uma vez que não se espera a realização de usos inadequados, como apoiar-se nela.

4.5.4 Estudo da estabilidade do apoio vertical da prateleira de teflon

A cantoneira que serve de apoio vertical à prateleira do meio é tracionada pelo peso da própria prateleira. Assim, é necessário proceder ao estudo das tensões presentes no cordão de soldadura. Os cordões de soldadura são assinalados a vermelho na Figura 4.17.

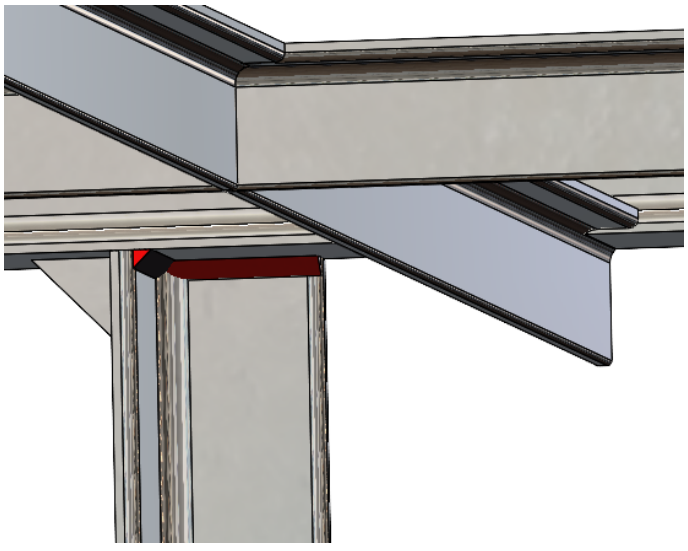


Figura 4.17: Representação dos cordões de soldadura

Assim, o peso total suportado pelas cantoneiras é:

$$P_{Total} = P_{Ferramentas} + P_{Prateleira} + P_{Corredica} + P_{Cantoneiras} = 7,8 + 38,6 + 0,2 + 9,4 = 56\ kg \tag{4.33}$$

O peso total das cantoneiras consiste na soma de 3 cantoneiras horizontais e 2 verticais, apresentado na equação 4.34 (nota: o peso das cantoneiras foi retirado do *Solidworks*).

$$P_{Cantoneiras} = 2 \times 2,6 + 2 \times 0,7 + 2,8 = 9,4\ kg \tag{4.34}$$

O peso total suportado pelas cantoneiras apresenta o valor de $m_{total} = 56\ kg$, que corresponde a uma força por cantoneira de $F = 56 \times 9,81 = 274,7\ N$. Não se considera que as cantoneiras horizontais estão soldadas ao resto da estrutura, sendo o peso total suportado pelas cantoneiras verticais.

Nesta situação, não existe momento. Assim, o carregamento a ser estudado é a força paralela a um dos catetos do cordão.

As intensidades das tensões correspondentes ao carregamento da força paralela aos catetos do cordão são obtidas através da equação 4.35.

$$\sigma = \tau = \frac{F}{h\Delta x} = \frac{274,7}{0,004 \times 0,08} = 0,86\ MPa \tag{4.35}$$

em que,
σ — tensão normal na zona crítica
τ — tensão de corte na zona crítica
Δx — comprimento do cordão
h — espessura do cordão

Para o caso em análise demonstrado na figura, a utilização do critério de Tresca permite obter a tensão de comparação, tal como apresentado na equação 4.36.

$$\sigma_{COM} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{0,86^2 + 4 \times 0,86^2} = 1,92\ MPa \tag{4.36}$$

Conclui-se assim, que a tensão à qual este cordão de soldadura está sujeito é bastante diminuta.

4.6 Análise dos esforços na prateleira de baixo

O conjunto da prateleira de baixo é composto por uma prateleira de *teflon*, pelas ferramentas nela posicionadas, por 4 perfis de cantoneira e 4 perfis de barra em T (que servem de apoio estrutural à prateleira de *teflon*). Seguidamente apresentam-se os cálculos para o peso total, flecha máxima e tensão máxima para esta prateleira. Refere-se que estes cálculos têm por pressuposto que os perfis em cantoneira de abas iguais não irão deformar.

4.6.1 Cálculo do peso

A Figura 4.18 apresenta a prateleira de *teflon* que irá ser instalada na parte inferior do carrinho. Esta é composta por 12 *shadowboxes*.

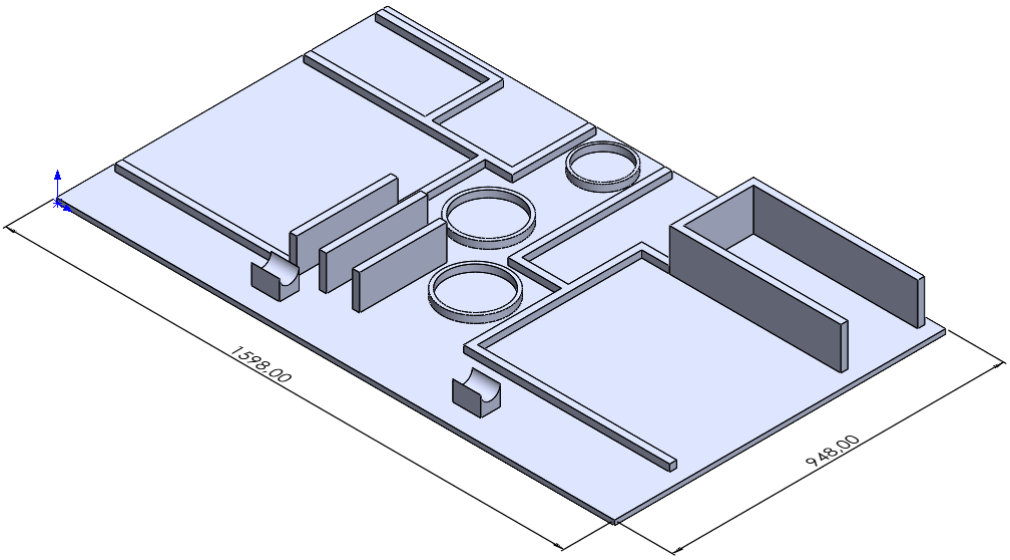


Figura 4.18: Prateleira de *teflon* do conjunto da prateleira de baixo

A Tabela 4.15 apresenta a massa das ferramentas armazenadas na prateleira de cima e das respetivas *shadowboxes*. A informação sobre a massa das ferramentas foi retirada do manual ITEM. Para o cálculo da massa das *shadowboxes* foi considerado o valor de volume fornecido pelo programa *SolidWorks* e, com recurso à densidade do PTFE, foi possível estimar a respetiva massa. Algumas ferramentas são transportadas desmontadas e, em certos casos, as partes podem estar colocadas em diferentes prateleiras. Na análise estrutural foi considerado individualmente o peso das partes específicas das ferramentas.

Tabela 4.15: Valores calculados da massa das ferramentas e das suas respetivas *shadowboxes*

Objeto	Volume(mm^3)	Peso(kg)
956A1020	-	4,5
956A1020 SB	212800,0	0,5
956A1061	-	13,3
956A1061 SB	1080000,0	2,5
956A1021	-	3,4
956A1021 SB	120800,0	0,3
956A1221	-	11,3
956A1221 SB	313668,0	0,7
Boroscópio	-	1,1
Boroscópio SB	580000,0	1,3
Caixa 956A1005	-	0,5
Caixa 956A1005 SB	500000,0	1,2
956A1031	-	2,1
956A1031 SB	91106,0	0,2
956A1031_P04	-	2,0
956A1031_P04 SB	113097,0	0,3
956A1031_P03	-	3,0
956A1031_P03 SB	113097,0	0,3
956A1269	-	0,3
956A1269 SB	233200,0	0,5
956A1049	-	11,8
956A1049 SB	1656000,0	3,8
956A1098	-	17,5
956A1098 SB	1640000,0	3,8
Total		81,2

4.6.2 Estudo da Resistência e Rigidez da prateleira de teflon

Na análise da deflexão da prateleira de *teflon* quando está sujeita aos esforços resultantes das condições de funcionamento normal foram consideradas as seguintes simplificações:

- A prateleira tem comportamentos estruturais de um elemento de viga;
- a prateleira é apoiada em apenas duas extremidades opostas (Tabela 4.16 - Carregamento);
- os furos da prateleira são ignorados;
- a carga suportada está uniformemente distribuída pela prateleira;
- os perfis em cantoneira de abas iguais não irão deformar;
- os carregamentos foram considerados como sendo aplicados como estáticos e não foram considerados esforços dinâmicos, ou de impacto de quedas das peças sobre a prateleira.

A consideração de elementos estruturais de um elemento de tipo viga permite calcular a flecha máxima da prateleira. Dado que as ferramentas estão distribuídas pela prateleira toda e a prateleira encontra-se apoiada sem estar encastrada aos perfis do tipo de cantoneiras, o tipo de carregamento selecionado que a prateleira sofre é apresentado na Figura 4.19.

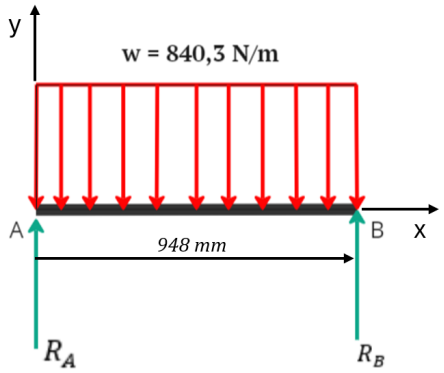


Figura 4.19: Diagrama de corpo livre da prateleira de *teflon* de baixo

Existem dois sentidos de flexão possíveis para a prateleira: no sentido do comprimento ou no sentido da largura. Selecionou-se o estudo da flexão no sentido da largura porque ao estabelecer limites para esta deformação está-se a condicionar a deflexão no limite do comprimento, que seria a mais gravosa. Para o cálculo da flecha máxima assumiu-se que os lados da prateleira apoiados na estrutura são os do comprimento, sendo a distância entre apoios (L) igual a 948 mm.

De acordo com a Tabela 4.15, a prateleira suporta uma massa de até 81,2 kg. A carga aplicada (w) é calculada através da equação 4.37.

$$w = \frac{F}{L} = \frac{m \times g}{L} = \frac{81,2 \times 9,81}{0,948} = 840,3\ N/m \tag{4.37}$$

Visto existirem dois esforços de reação, o valor de cada esforço é calculado através da equação 4.38.

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} = \frac{m \times g}{2} = \frac{81,2 \times 9,81}{2} = 398,3\ N \tag{4.38}$$

Esta equação resulta das equações de equilíbrio de forças e de momentos da estática, para o caso particular de um problema simétrico relativamente aos apoios, como é observado na Tabela 4.16 [28].

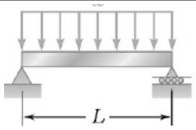
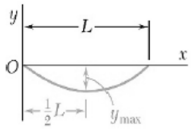
A flecha máxima da prateleira (f) calculada para a prateleira de *teflon* é igual a 15,2 mm, sendo apresentado o cálculo na equação 4.39.

$$f = \frac{5wL^4}{384EI} = \frac{5 \times 885,4 \times (0,948)^4}{384 \times (575 \times 10^6) \times (1065333,3 \times 10^{-12})} = 0,0152\ m = 15,2\ mm \tag{4.39}$$

em que,

E — módulo de elasticidade, sendo igual a 575 MPa (Tabela 4.3)

Tabela 4.16: Carregamento e respetiva flecha máxima da prateleira de teflon de baixo [28]

Carregamento	Linha Elástica	Flecha Máxima
		$-\frac{5\omega L^4}{384EI}$

I — momento de inércia, sendo calculado na equação 4.4

Este valor de deflexão exige a utilização de perfis em T para sustentar a prateleira, diminuindo a sua deflexão.

4.6.3 Estudo da Resistência e Rigidez do suporte de perfis em T da prateleira

A colocação de perfis em T, tanto no sentido do comprimento como da largura do carrinho, permite suportar a prateleira de baixo e as suas respetivas ferramentas, tal como apresentado na Figura 4.28.

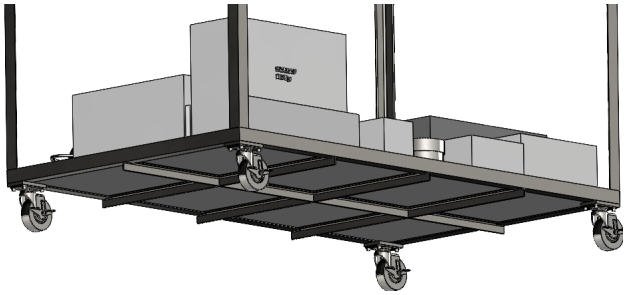


Figura 4.20: Vista dos perfis de barra em T que suportam a prateleira de *teflon* de baixo

Como pode ser observado na figura 4.20, a prateleira é suportada por um perfil com a dimensão do comprimento e 6 perfis com dimensão correspondente metade da largura. Para efeitos de cálculo será analisado a flecha máxima de um perfil em T com a distância entre apoios igual à largura da prateleira de baixo. O tipo de carregamento aplicado é idêntico ao da prateleira de *teflon* e é apresentado na Figura 4.21.

Neste caso, o peso suportado pela viga é o das ferramentas e das respetivas *shadowboxes* adicionado ao peso da prateleira de *teflon*, tal como apresentado na equação 4.6.

$$m_{total} = m + m_{Prateleira} = 81,2 + 69 = 150,2\ kg \tag{4.40}$$

em que,

m_{total} — massa da prateleira de *teflon*, das ferramentas e das suas respetivas *shadowboxes*

$m_{Prateleira}$ — massa da prateleira de *teflon*, sendo calculada na equação 4.7

m — massa total das ferramentas

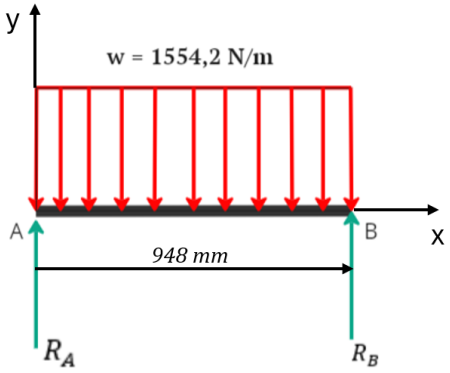


Figura 4.21: Diagrama de corpo livre do perfil de barra em T do conjunto da prateleira de baixo

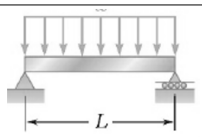
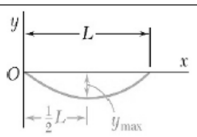
Assim, a carga distribuída é calculada na equação 4.41.

$$w = \frac{F}{L} = \frac{m \times g}{L} = \frac{150,2 \times 9,81}{0,948} = 1554,3\ N/m \tag{4.41}$$

Assim sendo, visto haver dois esforços de reação, cada esforço irá exercer a força calculada na equação 4.42.

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} = \frac{m \times g}{2} = \frac{150,2 \times 9,81}{2} = 736,7\ N \tag{4.42}$$

Tabela 4.17: Carregamento e respetiva flecha máxima do perfil de barra em T[28]

Carregamento	Linha Elástica	Flecha Máxima
		$-\frac{5\omega L^4}{384EI}$

A flecha máxima da prateleira é calculada através da equação 4.3, sendo igual a 1,5 mm (tal como se apresenta de seguida).

Neste caso, o momento de inércia (I) será multiplicado por 3 para simular os 3 perfis em T que suportam a placa de *teflon* no sentido da largura.

$$f = \frac{5wL^4}{384EI} = \frac{5 \times 1554,3 \times (0,948)^4}{384 \times (210000 \times 10^6) \times (3 \times 1,72 \times 10^{-8})} = 0,0015\ m = 1,5\ mm \tag{4.43}$$

em que,

E — módulo de elasticidade, sendo igual a 210000 MPa (Tabela 4.2)

I — momento de inércia, sendo igual a $1,72\ cm^4$ (Tabela 4.7)

Seguidamente, é necessário calcular a tensão máxima a que os perfis estão sujeitos e comparar à tensão de cedência do material dos perfis, sendo esta 355 MPa.

O cálculo da tensão máxima (σ_{max}) a que os perfis estão sujeitos é apresentada na equação 4.44.

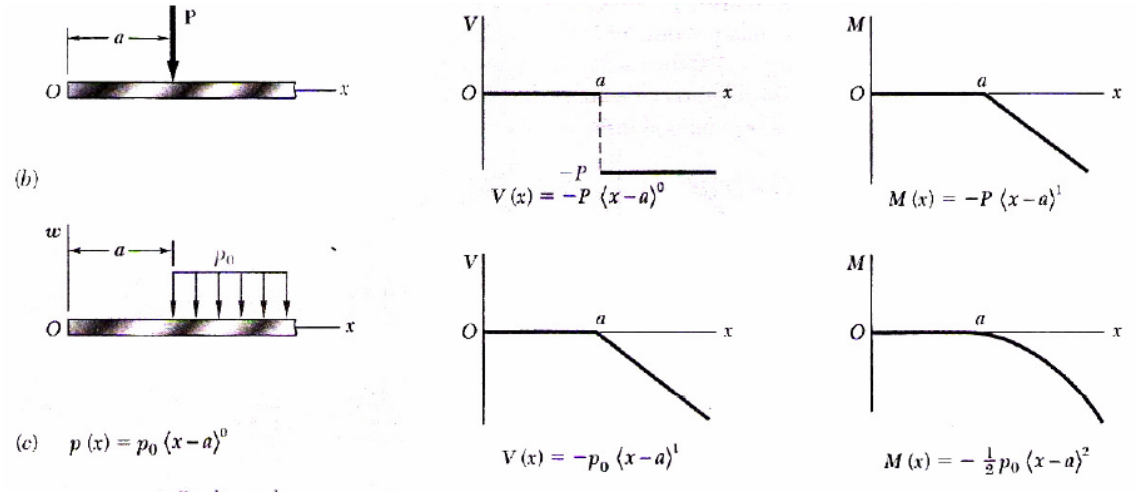
$$\sigma_{max} = \frac{-M_Z}{I} \times y \tag{4.44}$$

em que,
M_Z — momento fletor, sendo calculado na equação 4.45 a partir das fórmulas dadas na Tabela 4.18
y — distância dos pontos da área da secção transversal da viga ao plano neutro da flexão.

Como não existe existe carregamento axial, o plano neutro de flexão inclui o centroide da área da secção transversal da viga. Logo, y é calculada pela seguinte equação, os valores foram retirados do catálogo CHAGAS [27]:

$$y = 30 - 8,5 = 21,5mm \tag{4.45}$$

Tabela 4.18: Momento fletor e esforço transverso causados pelo carregamento de carga distribuída [30]



O ponto com maior deflexão é o ponto do meio da barra, $x = 474$ mm,

$$M_Z = -\frac{1}{2}w[x]^2 + R_A[x]^1 + R_B[x - 0,948]^1 = -\frac{1}{2} \times 1554,3[0,474]^2 + 736,7[0,474] = 174,6\ N.m \tag{4.46}$$

logo,

$$\sigma_{max} = \frac{-174,6}{3 \times 1.72 \times 10^{-8}} \times 21,5 \times 10^{-3} = -72,75\ MPa \tag{4.47}$$

Como a tensão de cedência do aço estrutural S355 é 355 MPa, o perfil em T está no regime elástico da deformação e o fator de segurança é de 4,88.

4.7 Estudo da estabilidade das colunas de suporte do carrinho

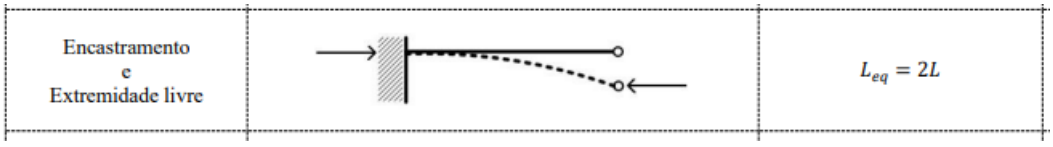
A estrutura do carrinho integra 4 colunas de suporte, cada uma com 990 mm e em cantoneira. Estas colunas são soldadas aos perfis de suporte horizontal em cantoneira das prateleira de cima e de baixo.

A análise da estabilidade das colunas de suporte está estruturada em duas partes: i) estabilidade das colunas; ii) estabilidade dos furos das colunas para a prateleira do meio deslizar.

A análise da estabilidade das colunas tem por objetivo determinar se uma rotura destas se deve por instabilidade ou por plastificação da secção. Determina-se então a esbelteza normalizada (λ) de uma coluna, pois caso $\lambda \leq 0,2$, a coluna é curta e a rotura deve-se à plastificação da secção. Caso contrário trata-se de uma coluna esbelta e sofre de encurvadura.

Na análise da estabilidade das colunas de suporte quando estão sujeitas aos esforços resultantes das condições de funcionamento normal do carrinho, considerou-se como simplificação que as colunas estão encastradas numa extremidade, sendo a outra livre. Esta simplificação é apresentada na Tabela 4.21. Na análise da estabilidade considerou-se também que as colunas sustentam o peso da prateleira de cima e da prateleira do meio, com as suas respetivas ferramentas.

Tabela 4.19: Estabilidade de uma viga encastrada com extremidade livre



Para uma cantoneira em aço, a esbelteza normalizada é calculada através da equação 4.65.

$$\lambda = \frac{\frac{L_{eq}}{I}}{\pi\sqrt{\frac{E}{\sigma_c}}} \tag{4.48}$$

em que,
L_{eq} — comprimento equivalente
I — momento de inércia
E — módulo de *Young* (Tabela 4.2)
σ_c — tensão de cedência (Tabela 4.2)
No qual:

$$L_{eq} = L \times 2 = 0,993 \times 2 = 1,986\ m \tag{4.49}$$

Como $I_v = I = 2,26 \times 10^{-8}$, (Tabela 4.5)
Logo,

$$\lambda = \frac{\frac{L_{eq}}{I}}{\pi\sqrt{\frac{E}{\sigma_c}}} = \frac{\frac{1,986}{5,43\times10^{-8}}}{\pi\sqrt{\frac{210000}{355}}} = 0,2 \tag{4.50}$$

Desta forma, as colunas de suporte da estrutura podem ser classificadas como colunas curtas.

Pelo Eurocódigo 3 [23], o esforço axial resistente da coluna (N_{rd}) é calculado da seguinte forma:

$$N_{rd} = \frac{\chi A \sigma_c}{\Upsilon_{M1}} \tag{4.51}$$

em que,
χ — fator de redução
A — área de secção
Υ_{M1} — coeficiente parcial de segurança
No qual, χ depende da esbelteza da coluna, sendo que para colunas curtas $\chi = 1$ e $\Upsilon_{M1} = 1,1$. A área de secção é de $3,79cm^2$ (Tabela 4.5).
Logo,

$$N_{rd} = \frac{\chi A \sigma_c}{\Upsilon_{M1}} = \frac{1 \times 3,79 \times 10^{-4} \times 355 \times 10^6}{1,1} = 122313,6\ N = 122,3\ kN \tag{4.52}$$

A massa total suportada pelo conjunto das colunas de suporte é calculada através da equação 4.70.

$$M_{total} = M_{Fcima} + M_{Fmeio} + M_{Tcima} + M_{Tmeio} + M_{Ecima} + M_{Emeio} \tag{4.53}$$

em que,
M_F — massa das ferramentas
M_T — massa da prateleira de *teflon*
M_E — massa da estrutura
No qual:

$$\begin{aligned} M_{Ecima} &= p_{cantoneira} \times L_{cantoneira} + p_{barraT} \times L_{barraT} = \\ &= p_{cantoneira}(2 \times L_{comprimento} + 2_{largura}) + p_{barraT}(6 \times L_{largura} + L_{comprimento}) = \\ &= 2,97(2 \times 1,61 + 2 \times 0,961) + 1,77(3 \times 0,961 + 1,61) = 23,22\ kg \end{aligned} \tag{4.54}$$

$$\begin{aligned} M_{Emeio} &= p_{cantoneira} \times L_{total} = p_{cantoneira}(2 \times L_{comprimento} + L_{largura} + 2 \times L_{altura}) = \\ &= 2,97(2 \times 0,865 + 0,961 + 2 \times 0,23) = 9,36\ kg \end{aligned} \tag{4.55}$$

sendo que p é a massa por metro de perfil.

Assim,

$$M_{total} = 180,5 + 7,8 + 69 + 38,58 + 23,22 + 9,36 = 328,46\ kg \tag{4.56}$$

Desta forma, cada coluna está sobre um esforço de $\frac{328,46}{4} \times 9,81 = 805,55N$. O fator de segurança das colunas do carrinho suporte relativo ao esforço axial da coluna, N_{rd}, é de $\frac{122,3 \times 10^3}{805,55} = 151,55$.

As duas colunas da frente apresentam furos para a passagem da prateleira deslizante, tal como ilustrado na Figura 4.30. Esta situação constitui uma fragilidade para a estrutura do carrinho de ferramentas e por esta razão é analisada a tensão máxima que esta secção estará sujeita.

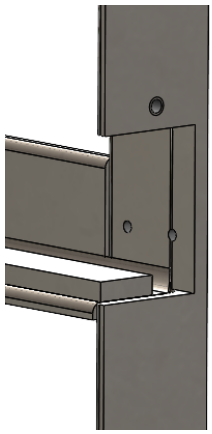


Figura 4.22: Furos nas colunas dianteiras para passagem de prateleira deslizante

A equação 4.74 apresenta o cálculo da pressão na área de secção da cantoneira cortada para uma força aplicada da coluna de suporte.

$$P = \frac{F}{A} = \frac{\frac{328,46}{4} \times 9,81}{0,04 \times 0,005} = 4,03\ MPa \tag{4.57}$$

Como a tensão de cedência do aço S355 é 355MPa, esta secção tem um coeficiente de segurança de 88,75.

4.8 Dimensionamento das rodas do carrinho

O carrinho rodas de *teflon* com 100 mm de diâmetro. Estas rodas foram escolhidas do catálogo *McMasterCarr* e são adequadas para carrinhos de transporte e pavimento em cimento. Cada roda está dimensionada para suportar uma massa de 450 kg [31].

Na equação 4.75 procede-se ao cálculo da massa total do carrinho.

$$\begin{aligned} M_{total} &= M_{Fcima} + M_{Fmeio} + M_{Fbaixo} + M_{Tcima} + M_{Tmeio} + M_{Tbaixo} + M_{Ecima} + M_{Emeio} + M_{Fbaixo} + M_{colunas} \\ &= 180,5 + 7,8 + 81,2 + 69 + 38,58 + 69 + 23,22 + 9,36 + 23,22 + 11,76 = 513,64\ kg \end{aligned} \tag{4.58}$$

O cálculo do fator de segurança é apresentado na equação 4.76.

$$FS = \frac{450}{\frac{513,64}{4}} = 3,5 \tag{4.59}$$

Um fator de segurança 3,5 é considerado satisfatório para os propósitos oficinais.

Seguidamente, verificam-se as condições de utilização do carrinho tendo em consideração os requisitos de higiene e segurança no trabalho. São, assim, considerados os Requisitos Funcionais FR_{521} e FR_{522} (Tabela 3.27), respetivamente $F_e \leq 320N$ e $F_M \leq 230N$. A equação 4.78 refere-se ao cálculo da força necessária para iniciar o movimento do carrinho.

em que,
μ_e — Coeficiente de atrito estático (Tabela 4.3).

$$F_M = N \times C_{rr} = \frac{513,64 \times 9,81}{4} \times 0,035 = 44\,N \tag{4.60}$$

em que,
C_{rr} — Coeficiente de atrito de rolamento (valor para atrito de rodas de *teflon* em pavimento em cimento retirado de [32])

Conclui-se assim que estes Requisitos Funcionais são satisfeitos.

4.9 Desenho e cálculo em *SolidWorks*

Seguidamente apresenta-se o resultado das simulações realizadas no programa *SolidWorks* relativamente à análise da deformação (Figura 4.31), da tensão (Figura 4.32) e do fator de segurança do carrinho (Figura 4.33).

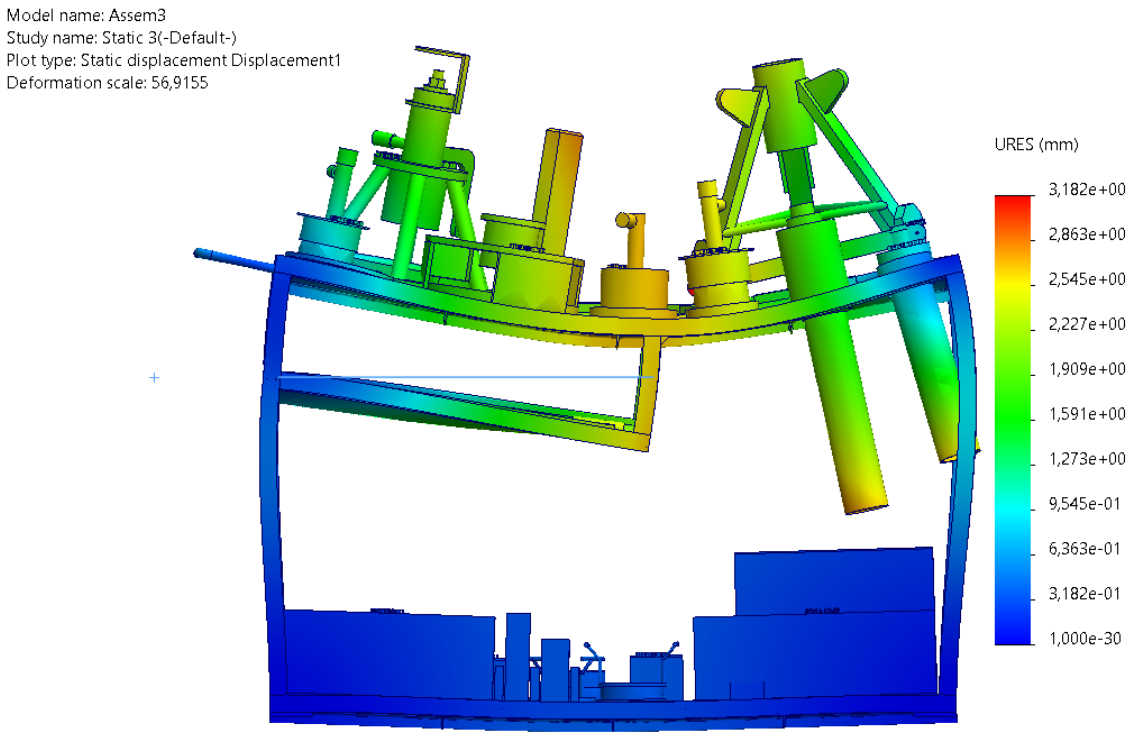


Figura 4.23: Resultado da simulação do comportamento do carrinho em termos de deformação

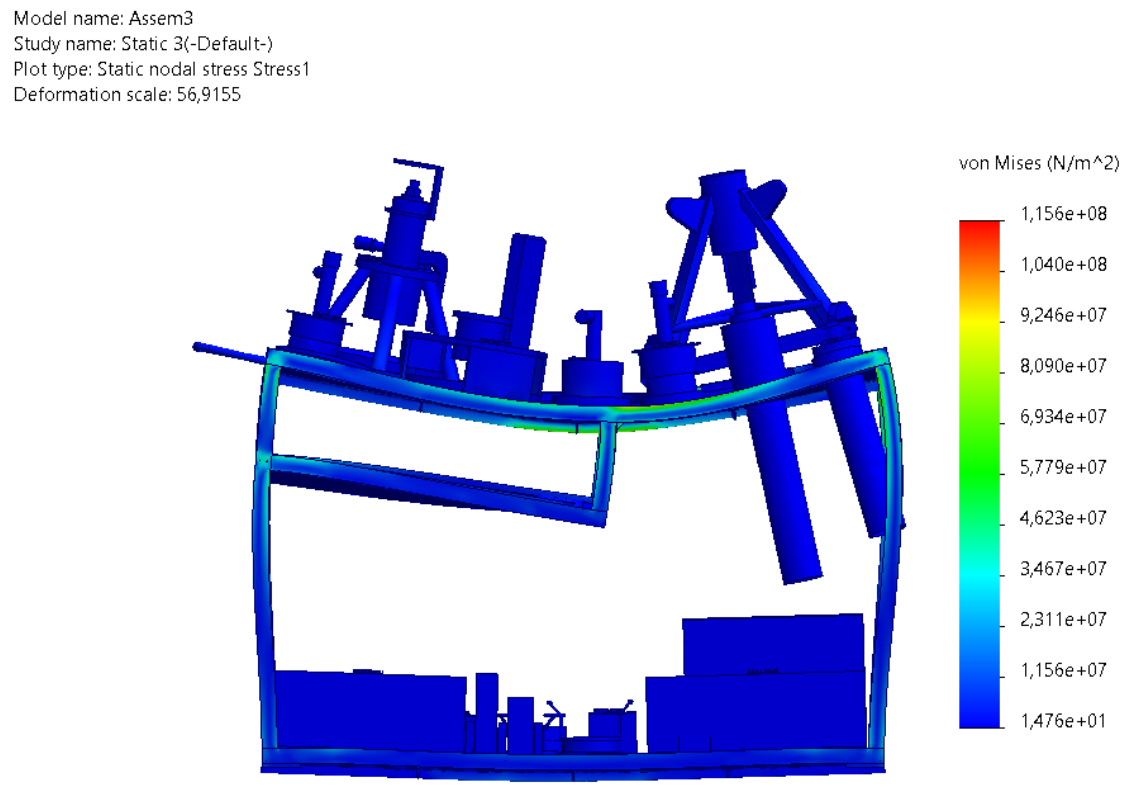


Figura 4.24: Resultado da simulação do comportamento do carrinho em termos de tensão

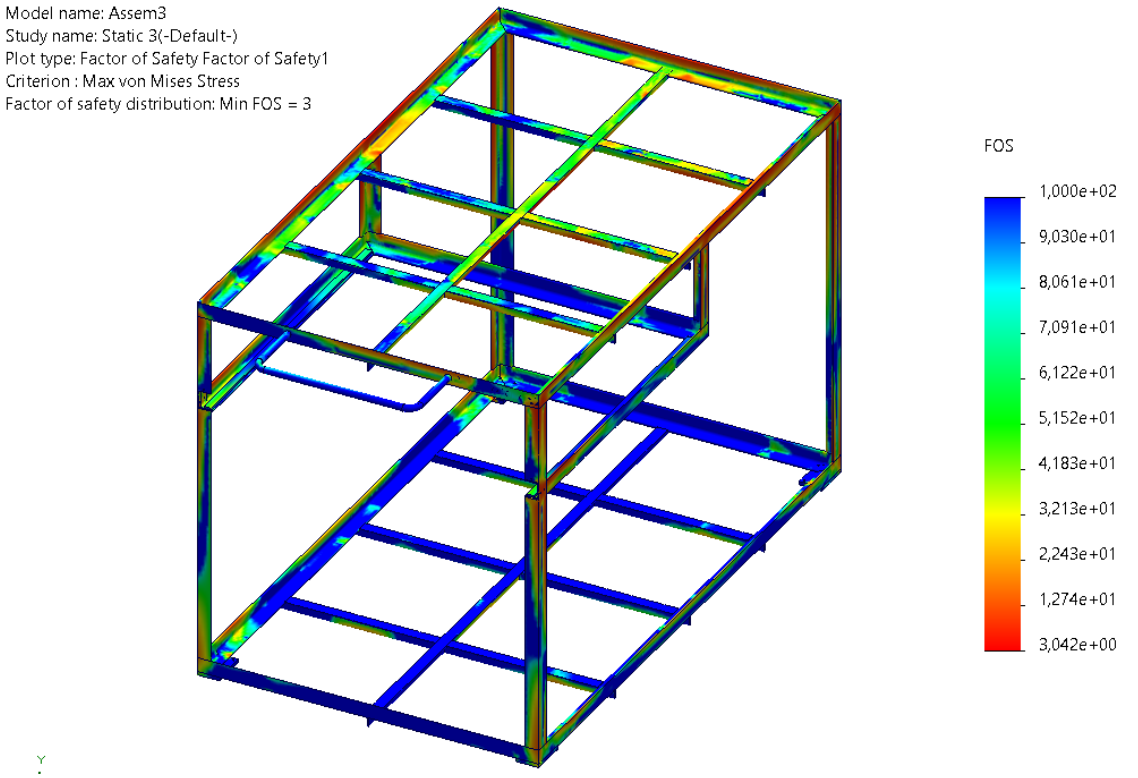


Figura 4.25: Resultado da simulação do comportamento do carrinho em termos do fator de segurança

Os resultados da simulação permitem concluir, através do código de cores, que o carrinho projetado apresentará um comportamento estrutural que satisfaz os requisitos previamente impostos.

Os resultados também estão de acordo com o que foi calculado nos capítulos anteriores. Na Figura 4.23 observa-se que a deformação máxima calculada no perfil em T da prateleira de cima é igual a 2,863. Nos capítulo em cima calculou-se que a deformação seria de 2,9 mm, tendo assim um desvio de 1,28%. Na Figura 2.24 observa-se que a tensão máxima no perfil em T da prateleira de cima é igual a 115,6 MPa. Nos capítulos em cima calculou-se que a tensão seria de 120,83 MPa, tendo assim um desvio de 4,33%.

5

Conclusões

5.1 Resultados

As condições atuais do mercado da manutenção aeronáutica levam as empresas a adotarem novas estratégias e abordagens para garantir uma manutenção mais célere e com menos desgaste das ferramentas utilizadas. Nesta perspetiva, a aplicação conjunta da metodologia da Teoria Axiomática e o uso de programas de modelação 3D como o *Solidworks* constituem uma situação inovadora ao permitir o desenvolvimento eficiente e sustentável de carrinhos de ferramentas que contribuam para a melhoria contínua dos processos de manutenção. A teoria axiomática permite ajudar a concepção por forma a que os requisitos do projecto sejam satisfeitos com independência, enquanto o *Solidworks* permite simular a configuração e o comportamento estrutural do protótipo.

Atualmente, a forma de armazenamento das ferramentas de manutenção dos motores condiciona o funcionamento da oficina de motores, pois o espaço ocupado na arrumação de ferramentas é considerável. Outro condicionante é o tempo necessário para a manipulação das ferramentas. O modo de armazenamento também tem reflexos em termos do risco de danificar as ferramentas.

Após a análise do processo de manutenção do módulo principal do *Core*, foram selecionadas as ferramentas a ser armazenadas no carrinho, tanto pelo seu tamanho como pela quantidade de vezes que são utilizadas. Para desenvolver o projeto do carrinho foram recolhidos os requisitos necessários a, não só servir de arrumação de ferramentas, como a tornar o processo de manutenção mais eficiente. A análise destes requisitos através da Teoria Axiomática permitiu a sua tradução em características físicas a definir para o carrinho e o conjunto de ações necessárias para garantir uma otimização das ações de manutenção (por exemplo, formação da equipa de produção). Sem o recurso à Teoria Axiomática, teria sido difícil conjugar os diferentes requisitos impostos por várias entidades da oficina de motores de modo a criar o carrinho que mais se adequasse à tarefa para a qual foi concebido, mantendo a sua versatilidade.

A utilização do *Solidworks* permitiu a pré-visualização do protótipo do carrinho, indicando simultaneamente características físicas como a deformação e as tensões induzidas.

A utilização deste *software* de modelação tridimensional apoiou o desenvolvimento da melhor configuração para a arrumação das ferramentas no carrinho. Finalmente, refere-se a utilidade deste *software* como ferramenta de comunicação entre a engenharia e a equipa de produção.

Outro resultado que importa referir, é a modelação 3D de todas as ferramentas utilizadas na manutenção do módulo principal do *Core*, as quais perfizeram 26 modelos. Estes modelos ficam disponíveis para trabalhos futuros.

O projeto desenvolvido para o carrinho *Kit Core* permite o transporte em simultâneo de 20 ferramentas utilizadas, as quais são utilizadas em 11 subtarefas que integram a operação de montagem e desmontagem do módulo principal *Kit Core*. A arrumação destas ferramentas no carrinho *Kit Core* libertou cerca de 3 metros quadrados na área da oficina, tal como se apresenta na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Diminuição de área oficinal ocupada através do projeto *kit Core*

Área ocupada por ferramentas para manutenção do módulo principal do *Core* (m^2)			
Situação inicial	Situação pós projeto do *Kit Core*	Área reduzida	
4,6272	1,5149	3,1123	67%

O desenho do carrinho *Kit Core* teve também em consideração aspetos ergonómicos e de segurança no trabalho, aumentando assim a eficiência no processo de manutenção.

Finalmente, refere-se a construção do carrinho *kit Core*, com atribuição de "prioridade elevada", para futura utilização na oficina de motores. A construção e futura utilização do carrinho na oficina de motores consiste, assim, o principal resultado desta dissertação, refletindo uma boa aceitação da metodologia empregue no seu projeto.

5.2 Recomendações

Seguidamente apresentam-se um conjunto de sugestões a desenvolver em trabalhos futuros.

- Criação e manutenção de um registo das ferramentas em 3D para apoiar de forma célere outros projetos de dimensionamento de carrinhos de ferramentas.
- Planeamento do trabalho de modelação das ferramentas visando o aproveitamento dos períodos de trabalho do *scanner* para a tarefa de elaboração do arquivo.
- Definição de um sistema de recolha de requisitos funcionais como base para o desenvolvimento de outros carrinhos.
- Identificação dos benefícios a médio prazo decorrentes da utilização do carrinho (por exemplo, libertação de espaço na oficina ou aumento da eficiência de trabalho) no sentido de aumentar o nível de prioridade para a sua elaboração.

Bibliografia

[1] J. M. Lourenço. *The NOVAthesis LaTeX Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. 2021. URL: https://github.com/joaomlourenco/novathesis/raw/main/template.pdf.

[2] Airbus. *A320 AIRCRAFT CHARACTERISTICS AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING AC*. Airbus. 2020.

[3] *TAP Air Portugal (TP/TAP) Fleet, Routes Reviews | Flightradar24*. URL: https://www.flightradar24.com/data/airlines/tp-tap/fleet (acedido em 2024-08-26).

[4] *Orders and Deliveries | Airbus*. URL: https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/orders-and-deliveries (acedido em 2024-08-26).

[5] *TAP Air Portugal Fleet Details and History*. Planespotters, 2024. URL: https://www.planespotters.net/airline/TAP-Air-Portugal?refresh=1 (acedido em 2024-02-15).

[6] *TAP transportou 15,9 milhões de passageiros em 2023*. TAP Air Portugal, 2024. URL: https://www.tapairportugal.com/pt/media/comunicados-de-imprensa/Press-Release-1005 (acedido em 2024-02-15).

[7] *RC TAP SA Consolidado 2022 PT - versao no ESEF*. Rel. téc. 2023. (Acedido em 2024-02-15).

[8] *O Grupo TAP — Institucional*. TAP Air Portugal, 2024. URL: https://www.tapairportugal.com/pt/sobre-nos/grupo-tap (acedido em 2024-02-15).

[9] *Jet Engine Design and Optimisation*. 2013. URL: https://aerospaceengineeringblog.com/jet-engine-design/ (acedido em 2024-01-31).

[10] K. Gavrieli, N. Salim e A. Yañez. *THE JET ENGINE: A HISTORICAL INTRODUCTION*. 2014. URL: https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/ww2/projects/jet-airplanes/index.html (acedido em 2024-01-31).

[11] *How The 4 Types Of Turbine Engines Work | Boldmethod*. 2017. URL: https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/systems/the-4-types-of-turbine-engines/.

[12] *Manual de Manutenção Oficinal LEAP1A - Hardware*. TAP Air Portugal. 2020.

[13] A. Dankanich e D. Peters. «Turbofan Engine Bypass Ratio as a Function of Thrust and Fuel Flow». Em: *Mechanical Engineering and Materials Science Independent Study. 34* (2017). URL: https://openscholarship.wustl.edu/mems500/34/.

[14] *CFM56 - CFM International Jet Engines CFM International*. 2024. URL: https://www.cfmaeroengines.com/engines/cfm56/ (acedido em 2024-02-16).

[15] *A giant LEAP forward - Evolution*. 2018. URL: https://evolution.skf.com/a-giant-leap-forward/ (acedido em 2024-02-16).

[16] N. P. Suh. *Axiomatic Design: Advances and Applications*. Oxford Pniversity Press, 2001.

[17] L. D. Albano e N. P. Suh. *Axiomatic Approach to Structural Design*. Vol. 4. 1992, pp. 171–183.

[18] A. Gonçalves-Coelho et al. «How to handle the design preferences with Axiomatic Design». Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1235 (1 2022-03), p. 012054. ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/1235/1/012054. URL: https://www.researchgate.net/publication/359637366_How_to_handle_the_design_preferences_with_Axiomatic_Design.

[19] J. Fradinho. *Axiomatic Design Lecture Notes*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2022.

[20] N. Suh. *Axiomatic Design: Advances and Applications*. CIRP design book series. Oxford University Press, 2001, pp. 214–234. ISBN: 9780195134667. URL: https://books.google.pt/books?id=7mzE3LZcDDgC.

[21] *Kodak's Ergonomic Design for People at Work*. Wiley, 2003-10. DOI: 10.1002/9780470172469. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470172469.

[22] N. Gilbert. «Structural Steel». Em: *Structural Steel - S235, S275, S355 Chemical Composition, Mechanical Properties and Common Applications* (2012-05). URL: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022.

[23] *Eurocode 3: design of steel structures : part 1-5 : plated structural elements*. Incorporating corrigendum April 2009. London: BSI, 2010. URL: https://cds.cern.ch/record/1701996.

[24] *Plástico PTFE - TECAFLON PTFE | Ensinger*. URL: https://www.ensingerplastics.com/pt-br/semiacabados/plasticos-de-alto-desempenho/ptfe (acedido em 2024-08-26).

[25] *Overview of materials for Polytetrafluoroethylene (PTFE), Extruded*. URL: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4e0b2e88eeba4aaeb18e8820f1444cdb (acedido em 2024-08-26).

[26] *Grade 304 Stainless Steel: Properties, Fabrication and Applications*. URL: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2867.

[27] *Chagas*. URL: https://chagas.pt/mv/ESW/Files/ManualTecnico/02.pdf (acedido em 2024-08-26).

[28] P. S. G. Coelho. *Formulário de Estabilidade | Mecânica dos Sólidos II*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2021.

[29] P. S. G. Coelho. *Formulário geral de Mecânica dos Sólidos II | Mecânica dos Sólidos II*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2021.

[30] P. S. G. Coelho. *Sebenta deslocamentos transversais de vigas | Mecânica dos Sólidos II*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2021.

[31] *High-Capacity Spartan Caster with 5"x 4"Mounting Plate, Swivel with 4"Diameter 75D Polyurethane Wheel | McMaster-Carr*. URL: https://www.mcmaster.com/2856T19/ (acedido em 2024-08-26).

[32] Ł. Wargula, B. Wieczorek e M. Kukla. «The determination of the rolling resistance coefficient of objects equipped with the wheels and suspension system-results of preliminary tests». Em: *XXIII Polish-Slovak Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations* 254 (2019). DOI: 10.1051/matecconf/201925401005. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201925401005.

I

Anexos

Tabela I.1: Lista de todas as ferramentas listadas pela CFM para remoção dos submódulos do módulo principal Core

Tarefa de remoção dos submódulos do módulo principal Core					
P/N	Classe	Duração	Dimensões(mm)	Colocação no carrinho	Observações
Subtarefa 1: Remover TCF ASSY (SM54)					
956A1068	Fixture	Curta	-	Sim	-
956A1033	Adapter	Curta	-	Sim	-
956A1051	Stand	Curta	-	Não	Não cabe
9429M60	Stand	Longa	-	Não	Não cabe
Subtarefa 2: Remover HPT Rotor Blades Stage 2					
956A1005	Fixture	Curta	580×560	Sim	-
956A1030	Fixture	Curta	440×66	Sim	-
956A1094	Fixture	Curta	400×200	Não	Executa a mesma função que 956A1030
956A1004	Fixture	Curta	530×40	Não	Não foi comprado
Subtarefa 3: Remover Stage 2 HPT Nozzle ASSY					
956A1221	Fixture	Curta	500×500	Sim	-
956A1033	Adapter	Curta	-	Sim	-
956A1269	Fixture	Curta	-	Sim	-
Subtarefa 4: Remover HPT Rotor ASSY (SM52) e Stage 1 HPT Rotor ASSY (SM51)					
956A1226	Fixture	Curta	-	Não	Já vem instalada da Montagem Final
956A1076	System	Curta	-	Não	Não cabe
956A1063	Fixture	Curta	-	Sim	-
956A1262	Fixture	Curta	-	Não	Está em caixa almofadada e é demasiado grande
956A1002	Fixture	Curta	-	Sim	-
956A1001	Fixture	Longa	-	Não	Não cabe
9429M14	Fixture	Longa	560×40	Sim	-
956A1020	Fixture	Curta	-	Sim	-
956A1025	Dolly	Longa	-	Não	Demasiado grande
Subtarefa 5: Remover CDN (SM 41 / SM42)					
956A1208	Fixture	Curta	-	Não	Não cabe
956A1280	Fixture	Longa	460×700	Não	Não vem para o kit
956A1201	Set	Curta	-	Sim	-
956A1283	Adapter	Curta	-	Não	-
956A1243	Set	Curta	-	Não	Não é preciso
956A1200	Fixture	Longa	-	Não	-

Tabela I.2: Lista de todas as ferramentas listadas pela CFM para instalação dos submódulos do módulo principal Core

Tarefa de instalação dos submódulos do módulo principal Core					
P/N	Classe	Duração	Dimensões(mm)	Colocação no carrinho	Observações
Subtarefa 1: Instalar CDN					
956A1201	Set	Curta	-	Sim	-
956A1208	Fixture	Curta	-	Não	Não cabe
Subtarefa 2: Instalar HPT ASSY					
956A1076	System	Curta	-	Não	Não cabe
956A1200	Fixture	Longa	-	Não	Não cabe
956A1237	System	Curta	-	Não	Não é preciso
956A1002	Fixture	Curta	-	Sim	-
956A3027	Fixture	Curta	-	Não	Demasiado grande
Subtarefa 3: Instalar HPT Stator					
956A1221	Fixture	Curta	-	Sim	-
956A1225	Cover	Longa	-	Sim	-
956A1033	Adapter	Curta	-	Sim	-
Subtarefa 4: Instalar HPT Rotor Blades					
956A1005	Fixture	Curta	-	Sim	-
956A1030	Fixture	Curta	-	Sim	-
Subtarefa 5: Instalar TCF					
956A1033	Adapter	Curta	-	Sim	-

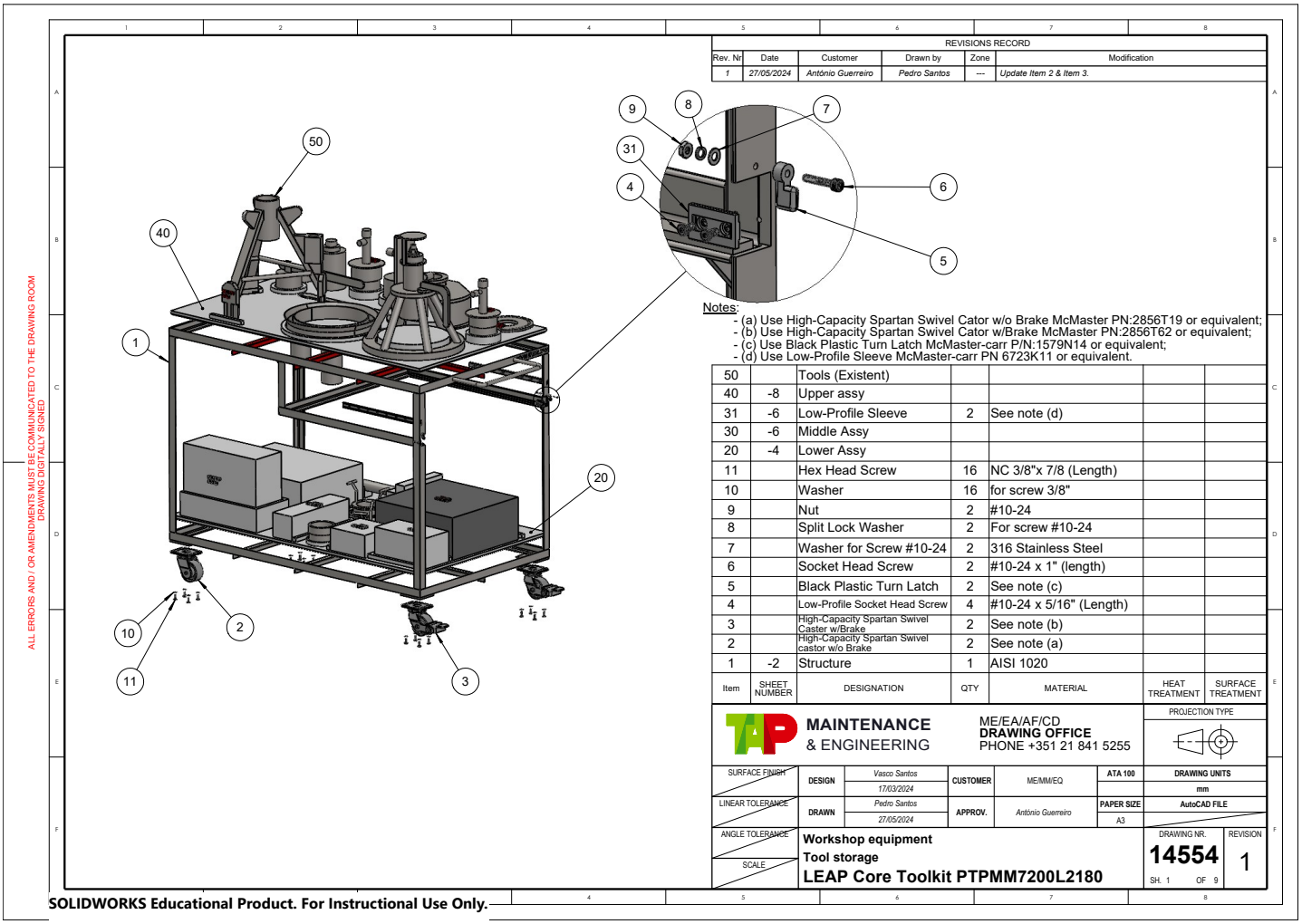


Figura I.1: Conjunto geral do carrinho *Kit Core* e todas as *subassemblies*

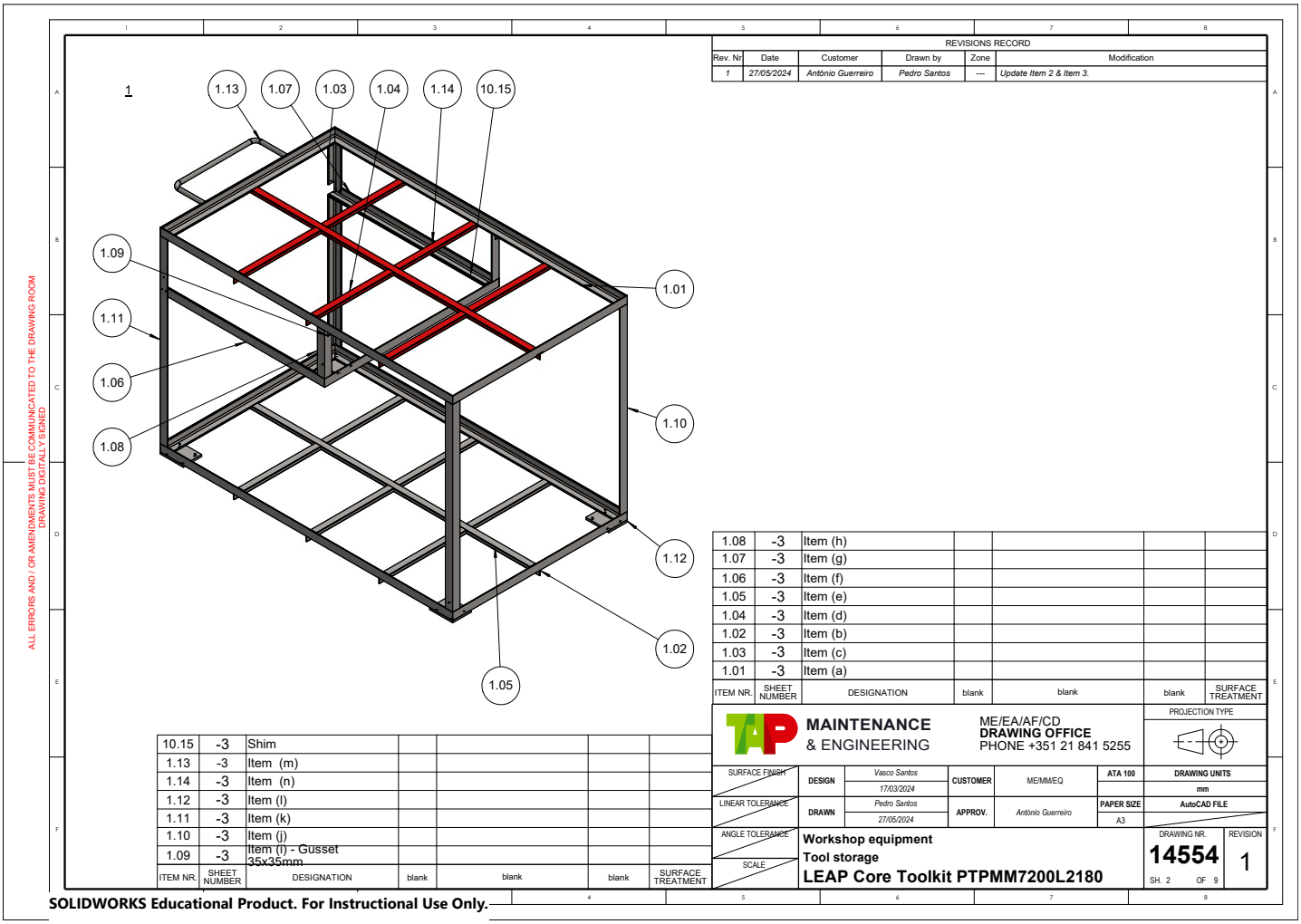


Figura I.2: Visão geral do subconjunto da estrutura de ferro

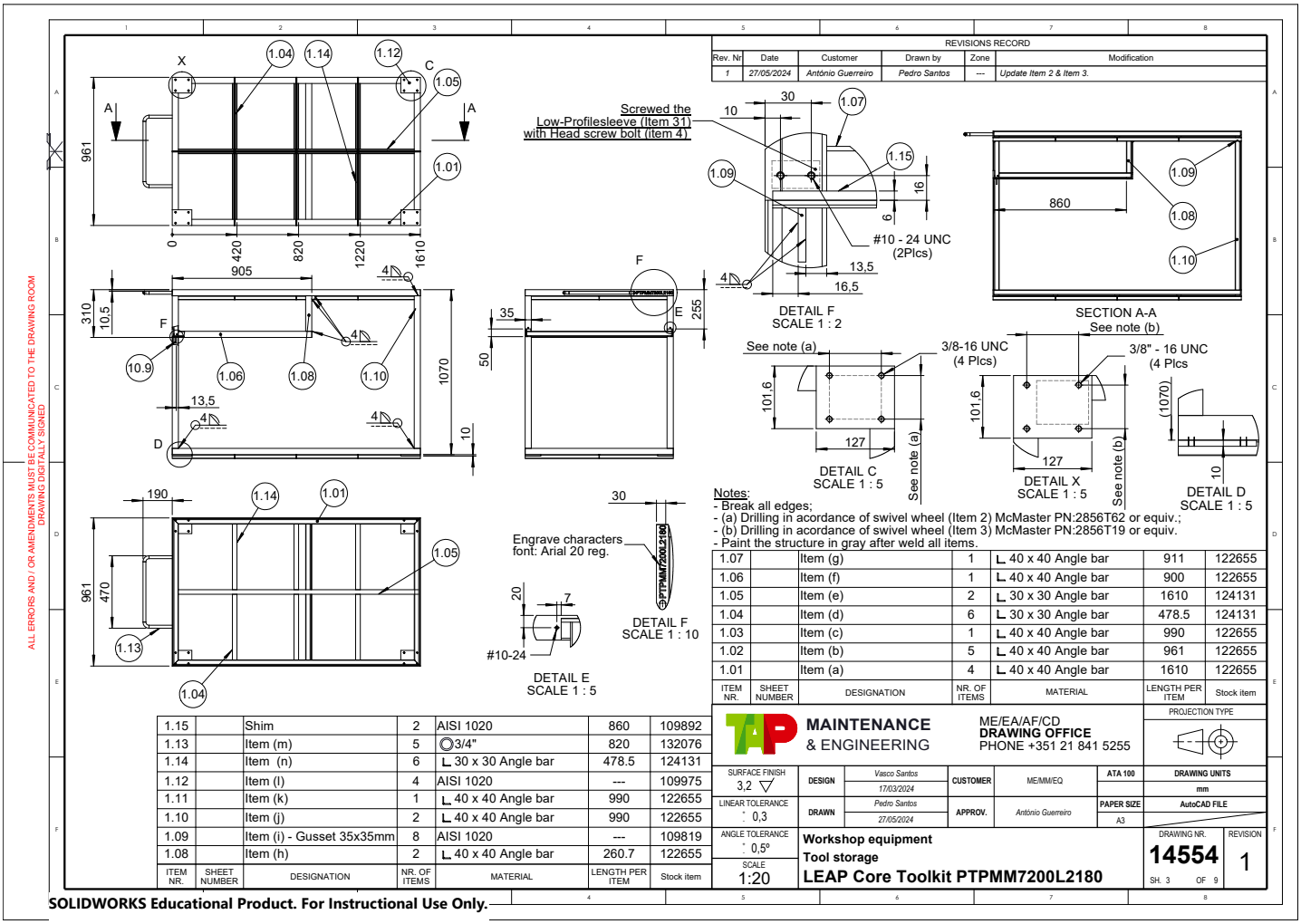


Figura I.3: Desenho técnico do subconjunto da estrutura de ferro

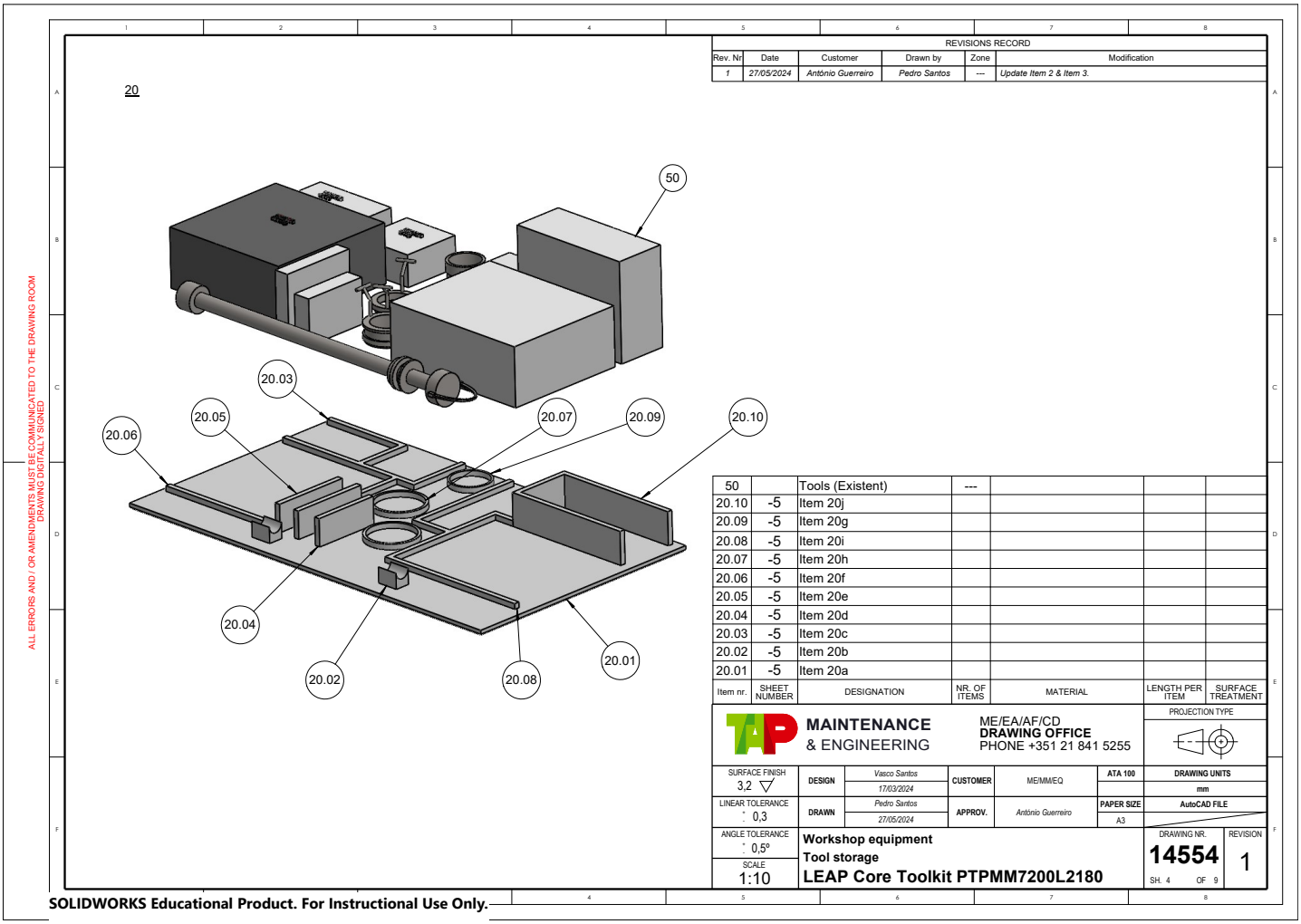


Figura I.4: Visão geral do subconjunto da prateleira inferior

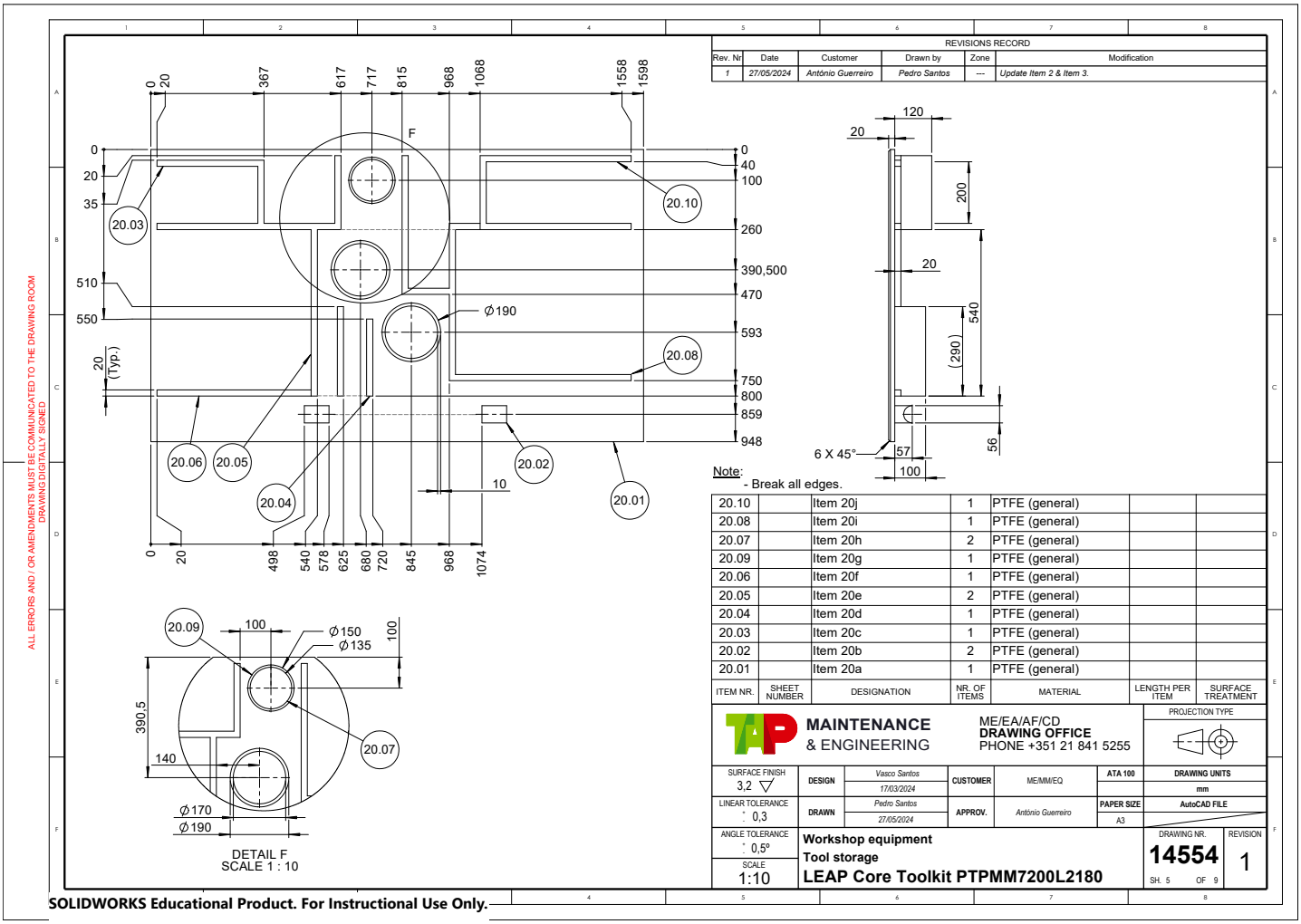


Figura I.5: Desenho técnico do subconjunto da prateleira inferior

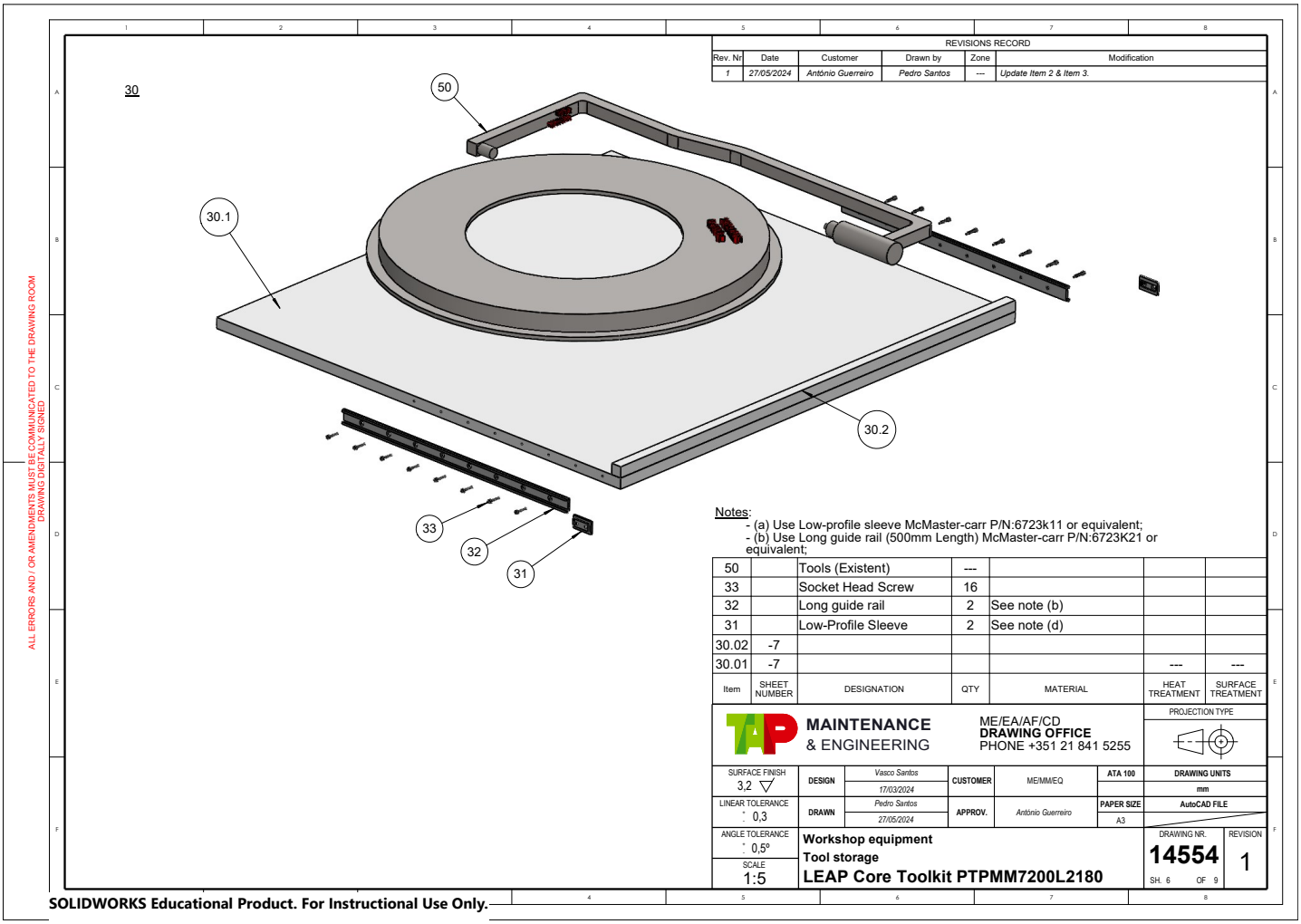


Figura I.6: Visão geral do subconjunto da prateleira do meio

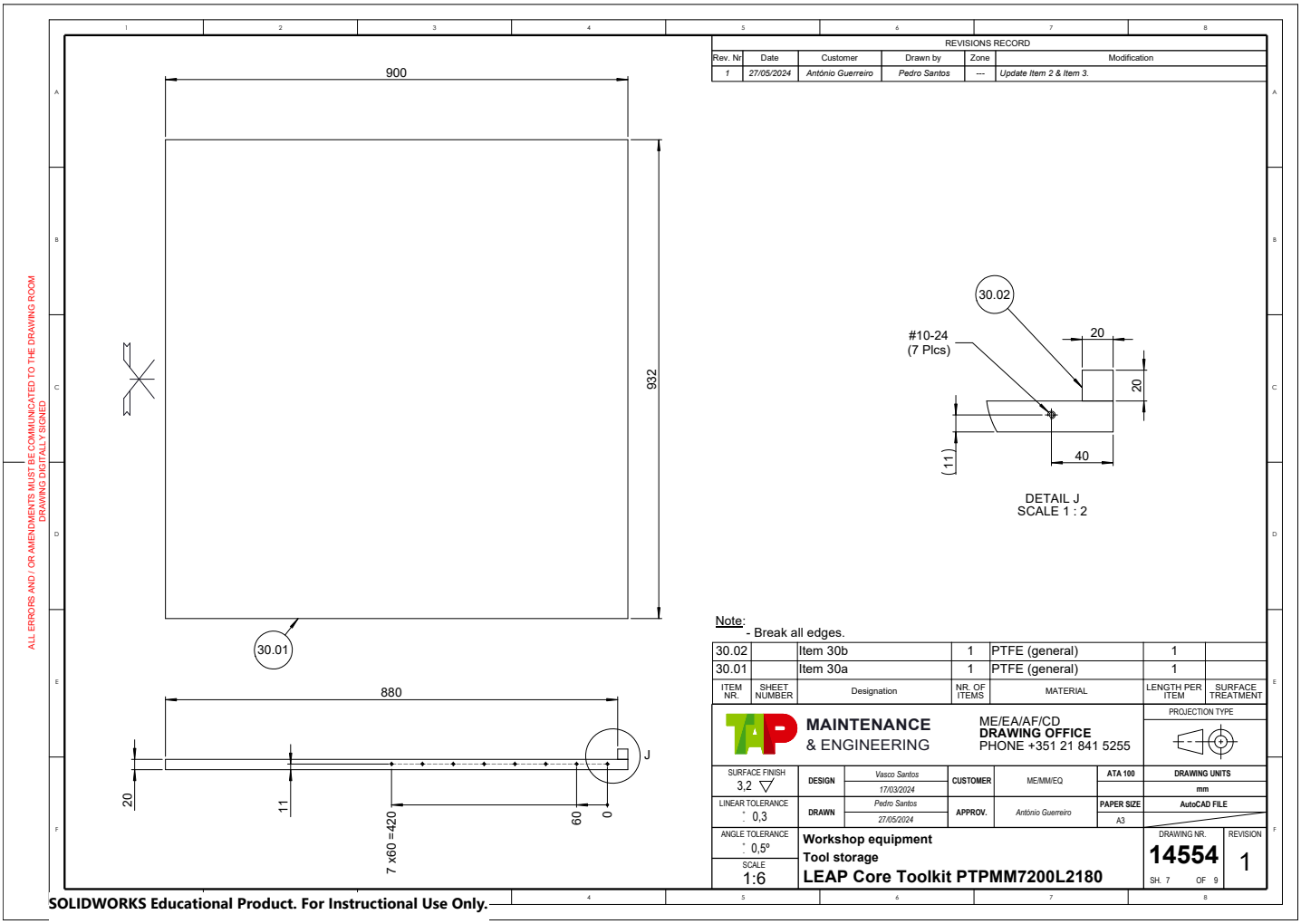


Figura I.7: Desenho técnico do subconjunto da prateleira do meio

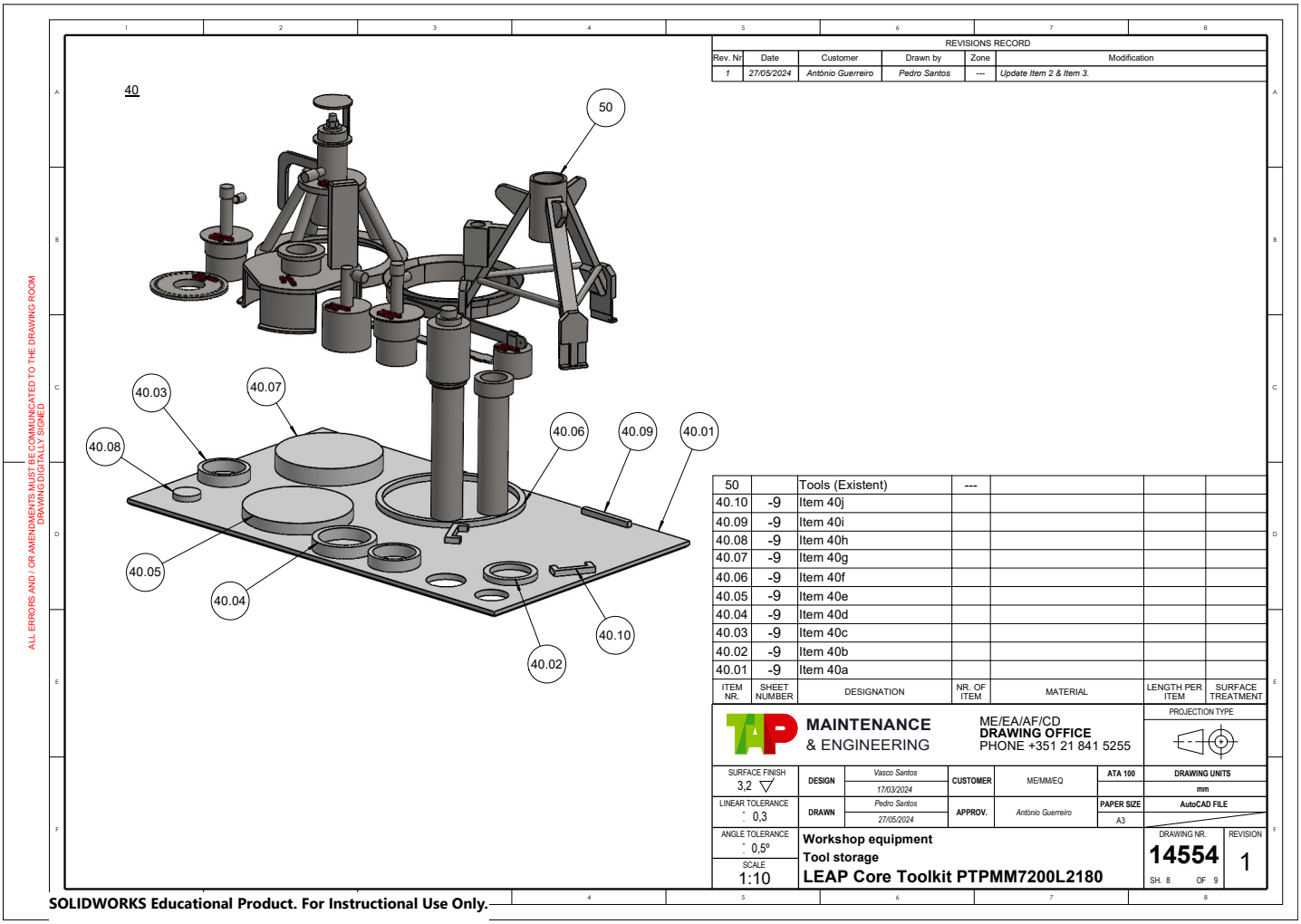


Figura I.8: Visão geral do subconjunto da prateleira superior

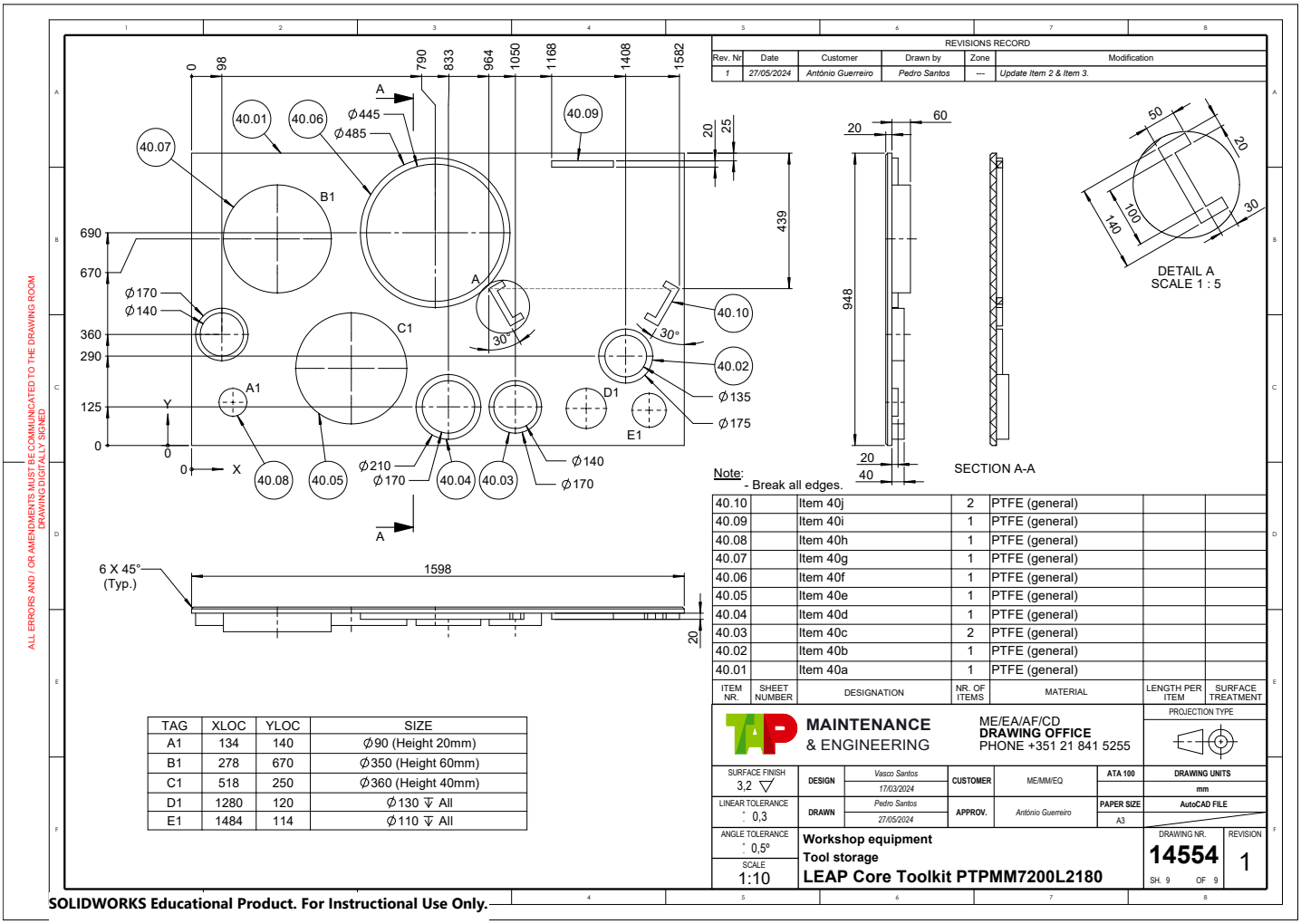


Figura I.9: Desenho técnico do subconjunto da prateleira superior

Tabela I.3: Tabela de cálculo das dimensões da caixa de cada ferramenta e total da àrea ocupada pelas caixas

P/N	Dimensões da caixa de armazenamento (mm)	Área ocupada pela caixa de armazenamento (m^2)
956A1227	860×360	0,301
956A1002	330×280	0,092
9429M14	-	-
956A1221	630×630	0,397
956A1048	430×330	0,142
956A1039	-	-
956A1030	630×630	0,397
956A1033	590×590	0,348
956A1005	730×730	0,533
956A1063	920×390	0,359
956A1050	90×60	0,005
956A1225	770×700	0,539
956A1098	610×510	0,311
956A1049	490×390	0,191
956A1221	1490×290	0,432
956A1269	170×130	0,022
956A1031	300×390	0,117
956A1005	260×170	0,044
Boroscópio	230×290	0,067
956A1201	220×220	0,048
956A1061	520×410	0,213
956A1020	330×180	0,059
Total		4,627

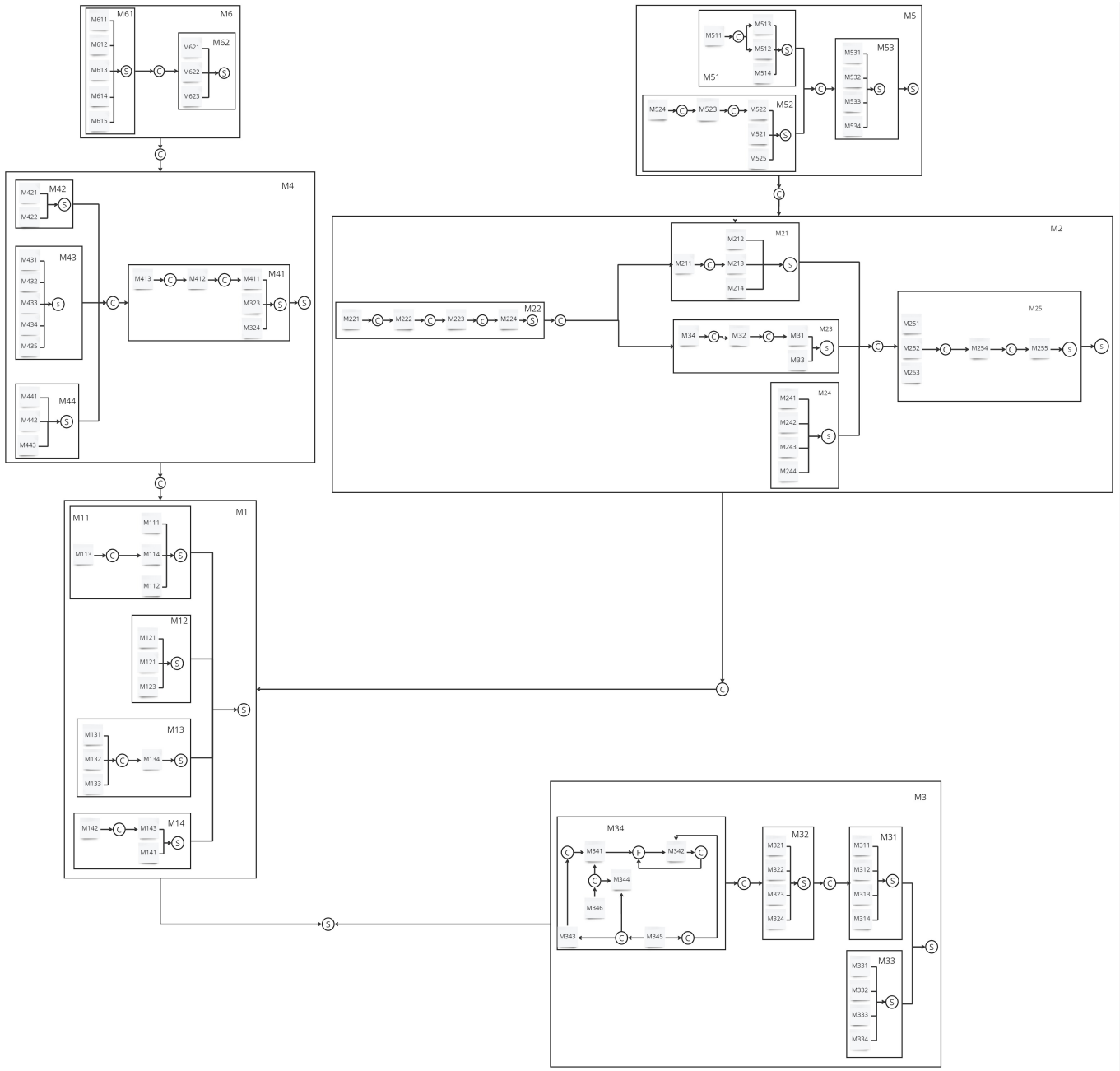
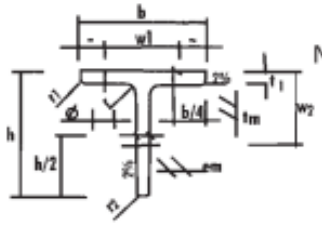


Figura I.10: Fluxograma do projeto do carrinho *Kit Core* com a identificação dos 3 níveis de decomposição

Tabela I.4: Especificações da barra em T

CHAGAS

Barra de Ferro T



Norma Dimensional DIN 1024 parte 1
Norma Material DIN 17100 / EN 10025

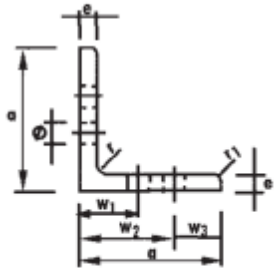
T Nº	Dimensões										Massa	Posição do centro de gravidade
h mm	b mm	$e_{m\text{-}tm}$ mm	t1 mm	r mm	r1 mm	r2 mm	n1 mm	n2 mm	Ø mm		p Kg/mm	ex cm
20	20	3	2,9	3	1,5	1	-	-	-		0,88	0,58
25	25	3,5	3,4	3,5	2	1	15	14	3,2		1,29	0,73
30	30	4	3,8	4	2	1	17	17	4,3		1,77	0,85
35	35	4,5	4,3	4,5	2,5	1	19	19	4,3		2,33	0,99
40	40	5	4,8	5	2,5	1	21	22	6,4		2,96	1,12
45	45	5,5	5,3	5,5	3	1,5	24	25	6,4		3,67	1,26
50	50	6	5,7	6	3	1,5	30	30	6,4		4,44	1,39
60	60	7	6,7	7	3,5	2	34	35	8,4		6,23	1,66
70	70	8	7,6	8	4	2	38	40	11		8,32	1,94
80	80	9	8,6	9	4,5	2	45	45	11		10,7	2,22
90	90	10	9,5	10	5	2,5	50	50	13		13,4	2,48
100	100	11	10,5	11	5,5	3	60	60	13		16,4	2,74
120	120	13	12,4	13	6,5	3	70	70	17		23,2	3,28
140	140	15	14,3	15	7,5	4	80	75	21		31,3	3,80

c

Tabela I.5: Especificações da cantoneira

CHAGAS

Cantoneira Abas Iguais



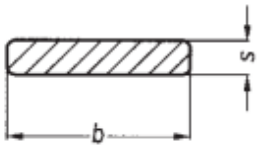
Norma Dimensional DIN 1028
(Euronorm 56)
Norma Material DIN 17100 / EN 10025

Dimensões L NP (abas iguais)							Massa	Posição do centro de gravidade			Flexão Momentos de inércia	
axe mm	r mm	r_1 mm	W_1 mm	W_2 mm	W_3 mm	Ø mm	p Kg/m	d cm	V_1 cm	Z_1 cm	$I_x=I_y$ cm⁴	I_z cm⁴
20x3	4	2	-	-	-	-	0,88	0,60	0,84	1,41	0,39	0,61
20x4	3,5	2	-	-	-	-	1,14	0,64	0,90	1,41	0,49	0,77
25x3	4	2	-	-	-	-	1,12	0,72	1,02	1,77	0,80	1,26
25x4	4	2	-	-	-	-	1,46	0,76	1,07	1,77	1,01	1,60
25x5	3,5	2	-	-	-	-	1,77	0,80	1,13	1,77	1,20	1,87
30x3	5	2,5	17	-	-	8,4	1,36	0,84	1,18	2,12	1,40	2,23
30x4	5	2,5	17	-	-	8,4	1,78	0,88	1,24	2,12	1,80	2,85
30x5	5	2,5	17	-	-	8,4	2,18	0,92	1,30	2,12	2,16	3,41
35x3,5	3,5	1,8	18	-	-	11	1,85	0,98	1,39	2,47	2,63	4,03
35x4	5	2,5	18	-	-	11	2,09	1,00	1,42	2,47	2,95	4,68
35x5	5	2,5	18	-	-	11	2,57	1,04	1,48	2,47	3,56	5,64
40x3	6	3	22	-	-	11	1,84	1,07	1,52	2,83	3,45	5,45
40x4	6	3	22	-	-	11	2,42	1,12	1,58	2,83	4,47	7,09
40x5	6	3	22	-	-	11	2,97	1,16	1,64	2,83	5,43	8,60
45x4	7	3,5	25	-	-	13	2,74	1,23	1,75	3,18	6,43	10,2
45x5	7	3,5	25	-	-	13	3,38	1,28	1,81	3,18	7,84	12,4
50x4	7	3,5	30	-	-	13	3,06	1,36	1,92	3,54	8,97	14,2
50x5	7	3,5	30	-	-	13	3,77	1,40	1,99	3,54	11,0	17,4
50x6	7	3,5	30	-	-	13	4,47	1,45	2,04	3,54	12,8	20,3
50x7	7	3,5	30	-	-	13	5,15	1,49	2,10	3,54	14,6	23,1
55x6	8	4	30	-	-	17	4,95	1,56	2,21	3,89	17,3	27,4
55x8	8	4	30	-	-	17	6,46	1,64	2,33	3,89	22,0	34,8

c

Tabela I.6: Especificações da barra

CHAGAS — **Barras Rectangulares**



Norma Dimensional DIN 1017 parte 1
(Euronorm 58)
Norma Material DIN 17100 / EN 10025

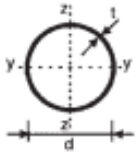
Largura (b)	Espessura (s)											
	3	5	6	6,5	7	8	9	10	11	12	13	14
	Massa - Kg/m											
10		0,393	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11		0,432	0,519	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	0,283	0,472	0,565	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13		0,511	0,613	0,664	0,715	0,817	0,920	-	-	-	-	-
14		0,550	0,660	-	0,770	0,880	-	-	-	-	-	-
15		0,590	0,707	0,825	0,943	-		1,18	-	-	-	-
16	0,377	0,629	0,755	0,817	0,880	1,01	1,13	1,26	1,38	-	-	-
17		0,668	0,802	-	0,935	1,07	-	-	1,47	-	-	-
18		0,707	0,849	0,920	0,990	1,13	1,27	1,41	1,56	-	-	-
19		0,747	0,896	-	1,05	1,19	1,34	-			1,94	
20	0,471	0,786	0,943	1,02	1,10	1,26	1,41	1,57	-	1,89	2,04	-
22		0,865	1,04	1,12	1,21	1,38	-	1,73	1,90	2,08	2,25	2,42
25	0,589	0,983	1,18	1,28	1,38	1,57	-	1,97		2,36	2,55	2,75
26		1,02	1,23	1,33	1,43	1,63	-	2,04		2,45	2,66	2,86
28		1,1	1,32	1,43	1,54	1,76	-	2,20	-	2,64	2,86	3,08
30	0,707	1,18	1,41	1,53	1,65	1,89	2,12	2,36	-	2,83	3,07	3,30
32		1,26	1,51	1,63	-	2,01		2,52		3,02	3,27	3,52
35		1,38	1,65	1,79	1,93	2,20	-	2,75	-	3,30	3,58	3,85
38		1,49	1,79	1,94	-	2,39	-	2,99	-	3,58	3,88	4,18
40		1,57	1,89	2,04	2,20	2,52	2,83	3,14	-	3,77	4,09	4,40
45		1,77	1,65	1,79	1,93	2,20	-	2,75	-	3,30	3,58	3,85
50		1,97	2,36	2,55	2,75	3,14	3,54	3,93	-	4,72	5,11	5,50
55		2,16	2,59	2,81	3,03	3,46	-	4,32	-	5,19	5,62	6,05
60		2,36	2,83	3,07	3,30	3,77	4,24	4,72	-	5,66	6,13	-
65		2,55	3,07	3,32	-	4,09	4,60	5,11	-	6,13	6,64	-
70		2,75	3,30	3,58	3,85	4,40	-	5,50	-	6,60	7,15	-
75		2,95	3,54	3,83	-	4,72	-	5,90	-	7,07	7,66	-
80		3,14	3,77	4,09	4,40	5,03	-	6,29	6,92	7,55	8,17	-
90		3,54	4,24	4,60	-	5,66	6,37	7,07	7,78	8,49	9,20	-
100		3,93	4,72	5,11	-	6,29	-	7,86	8,65	9,43	10,2	11,0
110		-	-	-	-	6,92	7,78	8,65	9,51	10,4	11,2	12,1
120		-	-	-	-	7,55	-	9,43	10,4	11,3	12,3	13,2
130		-	-	-	-	8,17	9,20	10,2	11,2	12,3	13,3	14,3
140		-	-	-	-	8,80	-	11,0	-	13,2	-	15,4
150		-	-	-	-	9,43	-	11,8	13,0	14,1	15,3	16,5
160												
200								15,70				
220												
250												

c

Tabela I.7: Especificações do tubo

CHAGAS

Tubo Estrutural Laminado a Quente
Redondo



Norma Dimensional - EN 10210-1
Material S355 J2 H

d mm	t mm	M Kg/m	A cm²	L cm⁴	i cm	Wel cm³	Wpl l en cm³	It cm⁴	Ct cm³	S m²/t
21,3	2,3	1,08	1,373	0,6286	0,6767	0,5902	0,8344	1,257	1,18	62,09
26,9	2,3	1,4	1,778	1,356	0,8735	1,008	1,396	2,713	2,017	60,56
33,7	2,6	1,99	2,54	3,093	1,103	1,835	2,521	6,185	3,671	53,09
33,7	2,9	2,2	2,806	3,357	1,094	1,992	2,759	6,714	3,984	48,06
33,7	4,0	2,93	3,732	4,19	1,06	2,487	3,55	8,38	4,973	36,14
33,7	5,0	3,54	4,508	4,783	1,03	2,838	4,16	9,565	5,677	29,92
42,4	2,6	2,55	3,251	6,464	1,41	3,049	4,124	12,93	6,099	52,2
42,4	2,9	2,82	3,599	7,056	1,4	3,328	4,533	14,11	6,657	47,15
42,4	3,2	3,09	3,941	7,62	1,391	3,594	4,928	15,24	7,189	43,06
42,4	4,0	3,79	4,825	8,991	1,365	4,241	5,92	17,98	8,482	35,16
42,4	5,0	4,61	5,875	10,46	1,334	4,932	7,035	20,91	9,864	28,88
42,4	6,3	5,61	7,145	11,99	1,296	5,657	8,294	23,99	11,31	23,75
42,4	8,0	6,79	8,646	13,48	1,249	6,359	9,638	26,96	12,72	19,63
48,3	2,6	2,93	3,733	9,777	1,618	4,048	5,436	19,55	8,097	51,78
48,3	2,9	3,25	4,136	10,7	1,608	4,431	5,985	21,4	8,861	46,73
48,3	3,2	3,56	4,534	11,59	1,599	4,797	6,52	23,17	9,595	42,63
48,3	4,0	4,37	5,567	13,77	1,573	5,701	7,871	27,54	11,4	34,72
48,3	5,0	5,34	6,802	16,15	1,541	6,689	9,416	32,31	13,38	28,42
48,3	6,3	6,53	8,313	18,74	1,502	7,761	11,2	37,48	15,52	23,25
48,3	8,0	7,95	10,13	21,37	1,453	8,85	13,16	42,74	17,7	19,08
60,3	2,6	3,7	4,713	19,65	2,042	6,519	8,662	39,31	13,04	51,2
60,3	3,2	4,51	5,74	23,47	2,022	7,784	10,44	46,94	15,57	42,04
60,3	4,0	5,55	7,075	28,17	1,996	9,344	12,7	56,35	18,69	34,11
60,3	5,0	6,82	8,687	33,48	1,963	11,1	15,33	66,95	22,21	27,78
60,3	6,3	8,39	10,69	39,49	1,922	13,1	18,45	78,97	26,19	22,58
60,3	8,0	10,3	13,14	45,99	1,871	15,25	22,05	91,99	30,51	18,36
60,3	10,0	12,4	15,8	51,95	1,813	17,23	25,63	103,9	34,46	15,27
76,1	2,6	4,71	6,004	40,59	2,6	10,67	14,05	81,18	21,34	50,73
76,1	3,2	5,75	7,329	48,78	2,58	12,82	17,02	97,56	25,64	41,56
76,1	4,0	7,11	9,06	59,06	2,553	15,52	20,81	118,1	31,04	33,61
76,1	5,0	8,77	11,17	70,92	2,52	18,64	25,32	141,8	37,28	27,27
76,1	6,3	10,8	13,81	84,82	2,478	22,29	30,78	169,6	44,58	22,05
76,1	8,0	13,4	17,12	100,6	2,424	26,44	37,27	201,2	52,87	17,79
76,1	10,0	16,3	20,77	116,0	2,364	30,49	44,03	232,0	60,98	14,67
76,1	12,0	19,0	24,17	128,5	2,306	33,76	49,88	256,9	67,52	12,6
88,9	3,2	6,76	8,616	79,21	3,032	17,82	23,51	158,4	35,64	41,3
88,9	4,0	8,38	10,67	96,34	3,005	21,67	28,85	192,7	43,35	33,35
88,9	5,0	10,3	13,18	116,4	2,972	26,18	35,24	232,7	52,36	27,00
88,9	6,3	12,8	16,35	140,2	2,929	31,55	43,07	280,5	63,1	21,76
88,9	8,0	16,0	20,33	168,0	2,874	37,79	52,53	335,9	75,58	17,5
88,9	10,0	19,5	24,79	196,0	2,812	44,09	62,59	392,0	88,18	14,35

c

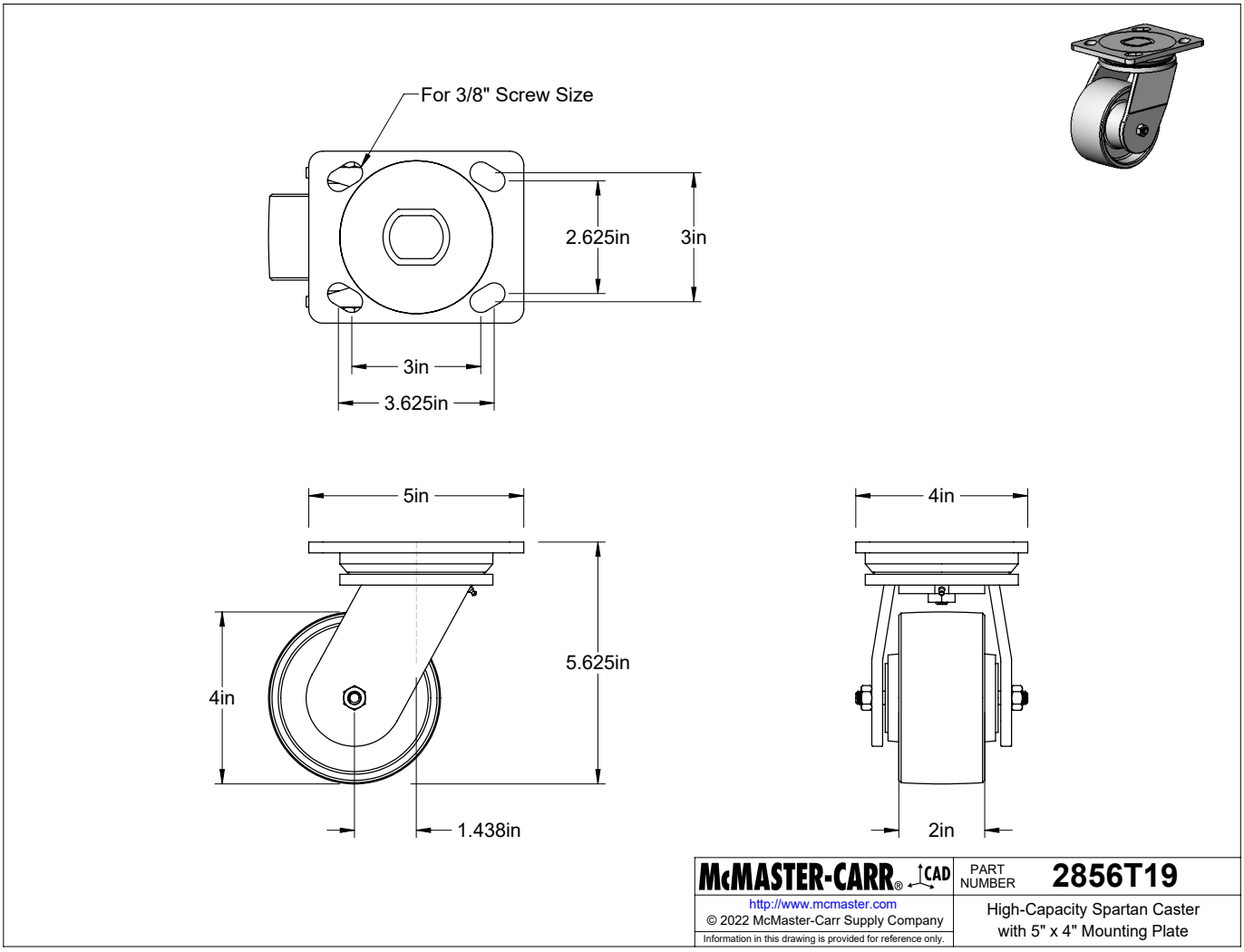


Figura I.11: Desenho técnico da rodas da frente

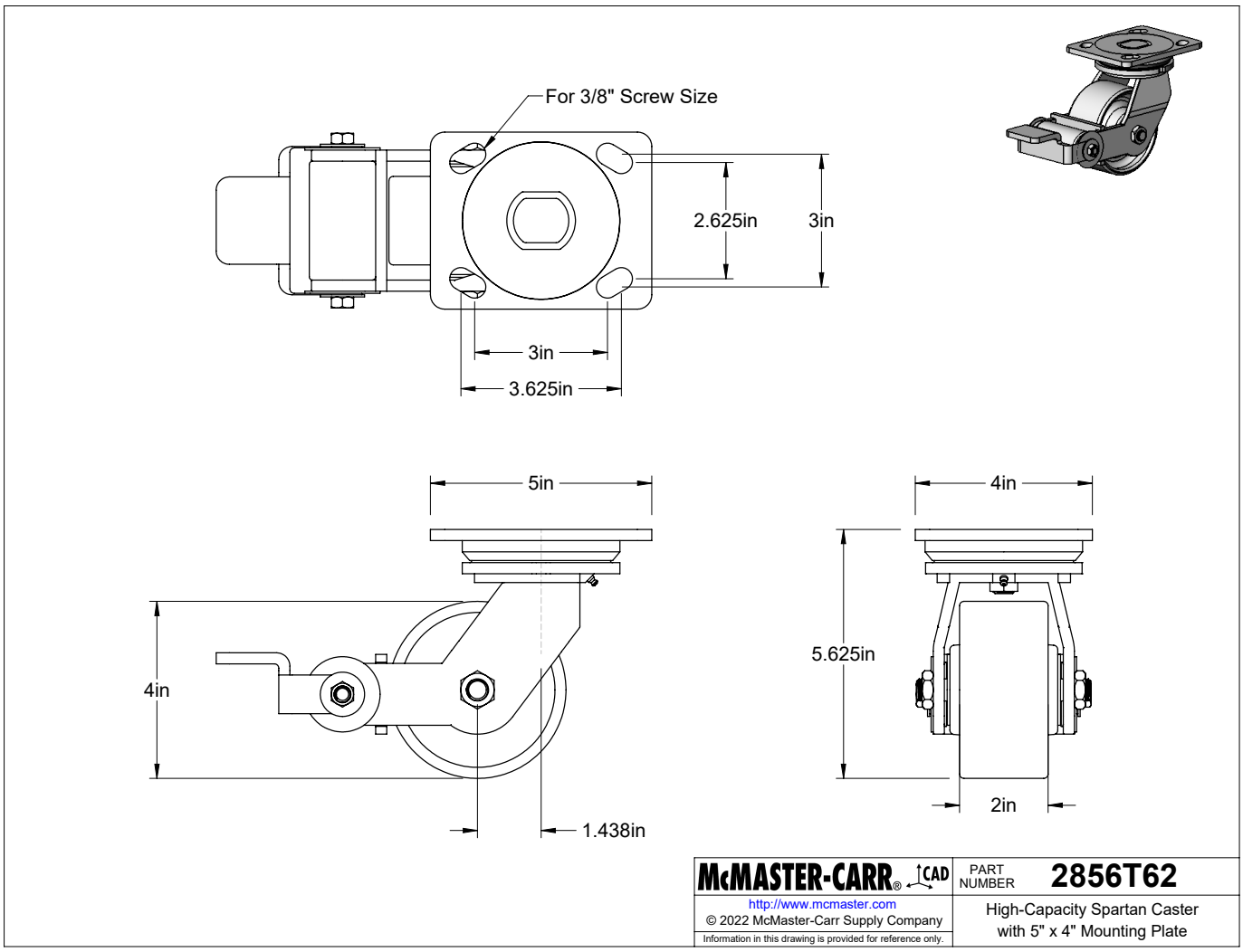


Figura I.12: WDesenho técnico da rodas de trás

