



Implementação de robôs para a paletização de painéis de porta numa empresa industrial

ANDRÉ FILIPE DA SILVA CORREIA

julho de 2021

IMPLEMENTAÇÃO DE ROBÔS PARA A PALETIZAÇÃO DE PAINÉIS DE PORTA NUMA EMPRESA INDUSTRIAL

André Filipe Silva Correia

1151430

2020/2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



IMPLEMENTAÇÃO DE ROBÔS PARA A PALETIZAÇÃO DE PAINÉIS DE PORTA NUMA EMPRESA INDUSTRIAL

André Filipe Silva Correia

1151430

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica – Ramo Construções Mecânicas, realizada sob a orientação do Professor Doutor Luís Pinto Ferreira e sob a coorientação do Professor Doutor Raul Gomes Campilho.

2020/2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Professora Doutora Marlene Ferreira de Brito

Professor Adjunto Convidado, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Professor Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira

Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Professor Doutor Manuel Gilberto Freitas Santos

Professor Adjunto com Agregação, Escola Superior de Design, Instituto Politécnico do Cávado e do Ave

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecer à empresa Simoldes Plásticos S.A. na pessoa do Eng. Manuel Silva, pela oportunidade de realizar a presente dissertação em contexto laboral.

Ao meu orientador do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Professor Doutor Luís Pinto Ferreira, e ao meu co-orientador, Professor Doutor Raul Campilho, pela prontidão na disponibilidade e por todo o apoio e incentivo prestado desde a fase inicial até ao término da presente dissertação.

Aos colaboradores da Simoldes Plásticos, nomeadamente a toda a equipa de engenharia de processo, pela ajuda e por todos os conhecimentos partilhados desde o primeiro dia na empresa.

À minha família e amigos, pelo apoio e confiança depositada na elaboração neste projeto. Assim como, pelo incentivo e motivação transmitido ao longo do percurso académico.

PALAVRAS-CHAVE

Paletização; robotização e automatização; projeto mecânico; método de elementos finitos; dimensionamento geométrico e tolerâncias; indústria automóvel.

RESUMO

Nos meados do século XX, a indústria automóvel inicializou a era da robotização e automatização das linhas de montagem. A automação e os robôs aparecem como solução a este problema, pois executam todos os movimentos configurados previamente de maneira igual e sem qualquer desgaste. Esta implementação na indústria traz às empresas maior produtividade pois reduzem o tempo de ciclo dum processo produtivo e reduzem gastos monetários em mão-de-obra humana.

Este trabalho tem como objetivos a robotização do processo produtivo de painéis de porta, reduzir a mão-de-obra humana, aumentar a produtividade em partes por colaborador e implementar um projeto fiável do ponto de vista económico. O processo resume-se à implementação de um robô colaborativo para a paletização de painéis de porta numa estrutura metálica, sendo projetado um suporte para o robô e a estrutura de paletização. Foi projetado um mecanismo, alojado à estrutura de paletização, que permite que esta rode após atingir metade da lotação. Um colaborador retira os painéis da estrutura e embala. Assim que o colaborador retirar todos os painéis e o robô paletizar metade da lotação novamente, a estrutura roda novamente, e assim sucessivamente.

Com este trabalho foi possível automatizar e robotizar o processo produtivo, implementando um robô colaborativo e um sistema de rotação automático. Permitted aumentar o dobro da produtividade em partes por colaborador, passando o colaborador a trabalhar em duas máquinas e não em apenas uma. Com este novo processo conseguiu-se reduzir três colaboradores tornando-se bastante vantajoso para a empresa pois reduz gastos com pessoal. Por fim, após uma análise financeira, o investimento feito neste projeto é reembolsado após um ano e dez meses, tornando-se bastante fiável e compensatório.

KEYWORDS

Palletizing; automation and robotics; mechanic project; finite element method; geometric dimensioning and tolerances; automotive industry.

ABSTRACT

In the beginnings of XX century, the automotive industry started the era of robotization and automation of assembly lines. Automation and robots appear as a solution to this problem, as they perform all previously configured movements equally and without any wear. Their implementation in industry, give companies greater productivity as they are capable of reduce production process time cycle and monetary expenses with human labor.

This work aims to robotize the production process of door panels, the reduction of human labour, as well as increasing productivity in parts per employee and the implementation of a reliable project from an economic point of view. The process consists in the implementation of a collaborative robot that palletizes door panels in a metallic structure, being design a support for the robot and the palletizing structure. Housed in the pelletizing structure, a mechanism was designed, which allows the structure to rotate after reaching half of its capacity. Then, an employee removes the panels and packs them. As soon as the employee removes all the panels and the robot palletizes half of its capacity again, the structure rotates again, and so on.

With this work, it was possible to automate and robotize the production process, implementing a collaborative robot and an automatic rotation system. It allowed to increase productivity twice in parts per employee, because the employee starts to work on two machines instead of one. This new process made possible to reduce three employees making it very beneficial for the company, as it reduces expenses with workforce. Finally, after a financial analysis, one year and six months are enough to refund the investment done by the company, making it very reliable and gratifying.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AFIA	Associação de Fabricantes para a Indústria Automóvel
AGV	<i>Automated Guided Vehicles</i>
AR	<i>Action-Research</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
GWM	<i>Great Wall Motors</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MEF	Método de Elementos Finitos
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
OICA	Organização Internacional de Construtores Automóveis
CG	Centro de Gravidade
DCL	Diagrama de Corpo Livre
CS	Coeficiente de Segurança

Lista de Unidades

Pa	Pascal
kg	Quilograma
s	Segundos
mm	Milímetro
rad	Radianos
N	Newton

Lista de Símbolos

$\%$	Porcentagem
€	Euro
$^{\circ}$	Graus centígrados
$\sigma_{F\text{ lim}}$	Tensão limite de flexão
m_n	Módulo normal
b	Largura
Y_F	Fator de forma
Y_{ϵ}	Fator de distribuição de carga
Y_{β}	Fator de ângulo de hélice
K_L	Fator de vida
K_V	Fator de carga dinâmica
K_O	Fator de sobrecarga
S_F	Fator de segurança
d	Diâmetro primitivo
$K_{H\beta}$	Fator distribuição de carga na face do dente
Z_H	Fator de zona
Z_M	Fator material
Z_{ϵ}	Fator da razão de condução
Z_{β}	Fator do ângulo de hélice
K_{HL}	Fator de vida
Z_L	Fator do lubrificante
Z_R	Fator da rugosidade superficial
Z_V	Fator da velocidade escorregamento
Z_W	Fator da razão de dureza
S_H	Fator de segurança

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - CICLO DE O'LEARY [ADAPTADO DE (KOSHY, 2005)].	3
FIGURA 2 - SIMOLDES PLÁSTICOS EM PORTUGAL (PLÁSTICOS, 2017).	4
FIGURA 3 - PRODUÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMÓVEIS EM CADA CONTINENTE (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURERS (OICA), 2020).	8
FIGURA 4 - DESTINO DAS EXPORTAÇÕES DOS COMPONENTES AUTOMÓVEIS (AICEP, 2016).	9
FIGURA 5 - COMPARAÇÃO DE MEF COM SOLUÇÃO EXATA (CAMPILHO, 2012).	12
FIGURA 6 - COMPARAÇÃO DOS TIPOS DE AUTOMAÇÃO (PROFELECTRO, N.D.).	16
FIGURA 7 - LINHA DE EMBALAMENTO (G. SANTOS, 2017).	17
FIGURA 8 - LINHA DE MONTAGEM (AGME, 2020).	18
FIGURA 9 - AGV DO TIPO EMPILHADOR (AGVE, 2020).	18
FIGURA 10 - AGV DO TIPO CARRO DE TRANSPORTE ((MIR), 2020).	19
FIGURA 11 - CÉLULAS DE MONTAGEM DE COMPONENTES (DIVMAC, 2020A).	20
FIGURA 12 - CÉLULA DE SOLDADURA POR ULTRASSONS (DIVMAC, 2020B).	20
FIGURA 13 - MESA VIBRATÓRIA (LUPATEC, 2020).	21
FIGURA 14 - LINHA DE MONTAGEM DA GWM (BÉLANGER-BARRETE, 2014).	21
FIGURA 15 - ROBÔ COLABORATIVO (CIM AUTOMAÇÃO, 2018).	22
FIGURA 16 – ROBÔ NÃO COLABORATIVO (SMART AUTOMAÇÃO E ROBOTICA, 2013).	22
FIGURA 17 - UTILIZAÇÃO DE ROBÔS NA PINTURA DE UM AUTOMÓVEL (ONLINE, 2015).	23
FIGURA 18 - ROBÔ COLABORATIVO NO PROCESSO DE PALETIZAÇÃO (FRANKLIN ET AL., 2020).	23
FIGURA 19 - LAYOUT DAS MÁQUINAS NA SEDE DE FÁBRICA (FORNECIDO PELA EMPRESA).	30
FIGURA 20 - LAYOUT DO POSTO DE TRABALHO.	30
FIGURA 21 - LAYOUT DO PROCESSO DE PRODUÇÃO OTIMIZADO.	32
FIGURA 22 - ROBÔ COLABORATIVO KR1805. (ROBOTS, 2020)	33
FIGURA 23 - POSSÍVEIS PONTOS DE PALETIZAÇÃO DO PAINEL FRENTE DIREITO.	35
FIGURA 24 - POSSÍVEIS PONTOS DE PALETIZAÇÃO DO PAINEL FRENTE ESQUERDO.	35
FIGURA 25 - POSSÍVEIS PONTOS DE PALETIZAÇÃO DO PAINEL TRASEIRO DIREITO.	36
FIGURA 26 - POSSÍVEIS PONTOS DE PALETIZAÇÃO DO PAINEL TRASEIRO ESQUERDO.	36
FIGURA 27 - ESBOÇO DA ESTRUTURA METÁLICA PARA PALETIZAÇÃO DOS PAINÉIS DE PORTA.	37

FIGURA 28 - ESBOÇO DA ESTRUTURA ROTATIVA: (A) ESTRUTURA ROTATIVA COMPLETA; (B) DETALHE DO DESLIZAMENTO DE ESFERAS.	39
FIGURA 29 - DETALHE DO TRANCAMENTO DA ESTRUTURA.	40
FIGURA 30 - PRIMEIRA VERSÃO DO SUPORTE ROBÔ.	41
FIGURA 31 - SEGUNDA VERSÃO DO SUPORTE ROBÔ SEM BASE DE TRABALHO.	42
FIGURA 32 - POSSÍVEIS PONTOS DE FIXAÇÃO DO PAINEL DIANTEIRO DIREITO NA BASE DE TRABALHO.	43
FIGURA 33 - POSSÍVEIS PONTOS DE FIXAÇÃO DO PAINEL DIANTEIRO ESQUERDO NA BASE DE TRABALHO.	43
FIGURA 34 - POSSÍVEIS PONTOS DE FIXAÇÃO DO PAINEL TRASEIRO DIREITO NA BASE DE TRABALHO.	44
FIGURA 35 - POSSÍVEIS PONTOS DE FIXAÇÃO DO PAINEL TRASEIRO ESQUERDO NA BASE DE TRABALHO.	44
FIGURA 36 - BASE DE TRABALHO PARA OS PAINÉIS DE PORTA.	45
FIGURA 37 - PAINEL FRENTE DIREITO NA BASE DE TRABALHO.	45
FIGURA 38 - PAINEL FRENTE ESQUERDO NA BASE DE TRABALHO.	45
FIGURA 39 - PAINEL TRASEIRO DIREITO NA BASE DE TRABALHO.	45
FIGURA 40 - PAINEL TRASEIRO ESQUERDO NA BASE DE TRABALHO.	45
FIGURA 41 - SEGUNDA VERSÃO DO SUPORTE ROBÔ.	46
FIGURA 42 - ESBOÇO FINAL DA ESTRUTURA METÁLICA PARA PALETIZAÇÃO DOS PAINÉIS DE PORTA.	47
FIGURA 43 - MÁXIMA DISTÂNCIA ENTRE SOLO E PAINEL.	48
FIGURA 44 - MOMENTO DE INÉRCIA DE PERFIS DE SECÇÃO RETANGULAR (VILAÇA, 2018).	49
FIGURA 45 - PORMENOR DO PERFIL UTILIZADO NA ESTRUTURA.	50
FIGURA 46 - REFORÇOS DA ESTRUTURA: (A) REFORÇO DO NÍVEL SUPERIOR; (B) REFORÇO SOLDADO NA ESTRUTURA; (C) REFORÇO DO NÍVEL INFERIOR E (D) REFORÇO SOLDADO NA ESTRUTURA.	51
FIGURA 47 - PORMENOR DOS TUBOS DE PTFE	51
FIGURA 48 - ESBOÇO FINAL DO SISTEMA ROTATIVO DA ESTRUTURA METÁLICA PARA PALETIZAÇÃO DOS PAINÉIS DE PORTA.	52
FIGURA 49 - BASE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO.	52
FIGURA 50 - BASE COM MONTAGEM DOS COMPONENTES.	53
FIGURA 51 - CORTE PARA A VISUALIZAÇÃO DO ENGRENAMENTO ENTRE CREMALHEIRA E PINHÃO.	54
FIGURA 52 - CORTE PARA VISUALIZAR BATENTE E SUPORTE DAS RODAS.	55
FIGURA 53 - CORTE PARA A VISUALIZAÇÃO DA LIGAÇÃO ENTRE O VEIO E A PATELA ROTATIVA.	56
FIGURA 54 - CHAPA PARA APERTO NA PATELA DE ROTAÇÃO E PERFIL PARA APERTO NA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO.	56

FIGURA 55 - CORTE DA MONTAGEM DA CHAPA AO PERFIL E ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO.	57
FIGURA 56 – VISTA EM CORTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO DA ESTRUTURA.	57
FIGURA 57 - ALTURA MÁXIMA DO SISTEMA DE ROTAÇÃO.	58
FIGURA 58 - DESNÍVEL ENTRE A RODA E BASE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO.	59
FIGURA 59 - ALINHAMENTO ENTRE O SISTEMA DE ROTAÇÃO E ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO.	59
FIGURA 60 - PRIMEIRA FASE DE ROTAÇÃO: (A) VISTA ISOMÉTRICA; (B) DETALHE PARA VISUALIZAR POSIÇÃO DOS CILINDROS.	60
FIGURA 61 - SEGUNDA FASE DE ROTAÇÃO: (A) VISTA ISOMÉTRICA; (B) DETALHE PARA VISUALIZAR POSIÇÃO DOS CILINDROS.	60
FIGURA 62 - TERCEIRA FASE DE ROTAÇÃO: (A) VISTA ISOMÉTRICA; (B) DETALHE PARA VISUALIZAR POSIÇÃO DOS CILINDROS.	61
FIGURA 63 - ÁBACO PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE FORMA (VILAÇA, 2010).	65
FIGURA 64 - FATOR DE VIDA (VILAÇA, 2010).	66
FIGURA 65 - FATOR DE CARGA DINÂMICA (VILAÇA, 2010).	67
FIGURA 66 - FATOR DE SOBRECARGA (VILAÇA, 2010).	67
FIGURA 67 - FATOR MATERIAL (VILAÇA, 2010).	69
FIGURA 68 - FATOR DE VIDA (VILAÇA, 2010).	69
FIGURA 69 - FATOR DO LUBRIFICANTE (VILAÇA, 2010).	70
FIGURA 70 - FATOR DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL (VILAÇA, 2010)	70
FIGURA 71 - FATOR DA VELOCIDADE DE ESCORREGAMENTO (VILAÇA, 2010).	71
FIGURA 72 - MOMENTOS DE INÉRCIA DA ESTRUTURA.	73
FIGURA 73 - ESQUEMA DO CÁLCULO DA FORÇA ATUANTE NO CILINDRO.	74
FIGURA 74 - FUNCIONAMENTO CILINDRO PNEUMÁTICO: (A) ÁREA ÚTIL NO AVANÇO; (B) ÁREA ÚTIL NO RECUO (MASTER TECNOLOGIA INDUSTRIAL, 2021).	75
FIGURA 75 - ÂNGULO DE CONTATO PARA OS ROLAMENTOS INDICADOS PELA SKF (SKF, 2017).	77
FIGURA 76 - SUPORTE DO ROBÔ COLABORATIVO COM TODOS OS ACESSÓRIOS.	78
FIGURA 77 - SUPORTE FINAL DO ROBÔ: (A) SUPORTE DO ROBÔ COM OS FUROS NECESSÁRIOS E ABERTURAS PARA TUBOS E FIOS ELÉTRICOS E (B) DETALHE DA SOLDADURA DO SUPORTE DO CONTROLADOR DO ROBÔ COLABORATIVO.	79
FIGURA 78 -MONTAGEM DA CHAPA: (A) CHAPA METÁLICA E (B) CHAPA APARAFUSADA NO SUPORTE DO ROBÔ.	80
FIGURA 79 - ENTREGA DO PAINEL ENTRE O ROBÔ SEPRO E ROBÔ COLABORATIVO.	80
FIGURA 80 - SUPORTE PARA SISTEMA DE SEGURANÇA.	81

FIGURA 81 - MONTAGEM DA PROTEÇÃO NO SUPORTE DO ROBÔ.	81
FIGURA 82 - CHAPA PARA APERTO DO SINÓPTICO.	82
FIGURA 83 - MONTAGEM DO SINÓPTICO NO SUPORTE DO ROBÔ.	82
FIGURA 84 -MÃO-PRESA PARA O ROBÔ COLABORATIVO.	82
FIGURA 85 – ENTREGA DO PAINEL TRASEIRO: (A) LADO FRONTAL DO PAINEL E (B) LADO TRASEIRO DO PAINEL.	83
FIGURA 86 - COMPARAÇÃO DOS PONTOS DE TRANSPORTE ENTRE LADO ESQUERDO E DIREITO, RESPECTIVAMENTE, DO PAINEL DIANTEIRO.	84
FIGURA 87 -PORMENOR DOS PONTOS DE TRANSPORTE DO PAINEL DIANTEIRO ESQUERDO: (A) CANTO SUPERIOR ESQUERDO; (B) CANTO SUPERIOR DIREITO E (C) PARTE INFERIOR.	84
FIGURA 88 - COMPARAÇÃO DOS PONTOS DE TRANSPORTE ENTRE LADO ESQUERDO E DIREITO, RESPECTIVAMENTE, DO PAINEL TRASEIRO.	85
FIGURA 89 - PORMENOR DOS PONTOS DE TRANSPORTE DO PAINEL TRASEIRO ESQUERDO: (A) CANTO SUPERIOR ESQUERDO; (B) CANTO SUPERIOR DIREITO E (C) PARTE INFERIOR DIREITO.	85
FIGURA 90 - CABEÇA DO ROBÔ COLABORATIVO.	86
FIGURA 91 - MÃO-PRESA PARA O ROBÔ COLABORATIVO.	86
FIGURA 92 - VENTOSA NORMALIZADA.	87
FIGURA 93 - DISTÂNCIA DO CG DO PAINEL DIANTEIRO AO TUBO DE PALETIZAÇÃO DIREITO.	88
FIGURA 94 - DCL PARA CÁLCULO DE FORÇAS ATUANTES NOS TUBOS DE PALETIZAÇÃO.	89
FIGURA 95 -CONDIÇÕES FRONTEIRA PARA ANÁLISE DA ESTRUTURA METÁLICA.	89
FIGURA 96 – COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES MÁXIMO PRESENTE NA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: (A) TESTE 1; (B) TESTE 2 E (C) TESTE 3.	91
FIGURA 97 – COMPARAÇÃO DO DESLOCAMENTO RESULTANTE MÁXIMO PRESENTE NA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: (A) TESTE 1; (B) TESTE 2 E (C) TESTE 3.	92
FIGURA 98 - COMPARAÇÃO DO CS MIN. PRESENTE NA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: (A) TESTE 1; (B) TESTE 2 E (C) TESTE 3.	93
FIGURA 99 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES MÁXIMA PRESENTE NA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: (A) TESTE 1; (B) TESTE 2 E (C) TESTE 3.	94
FIGURA 100 – COMPARAÇÃO DO DESLOCAMENTO OBTIDO MÁXIMO PRESENTE NA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: (A) TESTE 1; (B) TESTE 2 E (C) TESTE 3.	95
FIGURA 101 - COMPARAÇÃO DO CS MÍNIMO PRESENTE NA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: (A) TESTE 1; (B) TESTE 2 E (C) TESTE 3.	96
FIGURA 102 - POSIÇÃO DE TRABALHO CRÍTICA DO ROBÔ COLABORATIVO: (A) VISTA ISOMÉTRICA E (B) VISTA FRONTAL.	97

FIGURA 103 - CARGAS REMOTAS APLICADAS NO SUPORTE DO ROBÔ COLABORATIVO.	98
FIGURA 104 – COMPARAÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES MÁXIMA PRESENTE NO SUPORTE DO ROBÔ: (A) TESTE 1; (B) TESTE 2 E (C) TESTE 3.	100
FIGURA 105 - COMPARAÇÃO DO DESLOCAMENTO MÁXIMO OBTIDO PRESENTE NO SUPORTE DO ROBÔ: (A) TESTE 1; (B) TESTE 2 E (C) TESTE 3.	101
FIGURA 106 - COMPARAÇÃO DO CS MIN. PRESENTE NO SUPORTE DO ROBÔ: (A) TESTE 1; (B) TESTE 2; (C) TESTE 3.	102
FIGURA 107 – CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA METÁLICA: (A) MONTAGEM DAS DUAS BASES, HORIZONTAL E VERTICAL E (B) PORMENOR DOS FUROS EXISTENTES NA ESTRUTURA PARA ACOPLAR TUBOS DE PALETIZAÇÃO.	106
FIGURA 108 -CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA METÁLICA: (A) MONTAGEM DOS TUBOS PARA PALETIZAÇÃO E (B) DETALHE DOS FUROS PARA APERTO DAS RODAS.	106
FIGURA 109 -CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA METÁLICA: (A) MONTAGEM DOS REFORÇOS DOS TUBOS E (B) DETALHE DOS REFORÇOS.	107
FIGURA 110 - PRIMEIRO PROCESSO DA BASE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: (A) CHAPA DA BASE E (B) DETALHE DO RASGO PARA O ROLAMENTO.	108
FIGURA 111 - SEGUNDO PROCESSO DA BASE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO.	108
FIGURA 112 - TERCEIRO PROCESSO DA BASE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO.	109
FIGURA 113 - QUARTO E ÚLTIMO PROCESSO DA BASE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO.	109
FIGURA 114 - MONTAGEM DE COMPONENTES NA BASE: (A) CILINDRO PNEUMÁTICO, BATENTES E PERFIL EM L E (B) PERFIL EM L PARA APERTO DAS RODAS.	110
FIGURA 115 - COLOCAÇÃO DO ROLAMENTO E DUAS CHAPAS COM BORRACHAS.	110
FIGURA 116 - MONTAGEM DAS CHAPAS DE BLOQUEIO DA CREMALHEIRA, CREMALHEIRA E ROLAMENTO.	111
FIGURA 117 - MONTAGEM DO VEIO NA BASE: (A) VEIO COM CHAVETA E PINHÃO E (B) VEIO MONTADO NA BASE.	111
FIGURA 118 - MONTAGEM DA TAMPA PARA FIXAÇÃO DA CREMALHEIRA.	112
FIGURA 119 – MONTAGEM DO ROLAMENTO: (A) VISTA ISOMÉTRICA; (B) DETALHE DO ENCAIXE DO ROLAMENTO E ANEL ELÁSTICO.	112
FIGURA 120 - MONTAGEM DA PATELA DE ROTAÇÃO: (A) PATELA DE ROTAÇÃO E (B) MONTAGEM DA PATELA NO SISTEMA DE ROTAÇÃO.	113
FIGURA 121 - CHAPA DE PROTEÇÃO.	113
FIGURA 122 - CHAPA DE APERTO NA PATELA DE ROTAÇÃO.	114
FIGURA 123 - PERFIL PARA FIXAÇÃO DO SISTEMA DE ROTAÇÃO À ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO.	114
FIGURA 124 – PRIMEIRA FASE DA CONSTRUÇÃO DO SUPORTE DO ROBÔ COLABORATIVO.	115

FIGURA 125 - SEGUNDA FASE DA CONSTRUÇÃO DO SUPORTE DO ROBÔ COLABORATIVO.	116
FIGURA 126 - CHAPA PARA APERTO QUADRO ELÉTRICO E SISTEMA PNEUMÁTICO.	116
FIGURA 127 - PROTEÇÃO DO SISTEMA DE SEGURANÇA: (A) FASE 1; (B) FASE 2; (C) FASE 3 E (D) FASE 4.	117
FIGURA 128 - MÃO-PRESA DO ROBÔ COLABORATIVO.	118
FIGURA 129 - SISTEMA DE SEGURANÇA IMPLEMENTADO NO PROCESSO (DATALOGIC, 2021).	118
FIGURA 130 - ZONA GERAL DE SEGURANÇA.	119
FIGURA 131 - ZONAS DE SEGURANÇA PROGRAMADAS.	120
FIGURA 132 - MONTAGEM DOS COMPONENTES DA LIMPEZA DO AR COMPRIMIDO.	122
FIGURA 133 - MONTAGEM DA PRODUÇÃO E CONTROLO DE VÁCUO.	123

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - QUANTIDADE DE VEÍCULOS PRODUZIDOS ANUALMENTE A NÍVEL MUNDIAL (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURERS (OICA), 2020).	7
TABELA 2 - QUANTIDADE DE VEÍCULOS PRODUZIDOS ANUALMENTE A NÍVEL NACIONAL (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURERS (OICA), 2020).	8
TABELA 3 - REVISÃO DA LITERATURA DE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS.	24
TABELA 4 - DIMENSÕES DOS PAINÉIS DE PORTA.	34
TABELA 5 - CONDIÇÕES NO PROJETO DA ESTRUTURA METÁLICA.	38
TABELA 6 - DADOS NECESSÁRIOS PARA ESTUDO DE ERGONOMIA.	48
TABELA 7 - PARÂMETROS PRETENDIDOS PARA O PINHÃO.	61
TABELA 8 - PARÂMETROS FUNDAMENTAIS PARA O PINHÃO.	62
TABELA 9 - PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DA CREMALHEIRA.	63
TABELA 10 - MASSA E CARGA MÁXIMA APLICADA NO VEIO DO SISTEMA DE ROTAÇÃO.	76
TABELA 11 - DADOS DAS MALHAS PARA A ESTRUTURA METÁLICA.	90
TABELA 12 - DISTÂNCIAS DAS CARGAS REMOTAS APLICADAS À ORIGEM DO SUPORTE.	98
TABELA 13 - DADOS DAS MALHAS PARA SUPORTE DO ROBÔ.	99
TABELA 14 - ESCOLHA DO MATERIAL PARA O SUPORTE DO ROBÔ COLABORATIVO.	103
TABELA 15 - ESCOLHA DO MATERIAL PARA A ESTRUTURA METÁLICA PARA PALETIZAÇÃO DOS PAINÉIS DE PORTA.	103
TABELA 16 - ESCOLHA DO MATERIAL PARA O SISTEMA ROTATIVO DA ESTRUTURA METÁLICA.	104
TABELA 17 - ESCOLHA DO MATERIAL PARA A MÃO-PRESA DO ROBÔ COLABORATIVO.	105
TABELA 18 - COMPONENTES DA LIMPEZA DO AR COMPRIMIDO.	121
TABELA 19 - COMPONENTES DA PRODUÇÃO E CONTROLO DE VÁCUO.	122
TABELA 20 - COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO.	125
TABELA 21 - CUSTO ESTIMADO PARA CADA TIPO DE OPERAÇÃO.	127
TABELA 22 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0101.	128
TABELA 23 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0102.	128
TABELA 24 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0103.	129
TABELA 25 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0104.	129
TABELA 26 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0105.	130

TABELA 27 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0106.	130
TABELA 28 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0107.	131
TABELA 29 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0108.	131
TABELA 30 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0109.	132
TABELA 31 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0110.	132
TABELA 32 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0111.	133
TABELA 33 - CUSTO DO COMPONENTE DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO: 0112.	133
TABELA 34 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0201.	134
TABELA 35 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0202.	134
TABELA 36 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0203.	135
TABELA 37 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0204.	135
TABELA 38 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0205.	136
TABELA 39 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0206.	136
TABELA 40 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0207.	137
TABELA 41 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0208.	137
TABELA 42 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0209.	138
TABELA 43 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0210.	138
TABELA 44 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0211.	139
TABELA 45 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0212.	139
TABELA 46 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0213.	140
TABELA 47 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0214.	140
TABELA 48 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0215.	141
TABELA 49 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0216.	141
TABELA 50 - CUSTO DO COMPONENTE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO: 0217.	142
TABELA 51 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0301.	142
TABELA 52 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0302.	143
TABELA 53 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0303.	143
TABELA 54 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0304.	144
TABELA 55 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0305.	144
TABELA 56 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0306.	145
TABELA 57 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0307.	145

TABELA 58 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0308.	146
TABELA 59 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0309.	146
TABELA 60 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0310.	147
TABELA 61 - CUSTO DO COMPONENTE DO SUPORTE DO ROBÔ: 0311.	147
TABELA 62 - CUSTO DA MÃO-PRESA DO ROBÔ COLABORATIVO: 0401	148
TABELA 63 - ORÇAMENTO DE TODAS AS PEÇAS FABRICADAS.	149
TABELA 64 - ORÇAMENTO PARA TODOS OS COMPONENTES DE COMPRA.	150
TABELA 65 -ORÇAMENTO PARA A MONTAGEM DA ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO, SISTEMA DE ROTAÇÃO E SUPORTE DO ROBÔ.	152
TABELA 66 - ORÇAMENTO FINAL.	153
TABELA 67 – ESTIMATIVA DO GASTO COM UM COLABORADOR À EMPRESA.	153
TABELA 68 - ANÁLISE DO CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS INICIALMENTE PROPOSTOS.	158

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Metodologia de investigação	2
1.4	Empresa de acolhimento	3
1.5	Conteúdo e organização da dissertação	4
2	REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	Indústria automóvel	7
2.1.1	Importância da indústria automóvel a nível mundial	7
2.1.2	Importância da indústria automóvel a nível nacional	8
2.1.3	Indústria de componentes para automóveis em Portugal	9
2.2	Projeto de estruturas metálicas	10
2.2.1	Materiais utilizados	10
2.2.2	Soluções para máquinas em ambiente industrial	10
2.2.3	Ligações	11
2.2.4	Modelação numérica	11
2.2.4.1	Método de elementos finitos	11
2.2.4.2	Princípios básicos	12
2.3	Automação e robotização de sistemas industriais	13
2.3.1	Automação vs. Robótica	13
2.3.2	Sistemas de automação	14
2.3.2.1	Sistemas de apoio à produção manual	15
2.3.2.2	Sistemas semiautomáticos	15
2.3.2.3	Sistemas automáticos	15
2.3.2.4	Sistemas robotizados	17
2.3.3	Soluções baseadas na automação	17

2.3.4	Soluções baseadas na robotização	21
2.3.5	Sistemas de robótica no processo de paletização	23
2.3.6	Estado da arte na automação de processos	24
3	IMPLEMENTAÇÃO DE ROBÔS PARA A PALETIZAÇÃO DE PAINÉIS DE PORTA	29
3.1	Caraterização do produto	29
3.2	Caraterização do processo	29
3.3	Caraterização do problema	31
3.4	Caraterização da solução ao problema	31
3.5	Caraterização do robô colaborativo	33
3.6	Anteprojeto	34
3.6.1	Estrutura metálica para paletização	34
3.6.2	Sistema rotativo da estrutura metálica	38
3.6.3	Suporte para robô colaborativo	40
3.7	Projeto	46
3.7.1	Estrutura metálica para paletização	46
3.7.2	Sistema rotativo da estrutura metálica	51
3.7.2.1	Dimensionamento das rodas dentadas	61
3.7.2.1.1	Razão de condução	64
3.7.2.1.2	Resistência à flexão	64
3.7.2.1.3	Resistência à pressão superficial	68
3.7.2.1.4	Discussão dos resultados	72
3.7.2.2	Dimensionamento do cilindro pneumático	72
3.7.2.3	Dimensionamento dos rolamentos	76
3.7.3	Suporte para robô colaborativo	78
3.7.4	Mão-presa para robô colaborativo	82
3.7.5	Análise de Elementos Finitos	87
3.7.5.1	Estrutura metálica para paletização	87
3.7.5.2	Suporte para robô colaborativo	97
3.7.6	Escolha de materiais	102

3.7.7	Processos de fabrico.....	105
3.7.8	Sistema de segurança.....	118
3.7.9	Sistema pneumático.....	120
3.7.10	Quadro elétrico.....	124
3.8	Análise financeira do projeto.....	127
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	157
4.1	CONCLUSÕES.....	157
4.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	159
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	163
6	ANEXOS.....	171
6.1	Anexo A.....	171
6.2	Anexo B.....	175
6.3	Anexo C.....	179
6.4	Anexo D.....	183
6.5	Anexo E.....	189
6.6	Anexo F.....	193
6.7	Anexo G.....	197

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

1.4 EMPRESA DE ACOLHIMENTO

1.5 CONTEUDO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

No âmbito da unidade curricular Dissertação/Projeto/Estágio, do Mestrado em Engenharia Mecânica, no ramo Construções Mecânicas pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), exibo a minha dissertação de mestrado, que decorreu no período de Outubro de 2020 a Maio de 2021. Foi-me proposto a realização de um estágio, numa empresa de fabrico de componentes automóveis através da injeção de plástico. O trabalho foi desenvolvido em parceria com a empresa durante um período de oito meses, acompanhado pelo Sr. Eng^o Manuel Silva por parte da empresa, que definiu as premissas iniciais e auxiliou na procura das soluções.

1.1 Contextualização

Os métodos de industrialização e informação avançam em grande escala para o desenvolvimento de uma nova geração da indústria, denominada por Indústria 4.0. A industrialização na nova geração da indústria revolucionou a forma como as empresas industriais funcionam e trabalham, implementando novas técnicas como, a computação numa nuvem global e a robotização do processo produtivo (Vaidya et al., 2018).

A procura, por parte da indústria, de máquinas e robôs têm vindo a aumentar significativamente visto a serem robustos, rápidos, flexíveis e com grande precisão, podendo ser mais produtivos e com melhor qualidade por um custo menor que a mão-de-obra humana (Vysocky & Novak, 2016). Os robôs colaborativos, apenas com uma pré-configuração, são capazes de efetuar as tarefas atribuídas a um ser humano devido à sua flexibilidade garantindo sempre a segurança dos que o rodeia (Djuric et al., 2016).

Neste clima a que a indústria se encontra é imprescindível o avanço na robotização do processo produtivo. Posto isto, este trabalho pretende a robotização de um processo produtivo de painéis de porta, substituindo a mão-de-obra humana por um robô colaborativo capaz de efetuar o processo da mesma maneira, com mais rapidez, eficácia e mais qualidade.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é otimizar um processo de produção de painéis de porta através da automatização/robotização do processo. A melhoria consiste em desenvolver uma estrutura metálica, nomeada de *rack*, para a paletização dos painéis de porta por parte de um robô colaborativo, reduzindo a mão-de-obra humana e aumentando a produtividade em partes por colaborador.

O robô colaborativo deverá trabalhar junto dos operários fabris, assegurando a segurança devida dos mesmos, realizando movimentos elevatórios e rotativos e transportando cargas máximas de 5 kg. Consequentemente, será necessária a conceção de uma estrutura de apoio para o robô colaborativo.

Portanto, com este trabalho, espera-se otimizar o processo produtivo e os recursos humanos, face a um aumento da produtividade em partes por colaborador e garantir um projeto fiável no ponto de vista económico.

1.3 Metodologia de investigação

A metodologia adotada para desenvolver o trabalho é baseada no método *Action-Research* (AR). Este método define-se pela relação entre a pesquisa e as ações destas resultantes, permitindo testar a teoria na organização, recolher o *feedback* e adaptar a teoria (French, 2009). De acordo com (Susman & Evered, 1978) a metodologia AR pode ser implementada através de um ciclo constituído por quatro fases principais:

- **Diagnóstico.** Identificação e definição do problema.
- **Planeamento de ações.** Definição da estratégia das medidas a ser implementadas para resolver o problema.
- **Implementação de ações.** Aplicação das ações planeadas anteriormente.
- **Avaliação.** Estudo das consequências e resultados das ações implementadas.

Este método é validado e refutado consoante as ações efetuadas na resolução do problema, sendo realizada uma análise ao sucesso das medidas implementadas com base nos resultados obtidos (Machado & Editors, 2020).

Na Figura 1 é possível visualizar o ciclo de O’Leary que, de um modo geral, é o ciclo da implementação do método AR, passando por uma fase de observação, reflexão, planeamento e de ação.

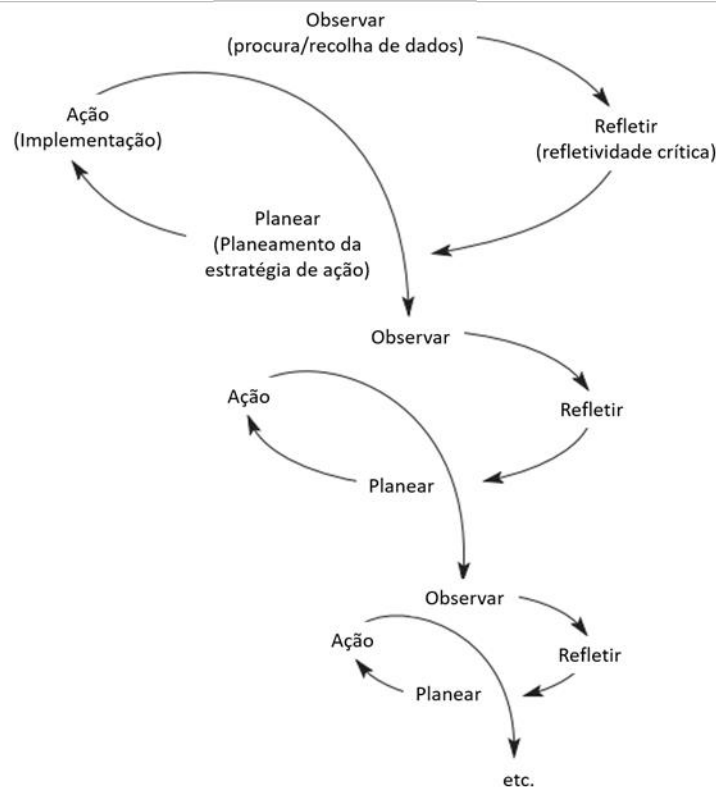


Figura 1 - Ciclo de O'Leary [adaptado de (Koshy, 2005)].

Neste modelo os ciclos podem convergirem para uma melhor compreensão da situação e implementação de ações melhoradas. O objetivo é refinar continuamente os métodos, dados e interpretação à luz da compreensão desenvolvida nos ciclos anteriores (Koshy, 2005).

Esta metodologia pode ser utilizada em diversas indústrias: automóvel, na melhoria da receção e posicionamento de materiais num armazém (Mourato et al., 2020); plástico, na implementação de ferramentas *Lean* em dois produtos (Ribeiro et al., 2019); metalúrgica, na eliminação do desperdício e aumento da produtividade (Monteiro et al., 2019).

1.4 Empresa de acolhimento

Em 1959, o Grupo Simoldes foi criado com a Simoldes Aços sendo dedicada à fabricação de moldes de injeção para a indústria de plásticos. Atualmente, o Grupo Simoldes é o maior fabricante europeu de moldes de aço e um dos maiores produtores de componentes plásticos para automóveis, sendo organizado em duas grandes áreas: a divisão de moldes e ferramentas e a divisão de plásticos.

Em 1980, o Grupo Simoldes dá origem à divisão de plásticos com a abertura da empresa Simoldes Plásticos (Figura 2), situada em Oliveira de Azeméis e liderada pelo Sr. António da Silva Rodrigues, focada no fabrico de componentes para automóveis, nomeadamente

peças injetadas em plástico (Freitas, 2018). Ao longo dos anos, o Grupo Simoldes foi aumentando, abrindo novas empresas noutros países, tais como Brasil, França, Polónia, República Checa e mais recentemente, em Marrocos, investindo cerca de 55 milhões de euros criando 300 postos de trabalho (Aveiro, 2016).



Figura 2 - Simoldes Plásticos em Portugal (Plásticos, 2017).

A Simoldes Plásticos fabricam componentes automóveis para as principais *Original Equipment Manufacturer* (OEM), nomeadamente o Grupo Volkswagen, Grupo PSA, Ford, Renault, etc (Freitas, 2018).

1.5 Conteúdo e organização da dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em 4 partes abordando todos os aspetos necessários para o desenvolvimento do projeto. Numa primeira fase é feita uma caracterização do processo anterior, abordando o produto e o processo. Após uma análise, faz-se o levantamento do problema e decide-se a solução ao mesmo.

Numa segunda fase é feito o anteprojecto da solução ao problema, analisando as possibilidades para a estrutura de paletização dos painéis de porta, para o sistema de rotação e para o suporte do robô colaborativo.

Numa terceira fase é feito o projeto da solução final da estrutura de paletização, do sistema de rotação, dimensionando as engrenagens, cilindros pneumáticos e rolamentos, do suporte do robô e, por fim, da mão-presa do robô. Posto isto é feita uma análise de elementos finitos da estrutura de paletização e do suporte do robô.

Feita esta análise, escolheu-se os materiais e processos de fabrico. Analisou-se o sistema de segurança do processo e ainda, de forma superficial, o sistema pneumático e elétrico salientando os componentes imprescindíveis para o processo.

Finalmente é feita uma análise financeira do projeto com o intuito de conhecer a fiabilidade do mesmo.

2. REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

2.2 PROJETO DE ESTRUTURAS METÁLICAS

2.3 AUTOMAÇÃO E ROBOTIZAÇÃO DE SISTEMAS INDUSTRIAIS

2.4 ANÁLISE E MELHORIA DE PROCESSOS

2 REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Indústria automóvel

Os veículos tornaram-se um bem essencial na vida dos cidadãos e a sua produção é cada vez maior. Neste momento, as empresas precisam de satisfazer as necessidades dos clientes relativamente a grandes quantidades num curto espaço de tempo e, assim sendo, as empresas procuram formas de aumentar a sua produtividade e gastar o menos possível.

2.1.1 Importância da indústria automóvel a nível mundial

O automóvel é cada vez mais útil na sociedade em geral tornando-se um elemento-chave para a mobilidade dos cidadãos. Nos dias de hoje, esta importância, reflete-se numa produção em massa, tal como se vê na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade de veículos produzidos anualmente a nível mundial (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA), 2020).

	2016	2017	2018	2019
Veículos ligeiros de passageiros	72.388.433	73.456.531	71.750.946	67.149.196
Veículos comerciais	18.825.876	19.387.815	20.634.836	20.223.655
Total	91.214.309	92.844.346	92.385.782	87.372.851

De acordo com os dados da Organização Internacional de Construtores Automóveis (OICA), como é possível visualizar na Tabela 1, o ano em que se produziu mais veículos foi o de 2017 produzindo 92 844 346 veículos representando um aumento de 1,75% relativamente ao ano anterior. A partir do ano 2017 a produção diminui até ao ano de 2019 em cerca de 6,26%. Relativamente aos veículos ligeiros de passageiros, o decréscimo foi cerca de 6,85% entre os anos de 2018 e 2019. Ao longo dos últimos quatro anos, a produção de veículos comerciais tem vindo a aumentar, mas ainda assim a sua produção é cerca de 27,77% menor que de veículos ligeiros de passageiros.

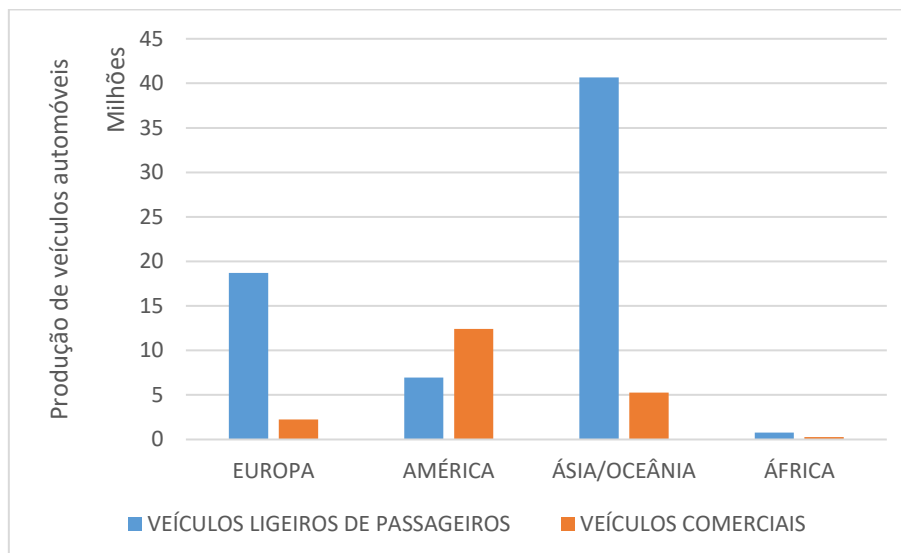


Figura 3 - Produção de veículos automóveis em cada continente (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA), 2020).

A Figura 3 evidencia a produção de veículos ligeiros de passageiros e veículos comerciais nos diversos continentes no ano de 2019. A Ásia/Oceânia é responsável pela produção em massa de veículos ligeiros de passageiros, sendo mais do dobro que a segunda maior produtora, a Europa. Os dois grandes produtores na Ásia são os chineses e japoneses, visto que são países com grande mobilidade e população e têm de ser capazes de responder às necessidades da população. Quanto à produção de veículos comerciais, a América é responsável pela maior produção. A produção em África, como se vê, é uma parte muito pequena na produção mundial de veículos automóvel, sendo cerca de um milhão por ano.

2.1.2 Importância da indústria automóvel a nível nacional

Em Portugal, a indústria automóvel é considerada um pilar fundamental para a economia portuguesa, contribuindo fortemente para a criação de emprego e para o Produto Interno Bruto (PIB) nacional (AICEP, 2016). O setor automóvel é caracterizado como sendo um setor suscetível a flutuações do ciclo económico visto que está sujeito às necessidades e capacidades dos consumidores e empresários.

Tabela 2 - Quantidade de veículos produzidos anualmente a nível nacional (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA), 2020).

	2016	2017	2018	2019
Veículos ligeiros de passageiros	99.200	126.426	234.151	282.142
Veículos comerciais	39.712	42.816	54.881	58.141
Total	138.912	169.242	289.032	340.283

De acordo com os dados da OICA, Tabela 2, a produção de veículos automóveis em Portugal tem vindo a aumentar ao longo dos anos. Em 2019 a sua produção foi mais do dobro que a produção no ano de 2016, sendo que entre os anos de 2018 e 2017 existiu um aumento significativo na produção de cerca 41,44%. Estes resultados demonstram que a indústria automóvel em Portugal está a aumentar cada vez mais tornando-se, como dito anteriormente, um setor muito importante para a economia portuguesa.

A indústria automóvel estando em grande crescimento deve ser considerado como um setor prioritário para o país, devendo ser elaborada uma estratégia para o seu desenvolvimento definindo metas e objetivos a medio e longo prazo (AICEP, 2016).

Segundo (Ascensão, 2017), a indústria automóvel não se baseia apenas no valor das exportações de veículos automóveis e seus componentes mas, também está relacionada com o facto de existir um grupo de setores da indústria transformadora, como o setor metalúrgico e dos moldes, fabrico de pneus ou até fabrico de componentes em borracha e plástico.

2.1.3 Indústria de componentes para automóveis em Portugal

Em Portugal, a indústria automóvel insere-se em três grandes pilares: o fabrico de moldes, fabrico de componentes automóveis e o fabrico de veículos automóveis. Segundo a Associação de Fabricantes para a Indústria Automóvel (AFIA), a produção de componentes automóveis é a que tem mais peso na indústria automóvel integrando cerca de 200 empresas criando, aproximadamente, 42.000 postos de trabalho (AICEP, 2016). Só para termos uma ideia, a indústria automóvel em Portugal em termos globais, é responsável por um volume de negócios de 6,5 mil milhões de euros.

Segundo (AICEP, 2016), o setor do fabrico de componentes para veículos automóveis é o setor que mais peso tem sobre as exportações, registando no ano de 2015, cerca de 6.700 milhões de euros, apresentando um crescimento de 7%.

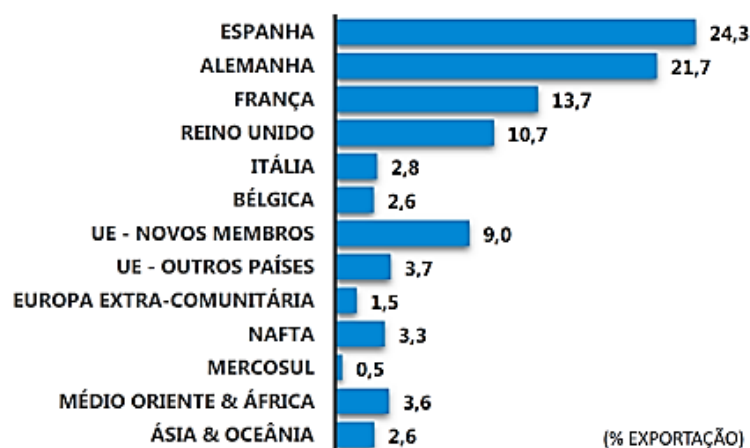


Figura 4 - Destino das exportações dos componentes automóveis (AICEP, 2016).

Pela Figura 4, no ano de 2015, a grande parte das exportações era para o mercado europeu, nomeadamente para países com conceituadas fábricas produtoras de veículos automóveis, tal como a Volkswagen e PSA Peugeot Citroen, sediadas respetivamente na Alemanha e França.

2.2 Projeto de estruturas metálicas

2.2.1 Materiais utilizados

Em projeto de estruturas metálicas, os materiais mais optados são o aço e alumínio, sendo o aço usado em maior quantidade devido ao seu comportamento em termos mecânicos, a nível de tensões e deformações.

Os aços recomendados no Eurocódigo (NP EN 1993-1-8, 2010) para as construções mecânicas são os aços estruturais, nomeadamente o S235, S275 e S355. Estes têm propriedades Aço Carbono / Manganês para construções metálicas em diversas aplicações garantindo uma tensão de cedência e de rotura mínimas. O aço é assim o eleito para a maioria dos projetos mecânicos pois apresentam uma alta tensão de cedência, uma elevada rigidez e um baixo custo. Caso o aço não for tratado termicamente contra a corrosão, este apresenta grande facilidade de oxidação, podendo recorrer a pintura, galvanização ou zincagem para proteção do material (Savira & Suharsono, 2013). Algumas indústrias optam por aços inoxidáveis para que a resistência à corrosão seja maior e não precisar de ser tratado.

Ao longo dos últimos anos, a utilização de ligas de alumínio como material estrutural tem vindo aumentar devido às suas propriedades mecânicas, como a sua relação peso-resistência, fácil de fabricar, excelente condutividade térmica e excelente resistência à corrosão (Georgantzia et al., 2021). O problema da utilização do alumínio é a soldadura. A soldadura de alumínio é difícil requerendo uma especialização da mão-de-obra.

2.2.2 Soluções para máquinas em ambiente industrial

Na indústria, as estruturas metálicas são projetadas com diversas soluções de materiais como por exemplo, perfis extrudados de várias secções em aço ou alumínio, e, chapas estampadas ou quinadas.

Os perfis extrudados são a solução mais utilizada nas estruturas metálicas. A sua utilização deve-se ao baixo custo devido à produção em massa. Os perfis, dependendo da solicitação a que a estrutura será sujeita, podem ser em aço ou alumínio. As geometrias dos perfis em aço são mais simplificadas, como por exemplo redonda, retangular ou IPE. No entanto, perfis em alumínio, as geometrias tornam-se mais complexas pois permitem ligar elementos estruturais e não estruturais apenas

utilizando ligações aparafusadas, tornando este tipo de solução mais simples não necessitando de mão-de-obra especializada.

A chapa quinada ou estampada é utilizada em diversas indústrias como elemento estrutural. A chapa quinada possui uma boa rigidez e resistência mecânica para suportar os esforços a que estão sujeitos. Na realização de uma peça estrutural complexa, a utilização da chapa quinada, permite a fixação fácil de outros componentes, sendo previamente realizadas as furações necessárias para as ligações aparafusadas. A chapa estampada é utilizada principalmente na indústria automóvel, sendo o processo fundamental, o fabrico de componentes e da estrutura principal do automóvel, chamado de *body-in-white*.

2.2.3 Ligações

As ligações são necessárias na união dos componentes. Estas ligações, admitindo diversas configurações, têm de ser devidamente dimensionadas e podem ser realizadas por meio de parafusos, rebites, pinos e por meio de soldadura, sendo sujeitas a ações estáticas (A. F. dos Santos, 1977). O seu dimensionamento deve ser feito de acordo como o Eurocódigo EC3-1-8 (NP EN 1993-1-8, 2010). Nas estruturas metálicas, as ligações mais utilizadas são as aparafusadas.

As ligações aparafusadas relativamente às soldadas têm várias vantagens como a possibilidade de desmontagem e a facilidade na montagem em locais de difícil acesso. O processo de soldadura é ideal na união de componentes com geometrias complexas e para ligações de rigidez elevada. Este processo resulta num processo com elevado valor acrescentado, não só pela sua execução mas pelo controlo que é necessário efetuar posteriormente (Kempfer, 2006). As ligações aparafusadas e soldadas estão sujeitas a esforços de corte, tração e flexão, podendo ainda ser combinados esforços de corte e flexão (NP EN 1993-1-8, 2010).

2.2.4 Modelação numérica

2.2.4.1 Método de elementos finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) permite estimar numericamente as equações constitutivas integrais e diferenciais que se estabelecem para a estrutura ou para os elementos da estrutura individualmente, pelo estabelecimento de equações algébricas retornando soluções aproximadas. O MEF permite a obtenção de soluções numéricas de problemas de engenharia como análise de tensões, temperaturas, escoamento de fluidos e aerodinâmica, eletromagnética e eletrónica (Campilho, 2012).

O objetivo deste método é obter uma definição que permita explorar a análise de processos complexos, de forma automática, por meio de programas computacionais de

forma rápida utilizando funções de interpolação para determinar variáveis nos pontos não nodais (Campilho, 2012).

2.2.4.2 Princípios básicos

O MEF consiste em dividir as peças ou conjuntos em elementos finitos, permitindo discretizar o problema em elementos de uma, duas ou três dimensões. As soluções exatas são praticamente impossíveis de obter e então recorre-se a soluções aproximadas. De salientar que, este método, não devolve uma solução exata do problema. Para obter uma solução próxima da realidade, da exata, é exigido um número considerável de elementos visto que quanto mais elementos utilizar mais próxima fica da solução exata (Campilho, 2012).

Para uma aproximação à solução exata, sem que aumente o custo associado ao esforço computacional, efetua-se uma convergência de malha. A convergência começa pela atribuição de dimensões máximas e mínimas que os elementos devem possuir, aplicando as condições fronteiras que o conjunto/peça está sujeita. Após esta convergência, é possível conhecer o deslocamento de cada elemento. De seguida, efetua-se um refinamento da malha, ou seja, realiza-se uma diminuição dos valores máximos e mínimos que o elemento pode ter, analisando os valores de deslocamentos.

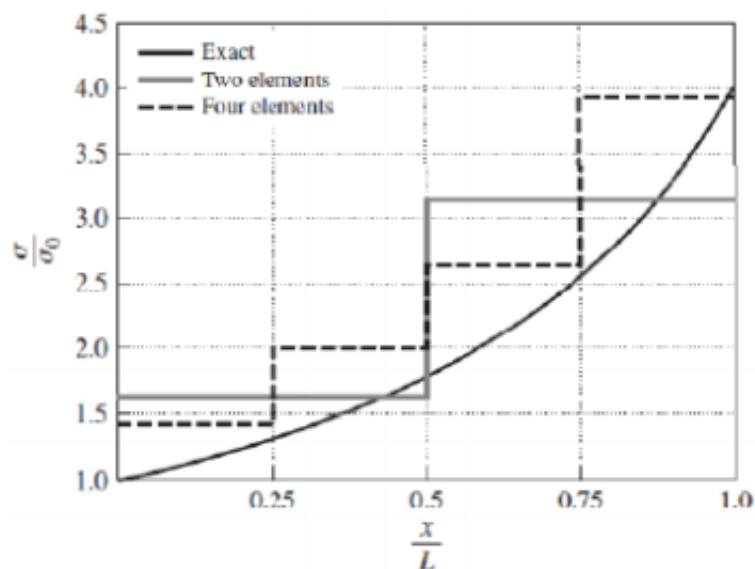


Figura 5 - Comparação de MEF com solução exata (Campilho, 2012).

Na Figura 5 é possível visualizar que dependendo do número de elementos, caso o número de elementos for baixo pode-se ter uma solução aproximada grosseira. À medida que aumentamos o número de elementos, a curva aproxima-se cada vez mais da solução exata.

2.3 Automação e robotização de sistemas industriais

Na primeira década do século XXI, metaforicamente, foi anunciada o começo duma quarta revolução industrial. Esta industrialização deu-se início na indústria alemã que promoveu a automação e computação a níveis elevados na indústria. Em outubro de 2012, na Feira de Hannover, a Indústria 4.0 passou a ser globalizada até aos dias de hoje. A utilização da simulação dos produtos, a impressão a três dimensões, a realidade virtual e a utilização de robôs são exemplos de técnicas utilizadas na Indústria 4.0 (Kiran, 2019).

2.3.1 Automação vs. Robótica

A automação é um conjunto de técnicas destinadas a tornar automáticas a realização de tarefas, substituindo o trabalho humano que envolve esforço muscular e mental, por elementos eletromecânicos computacionais (SILVEIRA & LIMA, 2003). A automação envolve máquinas, ferramentas, dispositivos, instalações e sistemas que são desenvolvidas por humanos com o intuito de reduzir o envolvimento humano numa determinada atividade.

A automação, nos dias de hoje, está interligada com a robótica. Segundo (Nof, 2009), existe o autómato e o robô. O autómato é uma máquina, ferramenta ou dispositivo autónomo que contém a sua própria fonte de energia e pode executar sem a intervenção humana uma série de complicadas decisões e ações, em resposta a programas e estímulos externos. O robô é um dispositivo mecânico que pode ser programado para realizar uma variedade de tarefas de manipulação sob controlo automático. Assim, o robô pode ser considerado um autómato, mas ao contrário de um autómato, um robô é normalmente projetado para movimentos e atividades repetitivas e específicas.

Um autómato é por exemplo, um dispositivo que deteta a falta de componentes numa determinada peça ou uma máquina que, através de cilindros pneumáticos, solda ou insere clips num determinado componente. Por outro lado, um robô é um dispositivo ou máquina que é capaz de se movimentar em uma ou mais direções, fazendo uma sequência de movimentos parecidos com os dos humanos.

Nenhum sistema é perfeito. Qualquer implementação ou mecanismo tem os seus prós e contras. Segundo (Gupta et al., 2007), o uso da automação tem várias vantagens, tais como:

- Aumentar a produtividade ao reduzir os custos de produção;
- Aumentar as condições de trabalho dos operadores e reduzir o seu esforço;
- Assumem o controlo total sobre o processo e aumentam a qualidade dos produtos;

- Redução do envolvimento humano no processo minimizando a possibilidade de erros;

O uso da robotização também tem as suas vantagens como:

- Redução dos custos de mão-de-obra dando melhor utilização de ferramentas no processo;
- O robô executa a tarefa de uma forma mais rápida garantindo a qualidade do componente reduzindo os tempos de produção e aumentando a produtividade;
- Existem robôs com seis ou mais graus de liberdade permitindo lidar com peças de elevada complexidade;

Pelo contrário, a automação/robotização tem as suas limitações, como:

- A aceitação da sociedade. A automação, nos dias de hoje é vista como uma causa do desemprego. Apesar de aumentar a produtividade e tornar a empresa mais competitiva no mercado, alguns empregos são perdidos. Como por exemplo, a Fiat, em nove anos, reduziu a mão-de-obra de 138.000 para 72.000 com a implementação de robôs (Gupta et al., 2007);
- O investimento inicial. A implementação deste processo tem um investimento elevado o que pode ser um entrave para as empresas.

De um modo geral, o uso da automação/robotização tem vindo a aumentar por parte das empresas, com mais impacto na indústria automóvel. Como foi dito anteriormente, pode ser um entrave visto que o investimento inicial é elevado e é visto pela sociedade como uma causa para o desemprego, mas ao final de uns anos esse mesmo investimento é recuperado e a partir desse momento, todo o retorno é lucro para a empresa.

2.3.2 Sistemas de automação

Como é óbvio, a automatização não substitui um colaborador de uma empresa, no entanto, pode reduzir o número de postos de trabalho de uma empresa. A automatização permite sim, a eliminação de trabalhos repetitivos e monótonos e permite aos colaboradores ter maior conhecimento do produto e maior formação na área de trabalho (Araújo et al., 2017).

Segundo (Groover, 2002), a automação pode ser dividida em quatro grandes sistemas:

- Sistemas de apoio à produção manual;
- Sistemas semiautomáticos;
- Sistemas automáticos;
- Sistemas robotizados;

2.3.2.1 *Sistemas de apoio à produção manual*

A mão-de-obra humana é sempre necessária para conceber um produto mesmo sendo um sistema automatizado. Os colaboradores são fundamentais para desenvolver funções como a manutenção de máquinas e equipamentos de produção ou responsáveis e organizadores da produção. Existem alguns casos em que a mão-de-obra humana é imprescindível, tais como (Groover, 2002):

- Tarefas difíceis de automatizar. Em alguns casos a automatização é difícil tornando o investimento elevado, como por exemplo, em produtos com várias configurações ou operações como acabamentos finais;
- Curto ciclo de vida do produto. Caso a produção do produto seja em pequenas series, não compensa o investimento inicial em equipamento;
- Produtos personalizados. Existem produtos que apenas é necessária uma unidade e então, nesse caso, é favorável a produção manual;

2.3.2.2 *Sistemas semiautomáticos*

Nestes sistemas, as funções realizadas são em parte por ação manual e outra parte por funções automatizadas, enquanto que num sistema automatizado automático, todas as tarefas são executadas pelo equipamento. No caso do sistema semiautomático o equipamento precisa de um suporte manual para efetuar as tarefas (Groover, 2002).

Um exemplo de um sistema semiautomático é o equipamento *Computer Numerical Control* (CNC) de produção semiautomática. Este equipamento apesar de realizar as tarefas de forma automática, após as instruções serem inseridas manualmente, este necessita de ser alimentado manualmente e todas as ferramentas necessárias são também manuais.

2.3.2.3 *Sistemas automáticos*

A implementação da automação em qualquer empresa, num diverso setor, normalmente tem investimentos iniciais elevados em equipamentos específicos, o que pode ser um entrave. Os sistemas automáticos são aqueles que precisam de maior investimento, mas são aqueles que requerem menos apoio manual. Nestes sistemas, toda o processamento do produto, manipulação, montagem, acabamentos e análises devem ser efetuados de forma automática (Groover, 2002).

Segundo (Bayer et al., 2011), os sistemas automáticos podem ser de três tipos:

- **Automação fixa.** Esta baseia-se numa linha de produção especialmente projetada para a fabricação de um produto específico, como por exemplo, uma linha de fabricação de garrafas. Adequa-se para volumes de produção elevados de um único produto. O grande problema deste

tipo de automação é que a alteração do produto pode levar a uma linha de produção desatualizada originando num grande prejuízo.

- **Automação programável.** Esta baseia-se num equipamento que é capaz de produzir uma variedade de produtos com características distintas, segundo um programa de instruções previamente introduzido. Este tipo de automação é utilizado normalmente para volumes de produção baixos. O equipamento é projetado para as diversas características e configurações dos produtos.
- **Automação flexível.** Este tipo de automação, conhecida como sistema de *Computer Integrated Manufacturing* (CIM), é normalmente mais indicado para volumes médios de produção, sendo uma solução de compromisso entre os outros tipos de automação, fixa e programável. O equipamento pode ser programado para produzir uma variedade de produtos com algumas características ou configurações, mas a variedades dessas é mais limitada que a permitida pela automação programável.

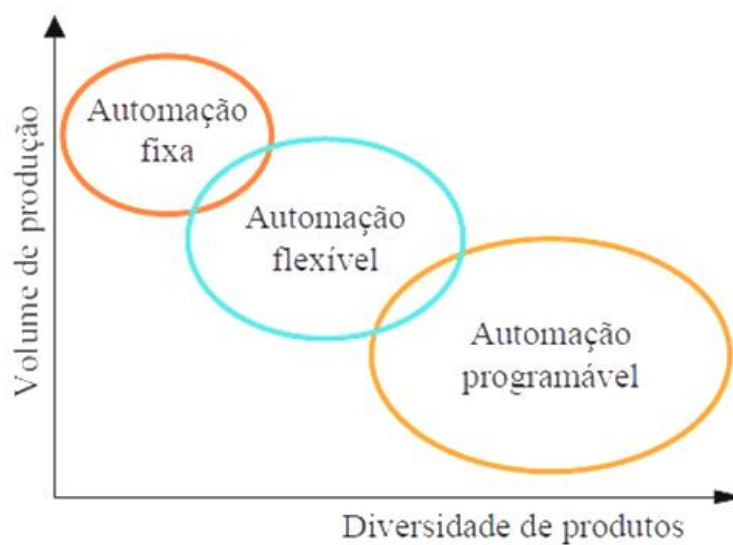


Figura 6 - Comparação dos tipos de automação (Profelectro, n.d.).

Através da Figura 6 é possível comparar os tipos de automação e analisar qual o mais adequado implementar num determinado processo de produção numa empresa. Como foi dito anteriormente, para um volume de produção elevado e uma única configuração do produto opta-se por uma automação fixa. Caso exista uma elevada diversidade de produtos para baixa produção deve-se optar por uma automação programável. A automação flexível é aconselhada para um volume de produção médio e permite produzir uma variedade de produtos com diferentes configurações, mas de uma forma limitada.

2.3.2.4 *Sistemas robotizados*

Os sistemas robotizados são sistemas articulados que conseguem ser reprogramados e obter, de forma autónoma, informação do meio em que se insere. Estes sistemas, para isso acontecer, estão equipados com sensores e dispositivos, como câmaras, tomando decisões sobre o que deve fazer perante o meio envolvente (Ollero et al., 2006).

Um robô pode ser um equipamento que transporta componentes a uma linha de montagem, reconhecendo o que está a carregar e colocando-os na posição correta. Basicamente representam o desenvolvimento natural dos sistemas CNC (Groover, 2002). Estes robôs têm a possibilidade de fazer inúmeras e diferentes tarefas, distinguindo-os de outros equipamentos.

Os robôs atuam em várias aplicações, nomeadamente:

- Ciclos de trabalhos repetitivos;
- Atividades em ambientes perigosos;
- Manipulação de componentes pesados;
- Operações contínuas;

2.3.3 *Soluções baseadas na automação*

Na indústria, cada vez mais, os prazos e requisitos de qualidade são mais apertados implicando às empresas implementarem sistemas mais produtivos e precisos. A automação é um sistema em que permite uma maior produtividade garantindo a qualidade dos produtos.

O exemplo mais conhecido da aplicação da automação na indústria é a linha de montagem ou embalagem.



Figura 7 - Linha de embalagem (G. Santos, 2017).



Figura 8 - Linha de montagem (AGME, 2020).

As linhas de embalagem (Figura 7) permitem a movimentação de matéria-prima (como parafusos, anilhas ou molas) e de produtos na fase final de uma forma mais rápida e eficaz. As linhas de montagem (Figura 8) permitem, de forma sequencial, a montagem de componentes numa determinada peça sem o envolvimento humano, garantindo a qualidade do produto.

Atualmente, as empresas têm a necessidade de lidar com a permanente deslocação de produtos, o que levou à criação e posterior implementação de diversos sistemas de transporte como *Automated Guided Vehicles's* (AGV). Os AGV's permitem facilmente a deslocação constante de produtos entre diferentes zonas da área de fabrico, sem qualquer tipo de intervenção humana, como por exemplo empilhadores (Figura 9) e carros de transporte (Figura 10).



Figura 9 - AGV do tipo empilhador (AGVE, 2020).



Figura 10 - AGV do tipo carro de transporte ((MIR), 2020).

Estes sistemas estão a ser implementados cada vez mais na indústria visto que permitem aumentar a produtividade, aumentar a velocidade de transporte e reduzir o envolvimento humano. Para as empresas, estes sistemas podem ser um entrave devido ao seu grande investimento inicial (Chryssolouris et al., 2008). Como foi dito anteriormente, estes sistemas não necessitam do envolvimento humano, logo as empresas não têm gastos económicos com o salário dos seus colaboradores e, assim, aumentam a sua margem de lucro.

Estes sistemas são os mais conhecidos e utilizados na indústria no que diz respeito a transporte de produtos ou matéria-prima. Digamos que, estes sistemas, são recomendados para a fase inicial e final do produto, ou seja, a fase inicial corresponde ao transporte das matérias-primas e fase final, o produto em modo de ser comercializado. Mas, entre estas duas fases é necessário transformar a matéria-prima, fazer certas operações como a soldadura ou montar certos componentes numa determinada peça.

Para esta fase intermédia existem vários sistemas que facilitam o processo, aumentam a produtividade e reduzem o envolvimento humano, tais como uma célula de montagem de componentes (Figura 11) ou sistemas de soldadura por ultrassons (Figura 12). Estes equipamentos podem ser semiautomáticos ou automáticos. Semiautomáticos, o operador tem de carregar no botão de iniciar, mas, se automáticos, o operador ao retirar a peça, após montagem ou após soldadura, e colocar nova peça, o equipamento automaticamente faz a operação.

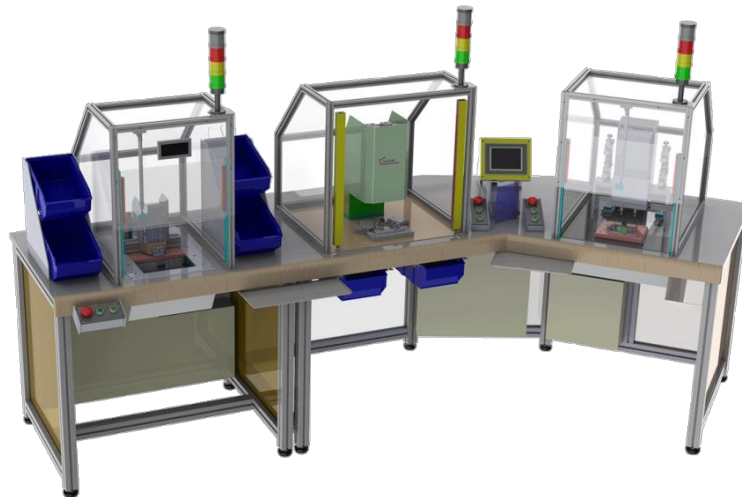


Figura 11 - Células de montagem de componentes (DIVMAC, 2020a).



Figura 12 - Célula de soldadura por ultrassons (DIVMAC, 2020b).

Pode ser necessário verificar a qualidade do produto após efetuarem a operação em equipamentos como estes. Certas operações, como a montagem de componentes, é imprescindível verificar se todos os componentes estão presentes na peça. Para estes exemplos, existem equipamentos que inspecionam, verificam a presença dos componentes na peça através de sensores e câmaras.

Alguns produtos apresentam geometrias e dimensões complexas resultando num processamento difícil. A automação é capaz de lidar com estes produtos através de equipamentos aptos para satisfazer de uma forma controlada a manipulação dos componentes. A separação de peças, na indústria automóvel, está bastante presente como sendo um problema. Para este caso, existem sistemas que permitem a separação

de peças complexas, como por exemplo *clips* ou parafusos. As mesas vibratórias (Figura 13) surgem para solucionar esse problema e através da vibração separam os componentes e orientá-los para a posição definida.

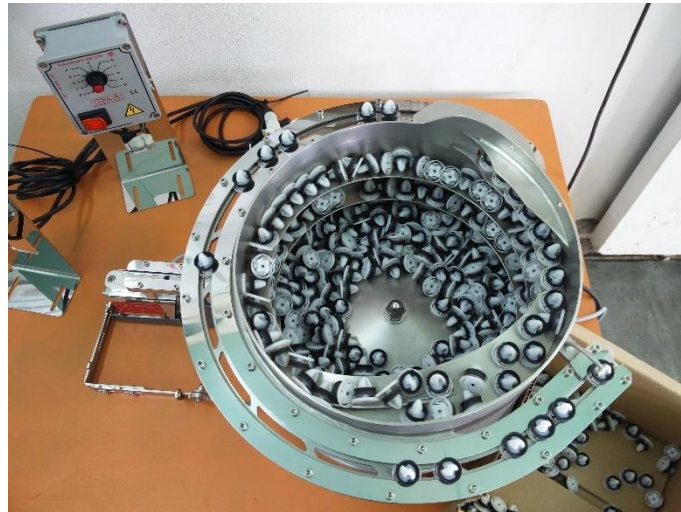


Figura 13 - Mesa vibratória (Lupatec, 2020).

2.3.4 Soluções baseadas na robotização

A robotização é, dos processos de automação, o que mais se aproxima com a automação programável. Os robôs são máquinas totalmente programáveis e possuem os mesmos movimentos que o ser humano. Desde há muitos anos que a robótica é associada na indústria automóvel, nomeadamente, nas linhas de produção.

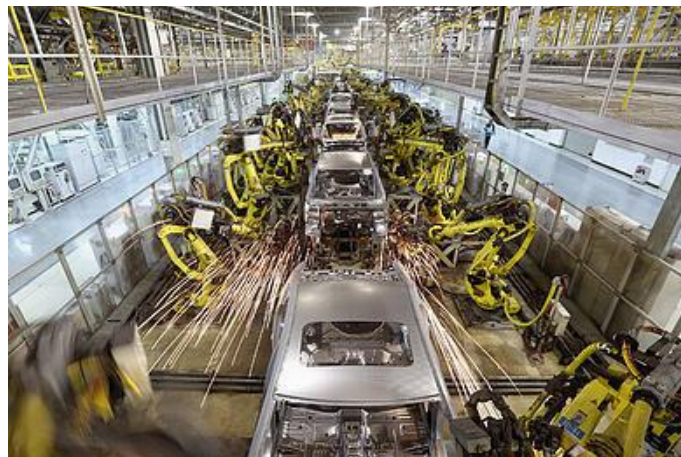


Figura 14 - Linha de montagem da GWM (Bélanger-Barrete, 2014).

Na Figura 14 está presente a linha de montagem da fábrica de automóveis chinesa, *Great Wall Motors* (GWM), que utiliza 27 robôs ABB em trinta postos de trabalho diferentes desempenhando funções de montagem e de soldadura. Enquanto um robô coloca o painel na estrutura, em simultâneo, outro executa a soldadura do painel. Esta

linha de produção, em 2014, foi considerada a mais produtiva do mundo, executando cerca de 4000 processos de soldadura em cada veículo num tempo de ciclo de apenas 86 segundos incluído o transporte de peças (Bélanger-Barrete, 2014).

Os robôs podem ser colaborativos ou não, isto é, os colaborativos podem trabalhar juntos dos operadores, auxiliando-os, mas os outros precisam de estar isolados impedindo a deslocação do operador até eles. É fácil a distinção entre os dois. Para o cenário do operador colocar a mão no braço de trabalho do robô, os colaborativos ao serem obstruídos pelo operador, este aciona a emergência automaticamente, enquanto que os outros não. O não colaborativo, para este exemplo, não aciona a emergência colocando em perigo a segurança do operador. Por esta razão, os robôs não colaborativos estão protegidos por barreiras que, ao serem ultrapassadas, acionam a emergência parando imediatamente.



Figura 15 - Robô colaborativo (CIM Automação, 2018).



Figura 16 – Robô não colaborativo (SMART Automação e Robotica, 2013).

Na Figura 15 é possível visualizar um robô colaborativo a auxiliar um operador através da soldadura dos componentes na peça. Como foi dito anteriormente, os robôs não colaborativos têm de estar protegidos por barreiras. Como mostra na Figura 16, o robô está dentro de uma zona de proteção impossibilitando a entrada de pessoas na zona de trabalho do robô.

Na indústria automóvel os robôs têm sido cada vez mais utilizados em processos de montagem, soldadura e pintura. Atualmente, no caso da pintura, os pintores altamente qualificados são difíceis de encontrar e a utilização de robôs na pintura surge como alternativa (Figura 17). A utilização de robôs na pintura permite a redução de resíduos e garante a qualidade da pintura, uma vez que os robôs são equipados com medidores de caudal, garantindo uma pintura uniforme.



Figura 17 - Utilização de robôs na pintura de um automóvel (Online, 2015).

2.3.5 Sistemas de robótica no processo de paletização

Na indústria existem várias formas de paletização: paletização manual, feita por um colaborador; paletização mecânica; e o método mais recente, a paletização robotizada (Abdou & Lee, 1992).

Os robôs colaborativos, como já referido, têm sido uma grande aposta na indústria, mas apresentam alguns perigos para a segurança dos colaboradores. O perigo mais relevante é a possibilidade de choque da mão presa do robô num colaborador, devido às pequenas superfícies e bordas da estrutura (Franklin et al., 2020).



Figura 18 - Robô colaborativo no processo de paletização (Franklin et al., 2020).

Na Figura 18 é possível visualizar a mão presa, isto é, a garra do robô colaborativo. Devido ao problema evidenciado anteriormente, a solução encontrada foi colocar uma proteção projetada para a mão presa para minimizar esse risco.

Outro problema encontrado é a possibilidade de impacto do braço do robô no colaborador enquanto este substitui uma paleta cheia por uma vazia. Para minimizar

este problema, uma das possibilidades é colocar sensores no braço do robô para que, ao invadirem a área de trabalho, o robô automaticamente pára.

2.3.6 Estado da arte na automação de processos

Na Tabela 3, são apresentados alguns casos sobre a automação de processos, permitindo demonstrar algumas melhorias alcançadas com a implementação de automação num processo produtivo, concluindo ser uma mais-valia para as empresas.

Tabela 3 - Revisão da literatura de automação de processos.

Referências Bibliográficas	Descrição do trabalho
(Costa et al., 2018)	Neste trabalho, concebido em Portugal, o objetivo foi solucionar os problemas de qualidade existentes no sistema de transmissão dos limpa para-brisa dos automóveis, em Portugal. Antes da implementação de um sistema automático, o sistema que atuava era um sistema semiautomático que era incapaz de detetar e rejeitar componentes antes do processo de montagem resultando na produção de peças defeituosas. Foi implementado um sistema totalmente automatizado capaz de detetar componentes defeituosos. Concluíram que a produção aumentou em cerca de 19% resultando num processo mais eficiente e otimizado. De salientar ainda que obtiveram um controle de qualidade de 100%, descartando a possibilidade de existir produtos defeituosos.
(Costa et al., 2017)	Neste trabalho, concebido em Portugal, foi desenvolvido um sistema totalmente automatizado para montagem de anilhas no motor do limpa para-brisas dos automóveis, em Portugal. Concluíram que com este sistema, sendo anteriormente manual, foi possível aumentar a produção para cerca de 1000 peças por hora e baixar o tempo de produção de cada componente para cerca de 3,6 segundos.
(Araújo et al., 2017)	Neste trabalho, concebido em Portugal, foi desenvolvida uma nova ferramenta capaz de evitar a falta de planicidade da chapa após corte. Este equipamento é facilmente conectado à máquina de corte acompanhando o movimento da lâmina. Este sistema é totalmente automatizado apenas necessitando de uma instrução curta do operador. Com a implementação deste sistema, a

	<p>empresa aumentou o <i>added-value</i> de cada máquina, oferecendo soluções avançadas e desejáveis aos clientes, contribuindo também para a sustentabilidade do negócio da empresa.</p>
(Nunes & Silva, 2013)	<p>Neste trabalho, concebido em Portugal, pretende-se tornar um processo de mão de obra num processo automatizado, aumentando a produtividade garantindo a qualidade, na montagem dos sistemas de limpa para brisas automóveis. O equipamento desenvolvido utiliza um sistema de automação automático, apenas necessitando de um operador responsável pelo processo de alimentação inicial. Com este equipamento obtiveram uma redução do tempo de ciclo de produção de 4 segundos.</p>
(Morioka & Sakakibara, 2010)	<p>Neste trabalho, projetado no Japão, foi desenvolvido um sistema de montagem de células com cooperação homem-robô. Este sistema tem de garantir a total segurança do operador. Esta célula permite a alimentação de peças por dois robôs. Com este sistema, concluíram que os erros de montagem são quase totalmente eliminados, permite aos operadores concentrarem-se nas operações de montagem e alimentação de peças manuais convencionais e, principalmente, permite a cooperação entre humanos-robôs em forma automática sem a necessidade de parar resultando numa maior produtividade.</p>
(Magalhães et al., 2019)	<p>Neste trabalho, concebido em Portugal, é aplicado um novo conceito de interligação entre diferentes processos de fabricação com o objetivo de minimizar perdas de tempo. Para isso, substituíram algumas operações robotizadas por sistemas automáticos mais baratos reduzindo o tempo de ciclo e melhorando a qualidade da entrega das peças para a operação seguinte.</p>
(Gopinath et al., 2017)	<p>Neste trabalho, concebido na Suécia, o objetivo é avaliar a implementação de um robô industrial num processo produtivo, em que este auxilia o colaborador. Após descoberto o <i>layout</i> correto, concluíram que os números de erros no processo produtivo erram menores e melhorou a ergonomia do espaço de trabalho do operador.</p>
(Dencker et al., 2009)	<p>Neste trabalho, concebido na Suécia, a automação é adicionada a um sistema de montagem que também necessita um operador. Concluiu-se que existe um</p>

	<p>aumento da produtividade, ganhos de flexibilidade e redução do <i>lead-time</i> de montagem. Esta atividade entre operador e o sistema automatizado reduz os distúrbios e aumenta a consciência dos operadores do sistema de montagem.</p>
(Krüger et al., 2009)	<p>Neste trabalho, realizado na Alemanha, o autor faz um estudo sobre diversas formas de cooperação entre o homem e o robô na montagem e outras tecnologias disponíveis que apoiam a cooperação. Após este estudo, conclui-se que esta cooperação aumenta a produtividade, apresenta maior flexibilidade, diminui o tempo de ciclo de produção e aumenta a precisão melhorando a qualidade do produto.</p>

Através da análise dos trabalhos da Tabela 3, a utilização da automação e robótica na indústria é sem dúvida uma mais-valia para as empresas pois consegue-se ganhos consideráveis.

IMPLEMENTAÇÃO DE ROBÔS PARA A PALETIZAÇÃO DE PAINÉIS DE PORTA

3.1 CARATERIZAÇÃO DO PRODUTO

3.2 CARATERIZAÇÃO DO PROCESSO

3.3 CARATERIZAÇÃO DO PROBLEMA

3.4 CARATERIZAÇÃO DA SOLUÇÃO AO PROBLEMA

3.5 CARATERIZAÇÃO DO ROBÔ COLABORATIVO

3.6 ANTEPROJETO

3.7 PROJETO

3.8 ANÁLISE FINANCEIRA DO PROJETO

3 IMPLEMENTAÇÃO DE ROBÔS PARA A PALETIZAÇÃO DE PAINÉIS DE PORTA

3.1 Caraterização do produto

A Simoldes Plásticos é um fabricante de produtos para a indústria automóvel. Produtos esses concebidos através da injeção de plástico, tal como o produto em questão. Os produtos são painéis de porta para o veículo da OEM Grupo Volkswagen AutoEuropa, nomeadamente, o modelo T-Roc.

Os painéis de porta são fabricados na empresa através do processo de injeção de plástico. De seguida são embalados e enviados para a linha de montagem da Volkswagen AutoEuropa, em Palmela, local de montagem do modelo T-Roc.

O Volkswagen T-Roc é um veículo de quatro portas, ou seja, necessita de quatro painéis de porta sendo todos estes diferentes, o que implica a existência de quatro moldes de peça. São então fabricados os painéis da frente, esquerdo e direito, e os painéis de trás, esquerdo e direito.

Após a chegada dos painéis de porta à linha de montagem, são montados todos os acessórios do painel, sendo eles: puxador de porta, colunas de som, tampas de proteção e respetivos acessórios, como cliques e parafusos.

3.2 Caraterização do processo

Antes da caraterização propriamente dita do processo, é importante afirmar que se fabricam quatro painéis diferentes. Portanto são utilizados quatro moldes de injeção, em que estes não se encontram fixos na mesma máquina de injeção. Quer isto dizer que, por exemplo, numa semana o molde do painel frente esquerdo está numa máquina e na semana seguinte, nessa mesma máquina está o molde do painel frente direito.

A fabricação dos painéis de porta é feita entre três máquinas, designadas de: 1000 IV, 1100 II e 1100 V. Na Figura 19 é possível visualizar o *layout* da fábrica, o que permite a visualização da localização das máquinas de injeção para os painéis de porta.

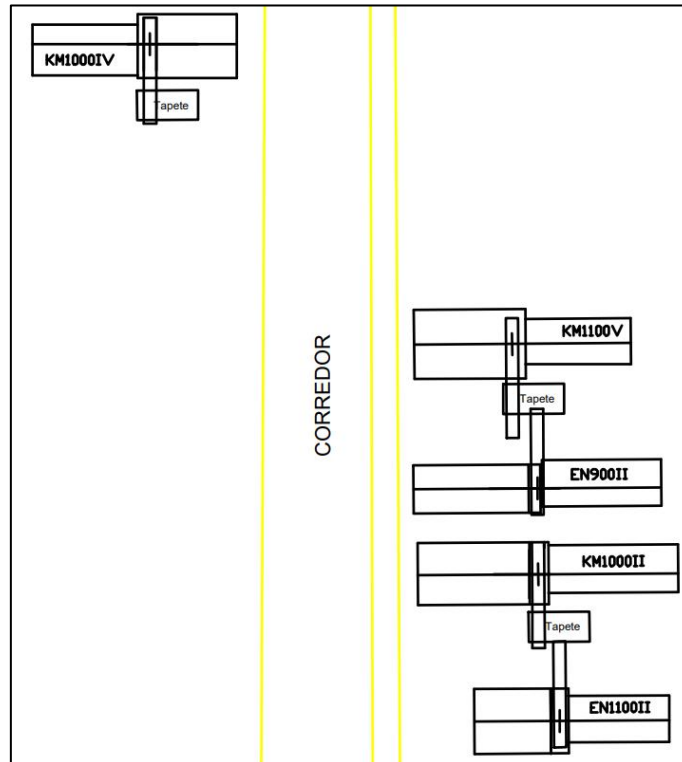


Figura 19 - Layout das máquinas na sede de fábrica (cortesia da empresa Simoldes Plásticos).

Em cada máquina de injeção, o posto de trabalho é constituído por um robô SEPRO, um colaborador, um tapete rolante, embalagens para armazenar os painéis de porta e um monta-paletes. A fabricação dos painéis é feita em três turnos de oito horas de trabalho. Neste processo, o colaborador encontra-se a tempo inteiro no seu posto de trabalho. Na Figura 20 é possível ver o *layout* do posto de trabalho.

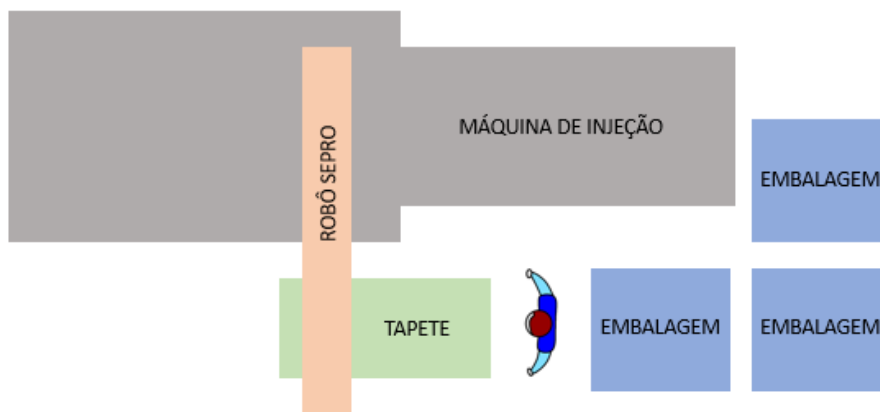


Figura 20 - Layout do posto de trabalho.

Em cada posto de trabalho existem três embalagens para armazenar os painéis para que não exista possibilidade de existir falta de embalagens, o que pode acontecer devido ao atraso na logística.

O processo de fabricação de qualquer painel é feito da seguinte forma:

- Depois da injeção de plástico no molde, o robô SEPRO retira o painel da máquina de injeção e coloca-o no tapete rolante;
- O tapete rolante é capaz de armazenar três painéis;
- Após o painel chegar ao colaborador este analisa, marca e etiqueta o painel;
- O painel é colocado na embalagem pelo colaborador;
- Quando é colocado o último painel na embalagem, sendo esta capaz de armazenar doze painéis de porta, o colaborador fecha a embalagem com uma tampa;
- De seguida, com ajuda do monta-paletes, o colaborador retira a embalagem cheia e substitui por uma embalagem vazia.

3.3 Caraterização do problema

Os painéis de porta do modelo T-Roc são produzidos sem qualquer paragem. A produção é feita, portanto, nos três turnos de oito horas de trabalho. Isto significa que, em cada turno de trabalho, há três colaboradores que produzem painéis de porta em três máquinas de injeção, o que resulta em nove colaboradores por dia.

Um dos problemas é o excesso de colaboradores neste processo. Na maioria do tempo, o colaborador está a aguardar pelo painel de porta. Depois da cronometragem do tempo que o colaborador está parado, é possível concluir a necessidade de reduzir o número de colaboradores por turno de trabalho.

A grande quantidade de colaboradores neste processo resulta na baixa produtividade em partes por colaborador, visto que a sua ocupação é demasiado reduzida.

3.4 Caraterização da solução ao problema

O objetivo deste trabalho é otimizar o processo através da automatização/robotização, aumentar a produtividade em partes por colaborador, diminuir o desperdício e reduzir gastos em recursos humanos. Para que isto seja possível é necessário aplicar um sistema que aumente o tempo de ocupação do colaborador.

A otimização consiste na implementação de um robô colaborativo no processo de produção dos painéis de porta. Sendo assim, a solução consiste no robô paletizar os painéis de porta numa estrutura metálica, nomeada de “*rack*”.

Esta “*rack*” consiste numa estrutura de suporte para painéis de porta, o que permite paletizar uma quantia de 72 painéis. A estrutura terá dois lados, ou seja, é possível armazenar 36 painéis em cada lado, sendo que ao completar um lado da estrutura esta tem de ser capaz de girar para que o robô inicie a paletização no lado contrário.

A rotação da estrutura metálica deve ser feita automaticamente após completada a paletização de um lado. Sendo assim, é necessário desenvolver um mecanismo que permita a rotação da estrutura de forma automática.

De salientar, que este processo deve ser completamente móvel, isto é, deve ser projetado de forma a que, caso necessário, seja fácil a sua deslocação de máquina para máquina. Os painéis não são fabricados sempre na mesma máquina de injeção e/ou caso se altere o layout de fábrica, este processo deve ser fácil e simples de se mover.

Resumindo, o processo otimizado resume-se à implementação de um robô colaborativo que paletiza os painéis de porta numa estrutura metálica. A estrutura metálica tem incorporada um mecanismo que permite a rotação da mesma. Com esta otimização, o colaborador não está fixo no posto de trabalho conseguindo fazer o mesmo trabalho em duas máquinas de injeção.

Esta solução será aplicada em dois postos de trabalho, nas máquinas de injeção 1100V e 1100II, pois estão posicionadas lado a lado e torna o deslocamento do colaborador mais curto. Esse colaborador fica responsável por armazenar os painéis de porta, paletizados pelo robô, nas embalagens nesses dois postos de trabalho. A terceira máquina de injeção, 1000IV, encontra-se bastante distante das outras duas máquinas o que impede a maior produtividade em partes por colaborador. Sendo assim, o processo de produção nesta máquina mantém-se inalterável.

Concluindo, com esta solução é possível reduzir um colaborador por turno de trabalho. O processo produtivo passa a trabalhar com um colaborador fixo numa máquina e um colaborador parcial em duas máquinas. Em resultado, permite a redução de recursos humanos e o aumento da produtividade em partes por colaborador. A Figura 21 representa o layout do processo de produção otimizado.

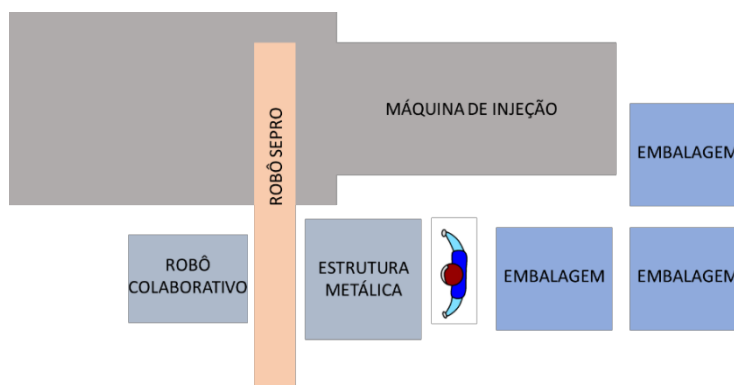


Figura 21 - Layout do processo de produção otimizado.

3.5 Caracterização do robô colaborativo

Há vários anos que a Simoldes Plásticos tem uma parceira com um fornecedor de robôs, a Robowork. Este fornecedor, sediado em Aveiro, apresenta uma vasta variedade de gamas de robôs capaz de atender às necessidades do cliente, seja o seu efeito para manipulação, soldadura, polimento, paletização ou maquinação.

A escolha do robô é feita segundo vários critérios, sendo esses, capacidade máxima de carga, alcance máximo e número de graus de liberdade ou eixos. O robô tem de ser capaz de transportar uma carga de cerca 1,5 kg e alcançar uma distância no mínimo de 1,5 m. Tendo em conta estes critérios, o robô colaborativo escolhido será um Kassow Robots – KR1805 (Figura 22).



Figura 22 - Robô colaborativo KR1805. (Robots, 2020)

Da gama de robôs colaborativos, este robô é o único que garante as especificações impostas, sendo possível carregar no máximo 5 kg, garante um alcance máximo de 1,8 m e apresenta sete graus de liberdade (Robots, 2020). O sétimo grau de liberdade permite movimentar todos os eixos do robô sem deslocar a mão presa do robô no ponto requerido.

A programação é predefinida pela marca, fácil de compreender e programar, sendo relativamente parecida com a linguagem C. O controlador permite entradas e saídas digitais e analógicas. De salientar que o robô apresenta um sistema de segurança: sensibilidade de impacto, ou seja, ao obstruir a movimentação do robô, por exemplo colocando a mão, ele automaticamente ativa a emergência.

3.6 Anteprojeto

Esta secção é dedicado à apresentação de todos os esboços e tentativas dos componentes projetados para o processo de fabrico dos painéis de porta, sendo: a estrutura metálica para paletização dos painéis, o sistema de rotação da estrutura e o suporte para o robô colaborativo.

3.6.1 Estrutura metálica para paletização

Um exemplo de uma paletização de um produto é a paletização de caixas feita sobre uma palete de madeira para depois ser possível a sua deslocação através de um empilhador ou porta-paletes. Neste exemplo, a estrutura é a palete de madeira. Neste caso, a estrutura deve ser feita verticalmente, com o intuito de ocupar o menor espaço possível no posto de trabalho, feita de forma a pendurar os painéis de porta, e ainda ser movível ao longo da fábrica.

Como foi dito na secção 3.1 serão fabricados quatro painéis de porta. A forma ideal de generalizar a estrutura metálica é projetar uma estrutura possível de paletizar os quatro painéis. Desta forma, evita-se o fabrico de uma estrutura metálica para cada painel reduzindo custos associados e, ainda, é desnecessário substituir a estrutura metálica sempre que se altere o molde presente na máquina de injeção.

Numa primeira fase, antes do projeto da estrutura propriamente dita, é necessário analisar os quatro painéis e observar pontos comuns para a sua paletização. A melhor forma para paletizar ambos os painéis na mesma estrutura é através de dois tubos paralelos e na horizontal, ficando os painéis pendurados. A Tabela 4 indica as dimensões dos painéis de porta da frente e traseiro.

Tabela 4 - Dimensões dos painéis de porta.

Painel	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]
Frente	885	685	95
Traseiro	840	725	90

Através do *software* SolidWorks®, é possível observar os pontos considerados para paletizar os painéis de porta da frente direito (Figura 23) e esquerdo (Figura 24).

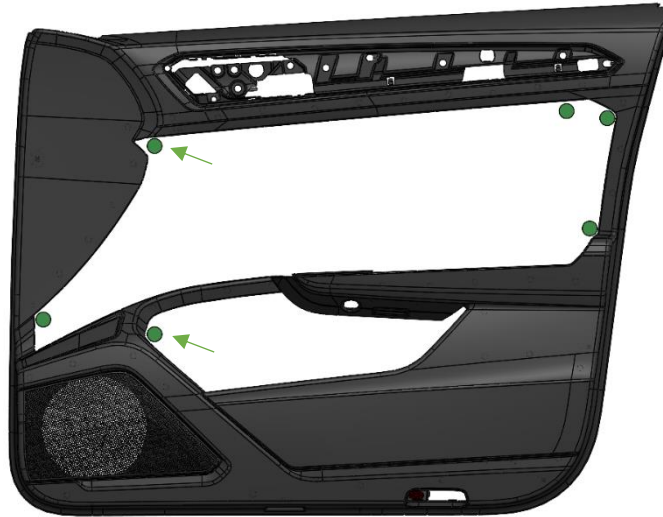


Figura 23 - Possíveis pontos de paletização do painel frente direito.



Figura 24 - Possíveis pontos de paletização do painel frente esquerdo.

Os pontos considerados para ambos os painéis da frente são iguais, como se pode observar. Através da Tabela 4, conclui-se que os painéis da frente têm um lado maior que outro e, por essa razão, deve se optar por paletizar o painel na vertical para que ocupe o mínimo de espaço possível, o que resulta numa menor largura da estrutura metálica. Posto isto, restam duas opções. Ao observar a Figura 23, tendo em conta a paletização vertical, é possível paletizar do lado da coluna de som ou do lado contrário. Como o distanciamento entre pontos é maior no lado da coluna de som, o que resulta numa maior estabilidade do painel, opta-se por paletizar nesses pontos. Tanto na Figura 23 como na Figura 24 as setas a verde indicam os pontos considerados para a paletização.

Para os painéis traseiros a abordagem é a mesma. Através do *software* SolidWorks®, é possível observar os pontos considerados para paletizar os painéis de porta de trás direito (Figura 25) e esquerdo (Figura 26).



Figura 25 - Possíveis pontos de paletização do painel traseiro direito.

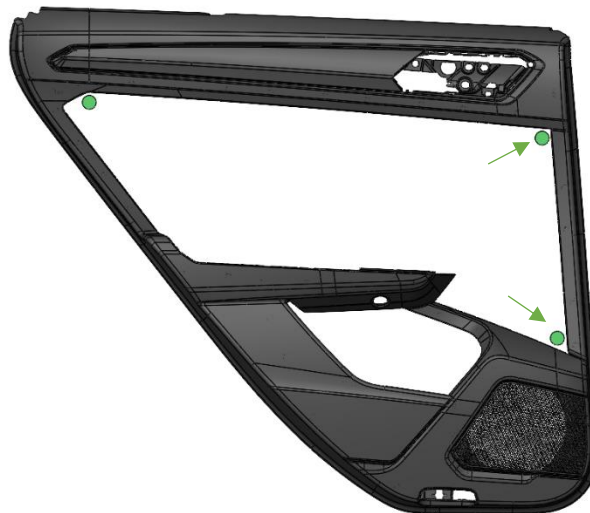


Figura 26 - Possíveis pontos de paletização do painel traseiro esquerdo.

No caso dos painéis traseiros, o procedimento da escolha ideal para os pontos de paletização é o mesmo que os painéis da frente. Através da Tabela 4 conclui-se que a largura é ligeiramente menor. Apesar dos pontos na vertical possuírem um menor espaçamento, este é suficiente para garantir a estabilidade do painel na estrutura. Assim sendo, os pontos considerados para paletizar estão indicados com uma seta.

Por fim, para que a estrutura seja a mesma para os painéis dianteiros e traseiros, o espaçamento entre pontos de paletização tem de ser igual. Através das Figuras 23 e 25 é possível comparar esse distanciamento. Para os painéis dianteiros, o espaçamento não é possível ser alterado, pois ao aumentar ou diminuir essa distância, os pontos embatem com o painel. Nos painéis traseiros o espaçamento pode variar e é possível utilizar esse

distanciamento nos painéis traseiros. Assim sendo, é utilizado o espaçamento entre os pontos de paletização dos painéis dianteiros.

Após a definição dos pontos comuns nos painéis para paletizar na estrutura, procedeu-se ao esboço da estrutura metálica. De salientar, como dito na secção 3.4, a estrutura deve ser capaz de armazenar 72 painéis, com 36 painéis em cada lado da estrutura. Na Figura 27 pode-se visualizar o esboço da estrutura metálica para paletização.

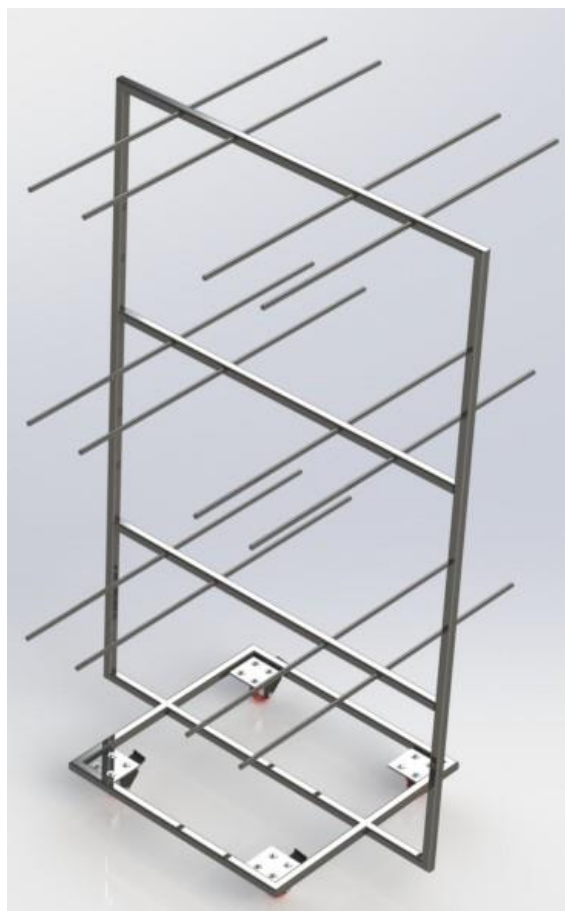


Figura 27 - Esboço da estrutura metálica para paletização dos painéis de porta.

Neste esboço foram consideradas várias condições. A estrutura é composta por três níveis para paletizar, sendo que em cada um deles tem duas posições, direita e esquerda. Em cada posição é possível paletizar seis painéis de porta. Fez-se um esboço com um perfil quadrado para a estrutura e perfil circular para a zona de paletização dos painéis de porta.

Na Tabela 5 estão presentes as condições e respetivas soluções no projeto da estrutura para paletização dos painéis de porta.

Tabela 5 - Condições no projeto da estrutura metálica.

Condição	Solução
Ser móvel	Aplicação de quatro rodas com travão de modo a bloquear as rodas.
Quantidade de painéis	A estrutura é capaz de armazenar 72 painéis, sendo 36 de cada lado.
Altura da estrutura	O colaborador terá de chegar ao nível superior da estrutura, pois este retira os painéis da estrutura e coloca-os numa embalagem. Assim, a altura máxima da estrutura deve ser a altura média de um colaborador sendo adicionado o comprimento do braço.

A solução final é semelhante à estrutura final. A preocupação para a estrutura final é a otimização estética da estrutura em termos de perfil a utilizar, da segurança dos colaboradores e qualidade de trabalho dos mesmos. Esta solução é pouco rígida e robusta estruturalmente, o que traduz no ponto a melhorar para a estrutura final.

3.6.2 Sistema rotativo da estrutura metálica

Neste projeto, um dos objetivos é desenvolver uma estrutura metálica para paletizar painéis de porta. Como foi dito na secção anterior, este esboço da estrutura permite a paletização de 36 painéis em cada lado da estrutura. A estrutura apresentada na Figura 27 implica que o colaborador retire a estrutura, rode e coloque novamente a estrutura na posição de trabalho, o que provoca um aumento do tempo de ciclo.

Assim, para reduzir o tempo de ciclo e minimizar o número de tarefas do colaborador, é necessário desenvolver um sistema que permita à estrutura rodar sem que esta saia da sua posição de trabalho.

O esboço para o sistema de rotação da estrutura metálica resume-se a uma plataforma que, após ligada à estrutura através de soldadura, permite que esta rode. O princípio de funcionamento da plataforma traduz-se num deslizamento de esferas numa pista rolante, como se pode ver na Figura 28.

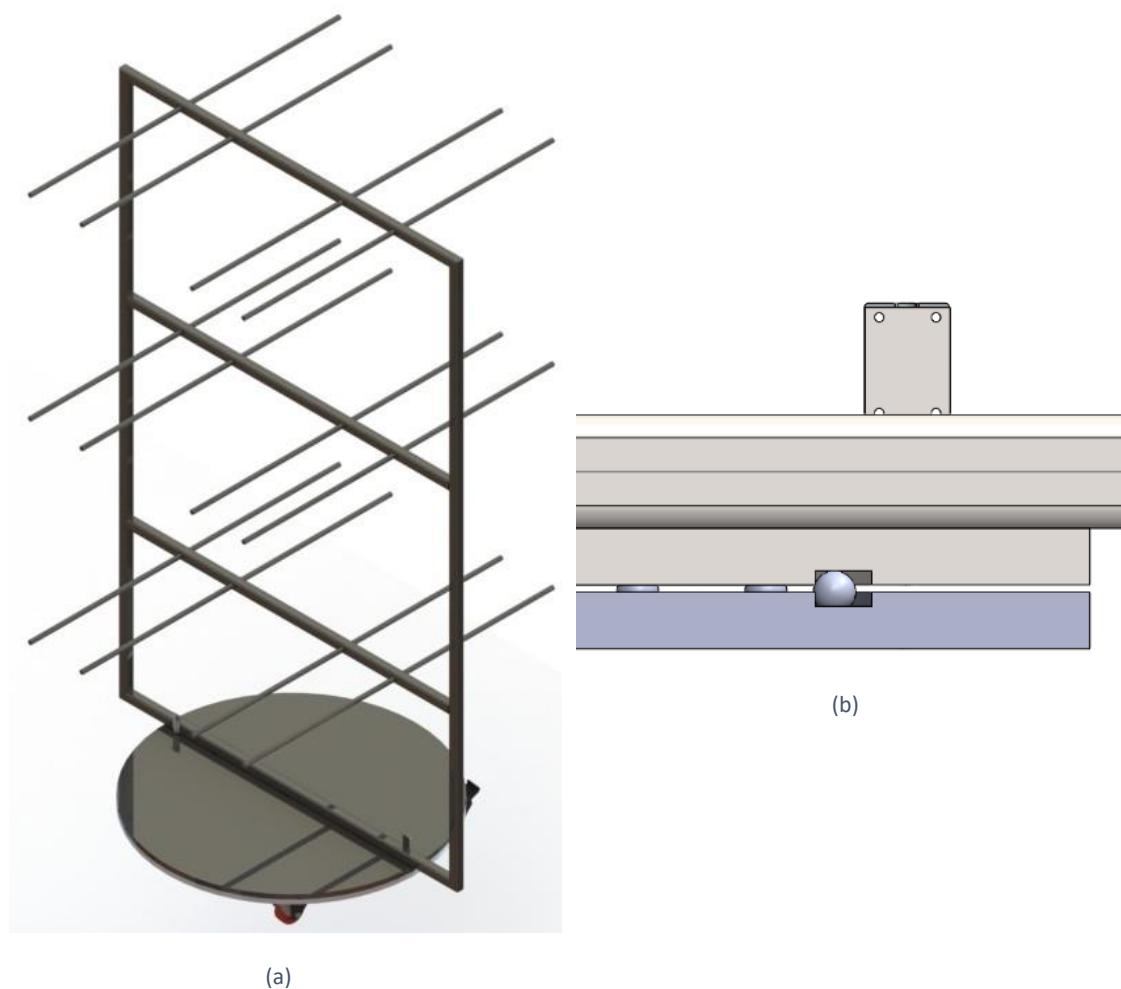


Figura 28 - Esboço da estrutura rotativa: (a) estrutura rotativa completa; (b) detalhe do deslizamento de esferas.

Este mecanismo permite que a livre rotação da estrutura de forma facilitada devido ao deslizamento das esferas presente na plataforma. Na Figura 28 é visível a existência de duas plataformas: a plataforma inferior e a plataforma soldada na estrutura para paletização dos painéis. Em cada um destas plataformas existe uma pista de rolamentos que, ao inserir as esferas, a estrutura roda livremente.

Com esta estrutura o robô colaborativo paletiza os painéis de uma lado e quando completa esse lado da estrutura, o colaborador apenas roda a estrutura, sem esta ter de sair da sua posição. Para garantir que a estrutura fica na sua posição após ter efetuado a rotação, esta possui dois ferrolhos o que permite trancar a estrutura numa única posição. Na Figura 29 vê-se o ferrolho para o trancamento da estrutura na posição correta.

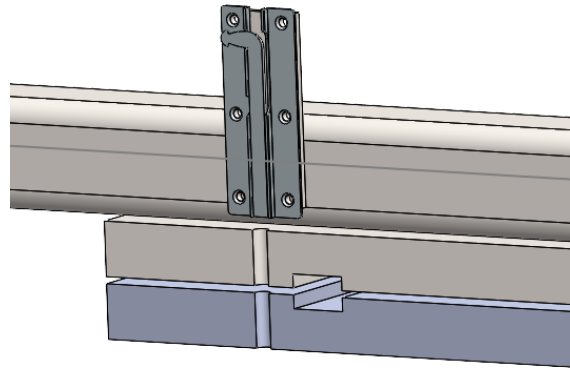


Figura 29 - Detalhe do trancamento da estrutura.

O trancamento da estrutura é feito a partir de um ferrolho que ao posicionar-se na posição correta de trabalho, este tranca manualmente. O bloqueio da estrutura só acontece no momento em que o ferrolho entra na plataforma inferior, pois a plataforma superior está soldada à estrutura.

Esta solução fica muito aquém do bom funcionamento durante o processo. Por um lado, as esferas não permitem a lubrificação pois a pista de rolamento é aberta causando um gasto elevado das esferas porque estas rolam em seco. Outro motivo de não optar por esta solução é a possibilidade de grande instabilidade da estrutura, visto que apenas esta apoiada nas esferas. Uma forma de melhorar a estabilidade da estrutura seria aumentar o raio de giração da pista de rolamento estando melhor apoiada. Por outro lado, a produção das duas chapas circulares com o rasgo da pista de rolamento é muito complexa e difícil, o que origina uma mão-de-obra elevada. Por último, esta solução não é automatizada.

A ideia desta mudança no processo produtivo de painéis de porta é automatizar o máximo possível através da introdução de robôs, logo o sistema de rotação também deveria ser automático.

3.6.3 Suporte para robô colaborativo

A robotização é comandada através de componentes pneumáticos e eletrônicos, como bombas de vácuo, electroválvulas, relés, etc, que apenas funcionam com eletricidade e ar comprimido. Esses componentes são ligados diretamente ao robô implicando a presença dum quadro elétrico no posto de trabalho. Por outro lado, o robô precisa de paletizar os painéis, aproximadamente, a uma altura de 2,5 m.

Posto isto é imprescindível um suporte de trabalho para o robô, uma base que permita a fixação do robô, a presença do quadro elétrico e ainda alojar todos os componentes pneumáticos.

Inicialmente, foi projetado um suporte para o robô que garantisse a robustez e o bom funcionamento do processo, de acordo com os requisitos anteriormente referidos. A Figura 30 representa o primeiro esboço feito para o suporte do robô.



Figura 30 - Primeira versão do suporte robô.

Nesta primeira versão, o critério principal foi a altura do suporte para o robô. O suporte do robô deve ter uma altura considerável, de cerca 1,2 m, para que o robô possa paletizar os painéis no último patamar.

Como é possível observar na Figura 30, a zona superior possui quatro furos passantes para apertar o robô colaborativo e na zona inferior possui quatro furos passantes para fixar o suporte ao solo. Existe ainda quatro nervuras que ligam a zona inferior ao pé do robô para fortalecer a rigidez do suporte. De salientar, que as características mencionadas são essenciais para a versão final do projeto do suporte.

Numa segunda abordagem, foi projetado um suporte para o robô que permitisse, ao robô SEPRO, a colocação do painel de porta numa base. De certa forma, o processo resumia-se a:

- O robô SEPRO retira o painel da máquina de injeção;
- Coloca o painel numa base de trabalho;
- O robô colaborativo pega no painel e paletiza.

A Figura 31 representa o segundo esboço feito para o suporte do robô, sendo a diferença para a primeira versão, a adição de uma mesa de trabalho. Esta mesa de trabalho surge para que seja possível ao robô SEPRO colocar o painel, para posteriormente o robô colaborativo paletizar.

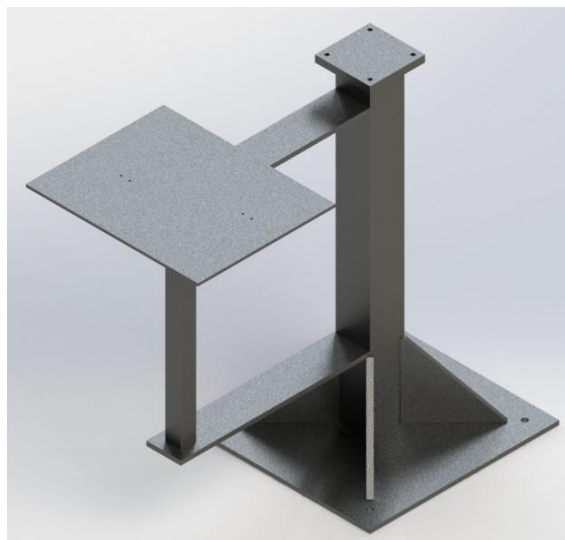


Figura 31 - Segunda versão do suporte robô sem base de trabalho.

A mesa de trabalho serve para aparafusar uma base em perfil de alumínio capaz de impedir deslocamentos e rotações do painel de porta ao ser posicionado pelo robô SEPRO. Tanto para a estrutura metálica como para a base, foi projetada uma base de trabalho para os quatro moldes de painéis de porta.

A grande razão para projetar uma base de trabalho que sirva para os quatro painéis é muito simples. Como foi dito na secção 3.4, este processo deve ser de fácil e simples mobilidade. Assim sendo, o processo torna-se mais produtivo se houver menos tarefas de desmontagem de componentes. A existência de mais que uma variedade de bases de trabalho pode levar à demora na troca de bases de trabalho ou então à troca indevida da base. Por outro lado, é inconveniente a troca de base de trabalho sempre que se altere o molde de injeção presente na máquina. Uma única base evita os erros mencionados e aumenta a simplicidade do processo.

A forma ideal para a base de trabalho resume-se a empilhar os quatro painéis e encontrar pontos comuns de restrição de movimentos. A fixação dos painéis deve ser feita na longitudinal, transversal, rotações sentido horário e anti-horário. Como os painéis da frente são maiores que os painéis de trás, então em primeiro lugar, encontra-se os pontos de restrição dos painéis da frente. Na Figura 32 mostra os possíveis pontos de restrição para os painéis da frente direito e na Figura 33 para os painéis da frente esquerdo.



Figura 32 - Possíveis pontos de fixação do painel dianteiro direito na base de trabalho.

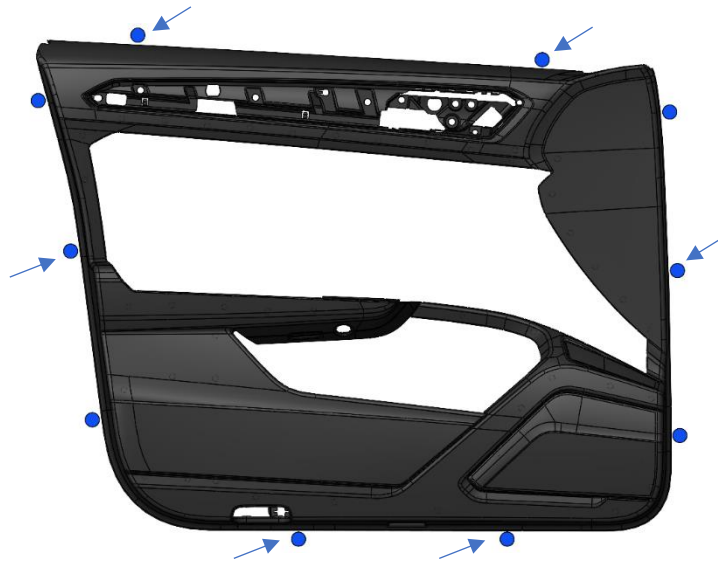


Figura 33 - Possíveis pontos de fixação do painel dianteiro esquerdo na base de trabalho.

Os pontos superiores e inferiores impedem o deslocamento transversal do painel e os pontos laterais impedem o deslocamento longitudinal. Foram considerados três possíveis pontos em cada lateral do painel, como é possível visualizar na Figura 32. Apenas considerou-se o ponto indicado com uma seta visto que, para impedir o deslocamento só é necessário um ponto e os restantes pontos interferem com o painel traseiro. Com os pontos considerados, indicados com uma seta, as rotações horário e anti-horário são impedidas.

O passo seguinte é encontrar os pontos de restrição para os painéis traseiros ao considerar os pontos de restrição dos painéis dianteiros. Assim sendo, na Figura 34

mostra os possíveis pontos de restrição para os painéis da frente direito e na Figura 35 para os painéis da frente esquerdo.

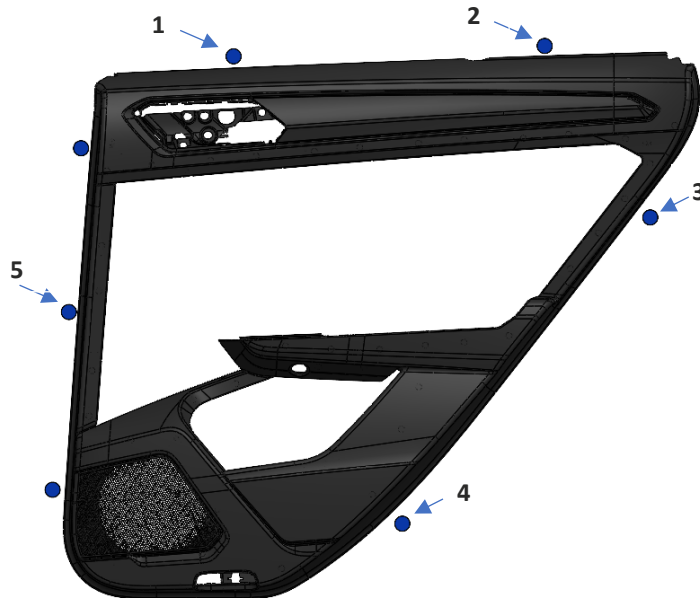


Figura 34 - Possíveis pontos de fixação do painel traseiro direito na base de trabalho.



Figura 35 - Possíveis pontos de fixação do painel traseiro esquerdo na base de trabalho.

Para os painéis traseiros, primeiramente impediram-se as rotações horário e anti-horário. Assim, os pontos 2,3,4,5 impedem as duas rotações. A rotação horária é impedida através dos pontos 3 e 5 e a rotação anti-horária é impedida através dos pontos 2 e 4. O ponto 1 é utilizado nos painéis dianteiros e no caso dos painéis traseiros permite o impedimento transversal. Com os pontos 1,2,3,4 e 5 o painel traseiro é impedido transversalmente e longitudinalmente.

Os pontos de restrição para ambos os painéis estão encontrados, o que permite a modelação da base de trabalho. A Figura 36 mostra a base de trabalho, feita em perfil de alumínio, para os painéis de porta. Nas Figuras 37, 38, 39 e 40 confirma-se que a base de trabalho se adequa para qualquer painel.

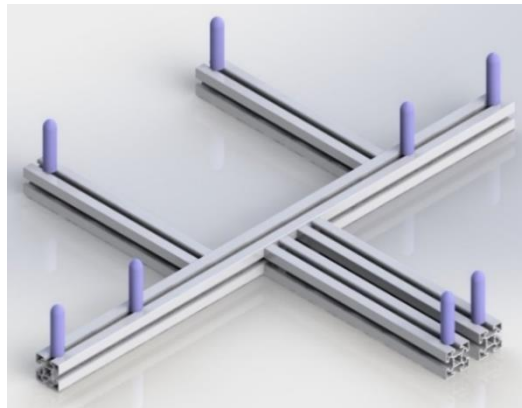


Figura 36 - Base de trabalho para os painéis de porta.

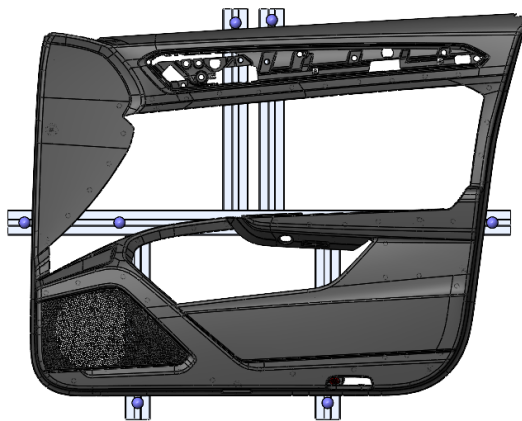


Figura 37 - Painel frente direito na base de trabalho.

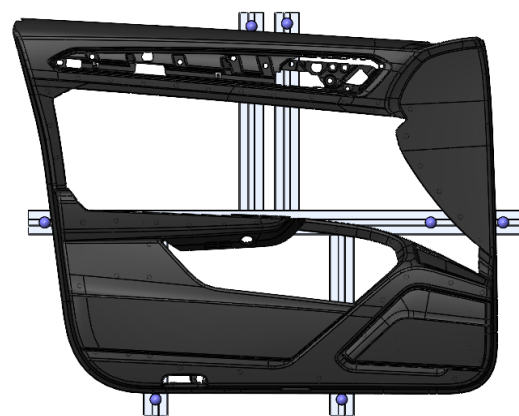


Figura 38 - Painel frente esquerdo na base de trabalho.

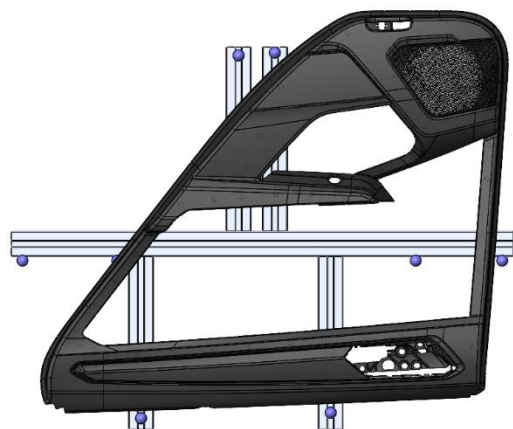


Figura 39 - Painel traseiro direito na base de trabalho.

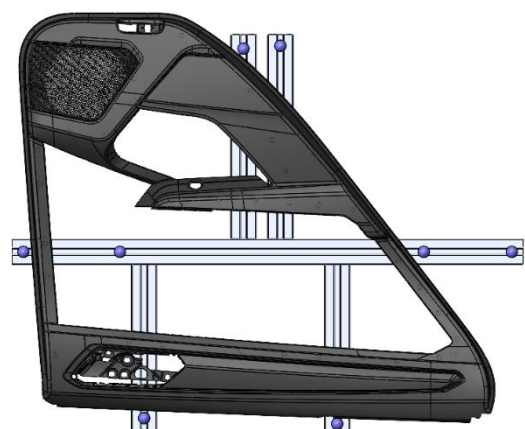


Figura 40 - Painel traseiro esquerdo na base de trabalho.

A base de trabalho é composta por cinco barras em perfil de alumínio e oito pinos impressos numa máquina de impressão 3D. O objetivo dos pinos azuis, como é possível visualizar na Figura 36, é obstruir o deslocamento ou rotação dos painéis de porta. A Figura 41 representa a segunda versão do suporte para robô com a base de trabalho.

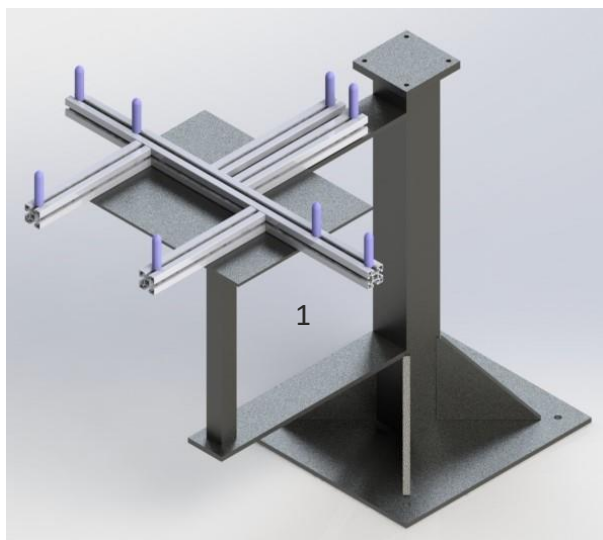


Figura 41 - Segunda versão do suporte robô.

Este suporte permite a sua aplicação para qualquer um dos painéis devido à base de trabalho. A zona destinada a todo o material pneumático e elétrico (quadro elétrico) encontra-se debaixo da base de trabalho, enumerado a 1.

Esta solução apresenta várias barreiras à sua implementação no processo. Apesar da base projetada servir para ambos os painéis, em termos de tempo de ciclo, a adição de uma base de trabalho resulta na adição de uma tarefa de trabalho e aumenta o tempo de ciclo de trabalho. Em termos de espaço, esta solução não é a ideal visto ocupar grande espaço no posto de trabalho. Esse espaço deve ser organizado, o que proporciona uma boa flexibilidade na deslocação das embalagens, pois o colaborador necessita de espaço para substituir as embalagens após estas estarem cheias.

3.7 Projeto

3.7.1 Estrutura metálica para paletização

Na secção 3.6.1 foi explicado o esboço da estrutura metálica, explicando ainda o verdadeiro objetivo desta estrutura. O projeto final da estrutura metálica permite a paletização de 72 painéis de porta, sendo possível paletizar os quatro tipos de painéis. A Figura 42 representa o projeto final da estrutura metálica com todos os componentes.

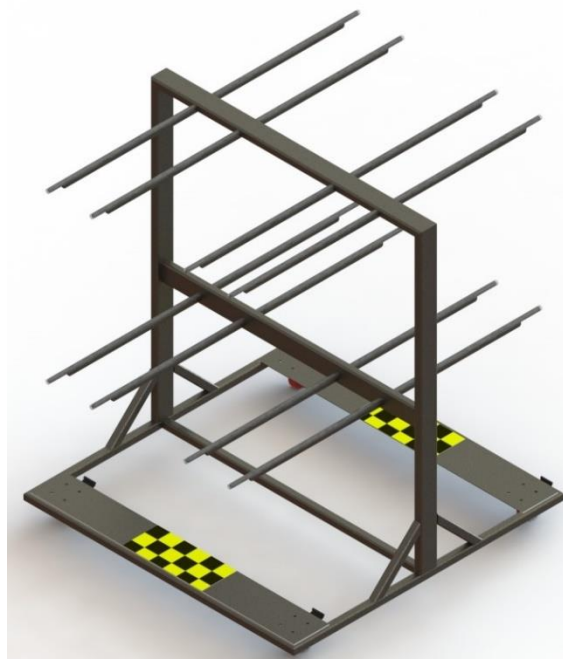


Figura 42 - Esboço final da estrutura metálica para paletização dos painéis de porta.

Comparativamente ao esboço feito numa primeira abordagem, o projeto final apresenta as mesmas características, sendo esta uma versão melhorada em termos de estabilidade, rigidez e segurança para os colaboradores.

Um dos cuidados a ter no dimensionamento da altura da estrutura é que não pode ser demasiado elevada devido a causar instabilidade, nomeadamente grandes oscilações, e também devido ao alcance por parte do colaborador. Depois de os painéis estarem paletizados pelo robô, é necessário que o colaborador retire todos os painéis dos níveis de paletização sem dificuldade. Assim, a grande mudança na estrutura relativamente ao esboço inicial é a remoção do terceiro nível de paletização.

No esboço da estrutura, o terceiro nível de paletização encontrava-se a uma altura elevada, o que dificulta o alcance do painel por parte do colaborador, sendo uma altura compreendida entre 1,9 e 2,1 m. De modo a melhorar a qualidade de trabalho do colaborador, decidiu-se retirar o terceiro nível e distribuir igualmente o número de painéis nos restantes. Assim, a lotação de painéis na estrutura é igual, 72 painéis, o que corresponde a um total de 9 painéis em cada par de tubos de paletização, passando a 18 painéis por nível, mantendo os 36 painéis em cada lado da estrutura. Na Figura 43 é possível ver as novas distâncias máximas de alcance dos painéis por parte do colaborador.

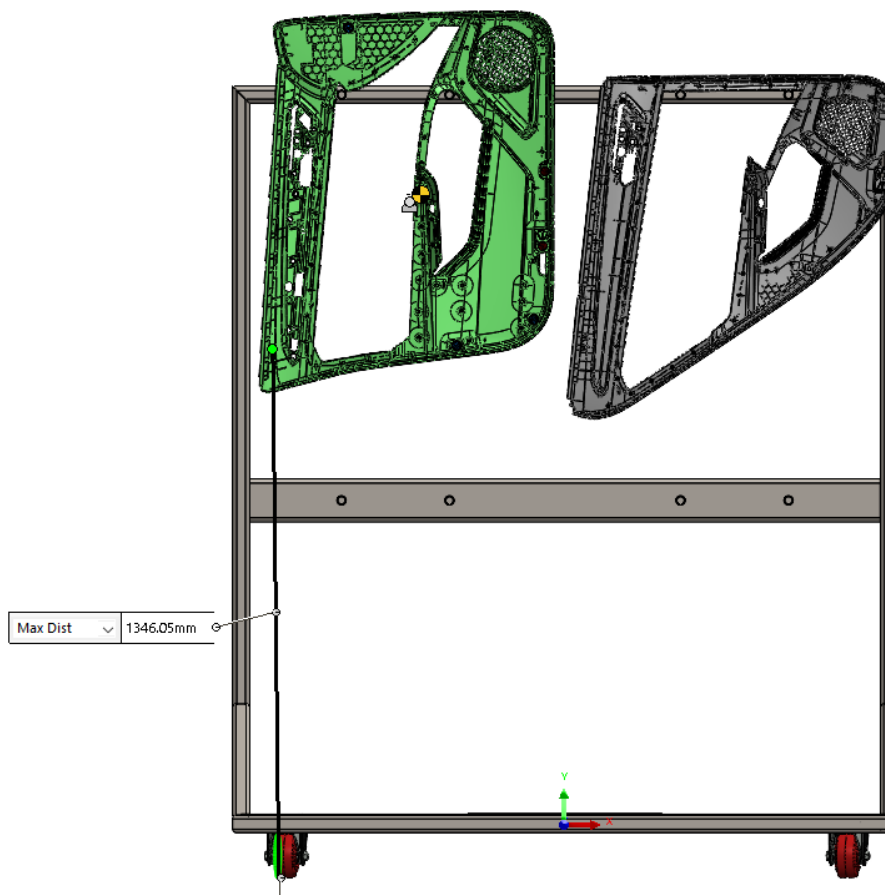


Figura 43 - Máxima distância entre solo e painel.

Através do *software* SolidWorks® é possível medir a máxima distância entre o solo, que neste caso é a roda da estrutura, e o painel dianteiro e traseiro. Observando a linha do comprimento máximo, presente na Figura 43, a distância máxima é de cerca 1350 mm. O colaborador, ao retirar o painel da estrutura, terá de colocar a mão na parte mais baixa do painel e, assim, o ponto verde representa a maior distância de contato mão-painel. Considera-se apenas o ponto mais alto entre os dois painéis, sendo o painel dianteiro o mais alto, como se observa na Figura 43.

Para validar a altura do nível de paletização mais alto, efetuou-se um estudo ergonómico para analisar o alcance funcional vertical. De acordo com o Anexo A, os dados necessários estão presentes na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados necessários para estudo de ergonomia.

	Homens	Mulheres
Alcance funcional vertical [mm]	2190	2020
Desvio padrão [mm]	80	71
Variável estatística de ordem 5% [-]	-1,64	

Neste estudo de ergonomia é aplicado o conceito de percentil, que é dado pela seguinte expressão:

$$Pk = m + Zk \times s; \quad (1)$$

Sendo: Pk – percentil de ordem k ; m – média; Zk – variável estatística de ordem k ; s – desvio padrão;

Como se pode ver na Tabela 6, utiliza-se uma variável estatística para 5% para garantir que apenas 5% da população não consegue alcançar à altura pretendida, sendo alcançável para 95% da população. De seguida calculam-se os valores médios da média e desvio padrão entre homens e mulheres do alcance funcional vertical, o que resulta em valores de 2105 mm e 75,5 mm, respetivamente.

Posto isto, segue-se ao cálculo da altura que a estrutura deve ter para estar ao alcance de 95% da população, sendo dada por:

$$P(95\%) = 2105 + (-1,64) \times 75,5 = 1981,18 \text{ mm.}$$

Como 1981,18 mm é maior que a altura máxima da estrutura projetada, sendo de 1346,05 mm, então verifica-se o alcance dos painéis de porta presente no último nível por parte dos colaboradores.

Em termos de estabilidade e rigidez da estrutura, após analisado o catálogo de uma empresa de tubos de aço (Grupo Ferpinta) optou-se por utilizar dois tipos de perfil tubular. Utiliza-se na estrutura tubo de perfil quadrado e perfil retangular. Analisando a Figura 42 é visível a utilização do perfil quadrado na base da estrutura (zona inferior) e o perfil retangular para a altura da estrutura.

A grande dificuldade no dimensionamento da estrutura é a sua facilidade de oscilação. A estrutura à medida que se aumenta a altura mais tendência tem para oscilar, não sendo desejável. Assim, esta estrutura deve ser o mais estável possível caso se exerça uma força.

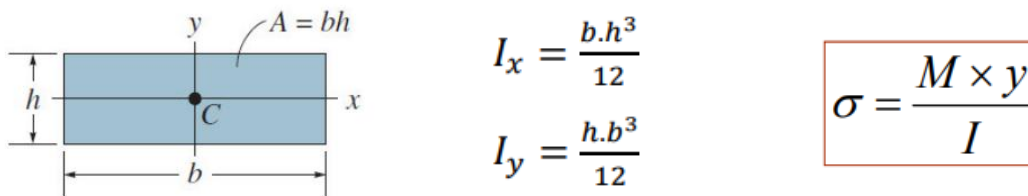


Figura 44 - Momento de inércia de perfis de secção retangular (Vilaça, 2018).

Analisando a Figura 44, pela equação da tensão normal, conclui-se que ao diminuir a tensão aplicada aumenta-se o momento de inércia. Concluindo, para diminuir a tensão instalada e reduzir oscilação originada pela flexão, o momento de inércia deve ser o maior possível.

O momento de inércia para o perfil quadrado é dado pela aresta à quarta a dividir por doze. Assim, comparando os três valores possíveis de momento de inércia, conclui-se que o maior valor é para um perfil retangular com flexão em torno do eixo dos Oy . Logo, em termos de construção da estrutura, utiliza-se o perfil retangular, e considera-se o eixo dos Ox paralelo aos tubos para paletização, como se pode verificar na Figura 45.

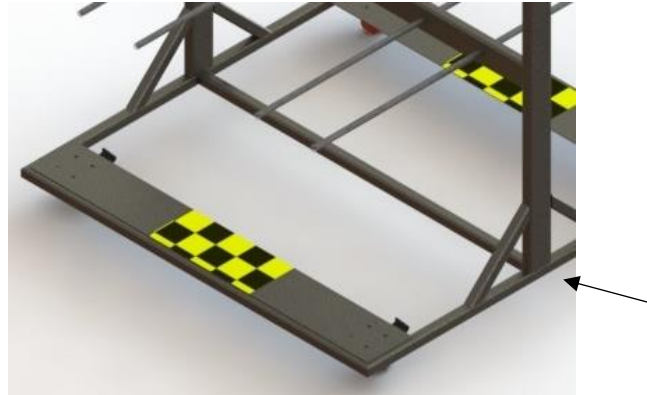


Figura 45 - Pormenor do perfil utilizado na estrutura.

Em termos de segurança dos colaboradores, foram realizadas algumas alterações ao esboço feito inicialmente. A primeira alteração visível na Figura 42 é a pintura da chapa que aloja as rodas com trancador, para permitir aos colaboradores a facilidade de visão da estrutura para que não colidam com a mesma. Por outro lado, optou-se por arredondar os cantos da estrutura para evitar a existência de arestas vivas em zonas de perigo para os colaboradores.

Por fim, melhorou-se os tubos para paletização dos painéis, sendo estes de perfil circular reforçados com uma chapa. Como cada fila deve suportar nove painéis e os tubos apresentam uma distância de 825 mm (nível superior) e de 855 mm (nível inferior), adiciona-se um reforço em aço, através de soldadura, para reforçar os tubos de paletização, reduzindo a flecha provocada pela carga dos painéis de paletização, como se apresenta na Figura 46.





Figura 46 - Reforços da estrutura: (a) reforço do nível superior; (b) reforço soldado na estrutura; (c) reforço do nível inferior e (d) reforço soldado na estrutura.

Os painéis são feitos através de injeção de plástico e são paletizados logo a seguir, pelo que ainda podem estar quentes e poderem deformar muito facilmente. Para minimizar o risco de deformação do painel, foram considerados tubos de politetrafluoretileno (PTFE). Este material apresenta uma boa resistência ao impacto, protegendo os tubos de paletização, e apresenta uma boa capacidade de amortecimento.

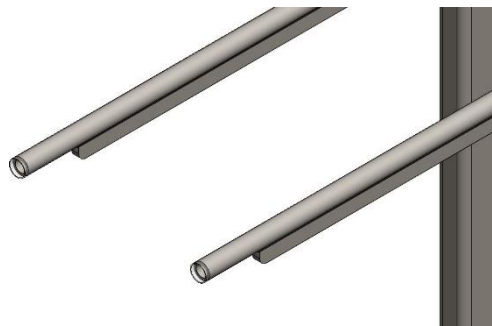


Figura 47 - Pormenor dos tubos de PTFE

Na Figura 47 é visível que os tubos de paletização dos painéis estão protegidos com tubos de PTFE (transparentes). Os tubos de PTFE apresentam um maior diâmetro interior para a possível montagem e apresentam um maior comprimento para proteger os colaboradores caso embatam com a estrutura.

3.7.2 Sistema rotativo da estrutura metálica

O sistema de rotação da estrutura metálica é completamente diferente do seu esboço. Este sistema é totalmente automatizado e permite a rotação da estrutura metálica de forma facilitada, sendo devidamente dimensionados todos os componentes estruturais, como engrenagens, cilindros pneumáticos e rolamentos. A Figura 48 representa o projeto final do sistema rotativo da estrutura metálica.

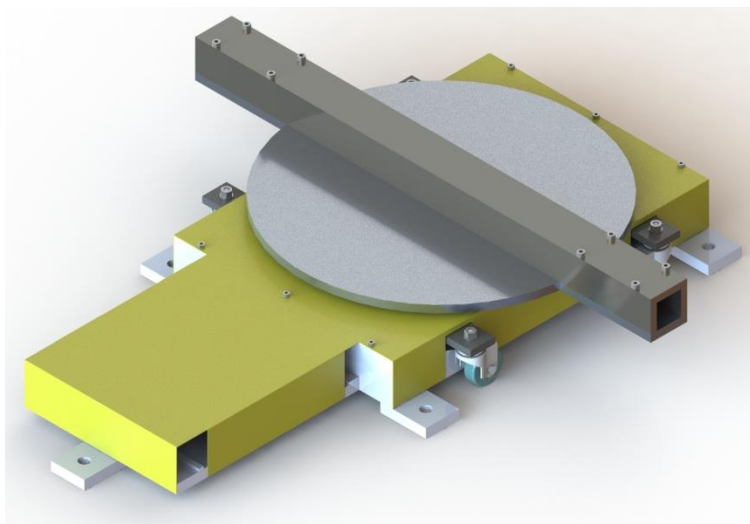


Figura 48 - Esboço final do sistema rotativo da estrutura metálica para paletização dos painéis de porta.

A base da estrutura é composta por duas zonas principais, sendo uma para fixar os cilindros, electroválvulas e sensores, e outra para o mecanismo de rotação e suporte das rodas, como se pode ver na Figura 49.

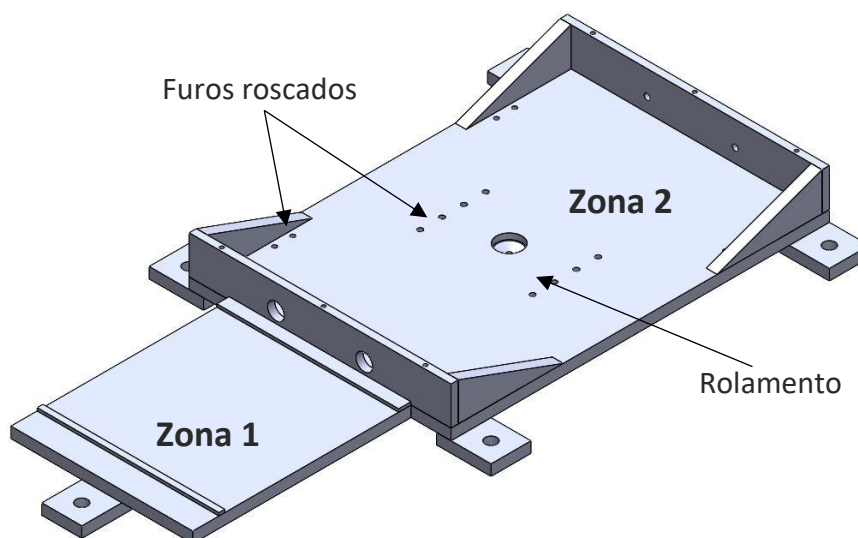


Figura 49 - Base do sistema de rotação.

Na zona 1 estão fixos os cilindros pneumáticos, a electroválvula, sensores e a ficha *harting*. Nesta zona são usadas umas chapas soldadas para compensar a altura dos cilindros colocando-os ao nível das rodas dentadas, pois sem elas, os cilindros estariam descentrados com as engrenagens.

A electroválvula permite o controlo por parte do controlador do robô para a atuação dos cilindros. Os sensores enviam um sinal ao controlador do robô da posição do cilindro. São necessários quatro sensores (dois sensores para cada cilindro): um para a

posição de cilindro recuado e o outro para a posição de cilindro avançado. A ficha *harting* permite a troca de sinais entre o sistema de rotação e quadro elétrico.

A zona 2 permite a montagem de todos os componentes para o mecanismo de rotação, tal como o pinhão, cremalheiras, veio e componentes de fixação da cremalheira. Nesta zona existem vários furos roscados para aparafusar os componentes de fixação das engrenagens e para fixar os suportes das rodas da estrutura. No centro existe um furo para alojar um rolamento. Entre a zona 1 e 2 existe uma divisão que permite apertar os cilindros pneumáticos através dos furos passantes. Na outra extremidade da zona 2 existem dois furos roscados para aperto dos batentes, sendo que estes são possíveis de serem ajustados consoante o avanço pretendido dos cilindros. Na Figura 50 apresenta-se a montagem dos componentes na base da estrutura. De referir que a electroválvula, ficha *harting* e sensores de posição do cilindro não são visíveis na figura.

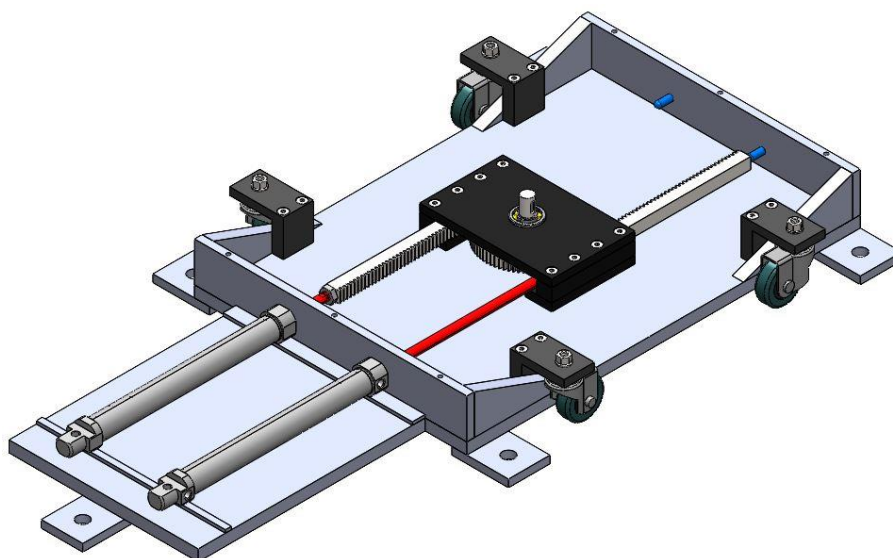


Figura 50 - Base com montagem dos componentes.

Os componentes para fixação da cremalheira permitem o correto funcionamento do engrenamento entre a cremalheira e o pinhão, anulando a possibilidade do afastamento do engrenamento. Na Figura 51 apresenta-se um corte para visualizar o engrenamento correto entre a cremalheira e pinhão.

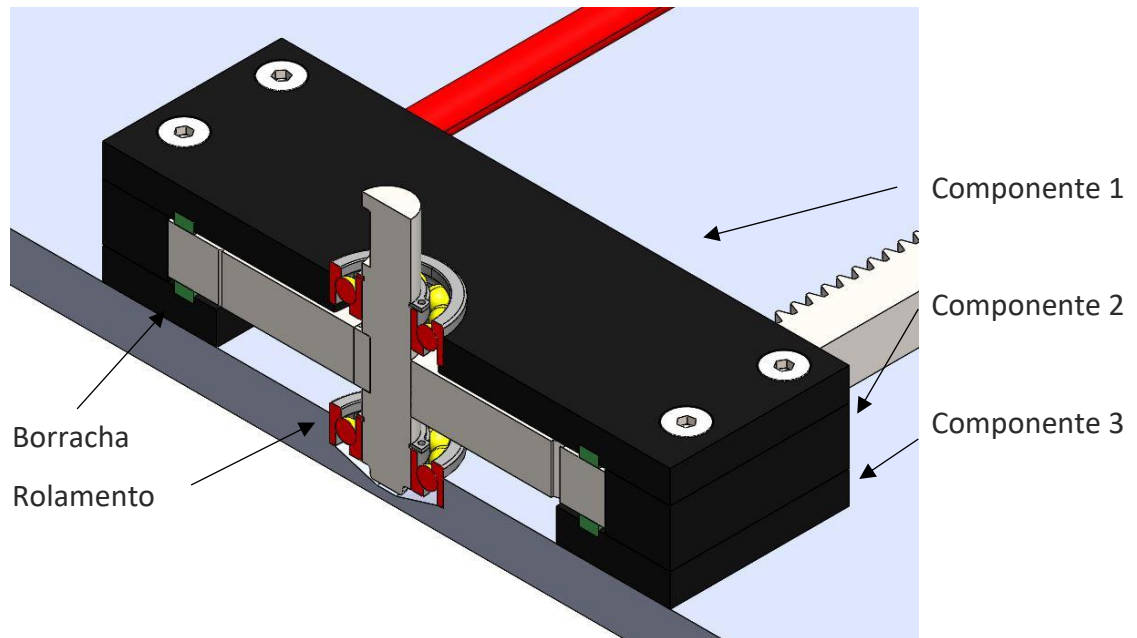


Figura 51 - Corte para a visualização do engrenamento entre cremalheira e pinhão.

Como dito anteriormente, os componentes de fixação da cremalheira não permitem o afastamento do engrenamento pois estão apertados à base. O componente 1 permite alojar um rolamento, sendo que o outro é alojado na base da estrutura, e ainda apertar todos os componentes na base da estrutura. O componente 2 permite criar uma barreira para impedir o afastamento do engrenamento. O componente 3 permite centrar a cremalheira ao cilindro, que se devem apresentar ao mesmo nível. Por fim, a verde estão ilustradas as borrachas para diminuir o atrito de forma a facilitar o deslocamento da cremalheira. É visível também a montagem do rolamento na base, que é fixado através de um anel elástico montado no veio. A montagem do segundo rolamento é feita no componente 1 e fixado por um anel elástico montado no veio.

Na Figura 52 são visíveis os restantes componentes fixados na base da estrutura, dos quais de realçam batentes para limitar o avanço dos cilindros, o suporte das rodas para mover a estrutura mais facilmente e, por fim, o furo para fixar na posição de trabalho a base ao solo.

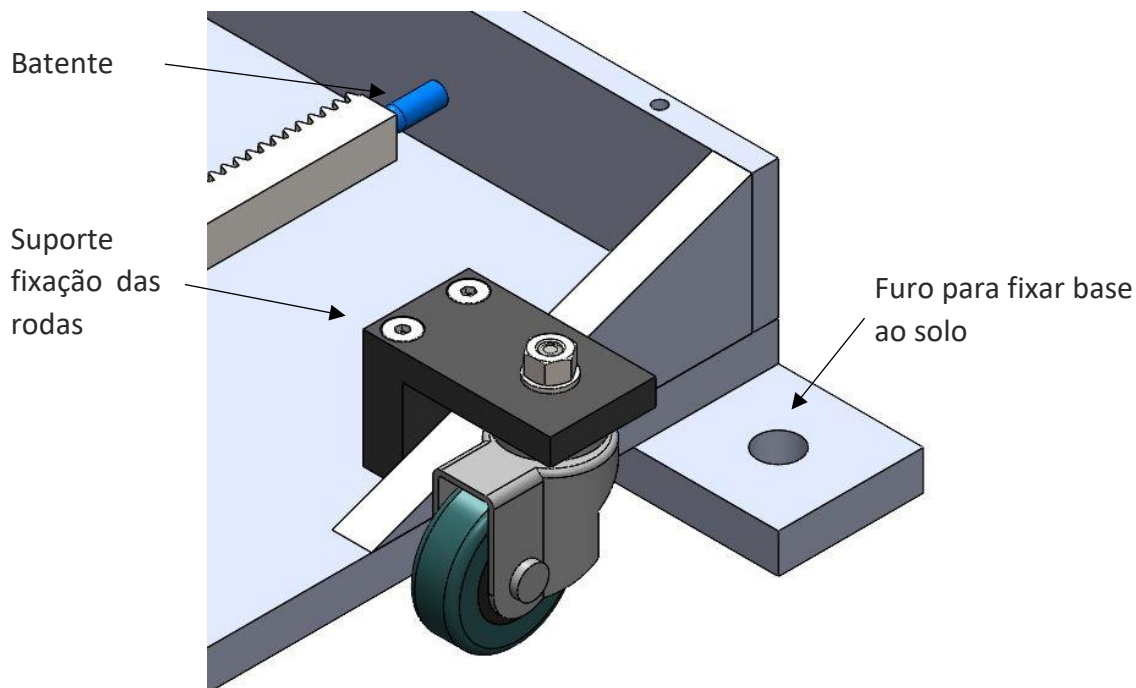


Figura 52 - Corte para visualizar batente e suporte das rodas.

As rodas para a estrutura têm um diâmetro de 50 mm, sendo que a altura do suporte foi ajustada para que seja possível a montagem da roda. O mecanismo de suporte da roda é rotativo segundo um eixo vertical de modo a facilitar a sua movimentação. A sua fixação no suporte é feita a partir de uma porca e uma anilha, visto que o suporte da roda apresenta um pino roscado no topo.

São utilizados chumbadores para fixar o sistema de rotação ao solo, visto que com parafusos não é possível.

Aí a forma de transmissão da rotação do veio para a estrutura metálica, como se pode ver na Figura 51, na zona superior do veio existe uma abertura para a colocação de uma chaveta. Esta chaveta permite a ligação entre o veio e uma patela rotativa, como se apresenta na Figura 53.

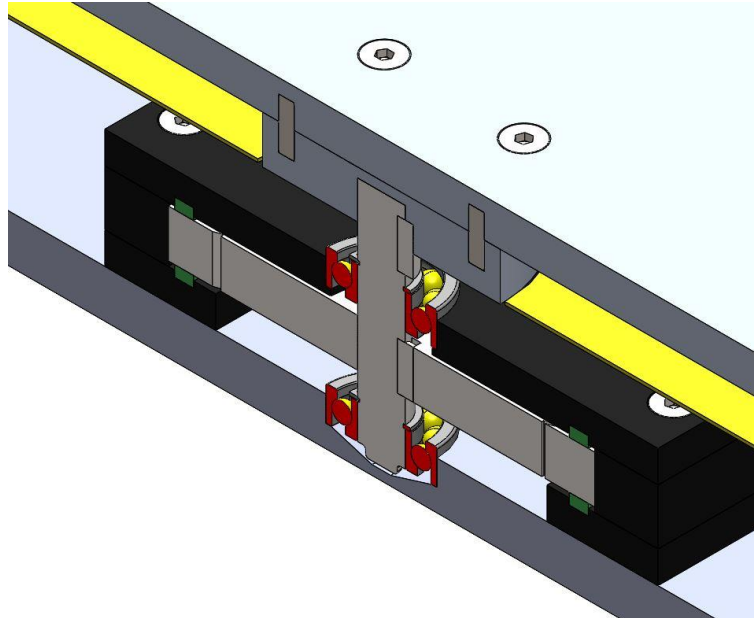


Figura 53 - Corte para a visualização da ligação entre o veio e a patela rotativa.

Esta patela rotativa é fixada ao veio por meio de uma chaveta, como dito anteriormente, sendo esta apertada e guiada através de quatro parafusos e quatro pinos cilíndricos, respectivamente, a uma chapa.

A transmissão da rotação da patela rotativa para a estrutura de paletização dos painéis de porta é feita através de uma chapa (Figura 54). De salientar que, como é visível na Figura 48, a chapa de proteção é aparafusada depois de montada a patela de rotação.

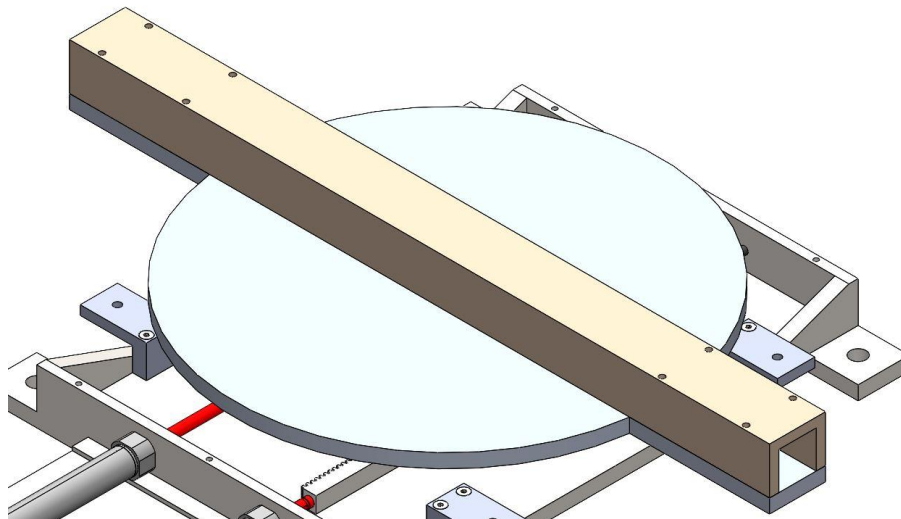


Figura 54 - Chapa para aperto na patela de rotação e perfil para aperto na estrutura de paletização.

A chapa é aparafusada na patela de rotação, que naturalmente transmite a sua rotação para a chapa. O diâmetro da circunferência na zona central da chapa tem uma dimensão muito superior à da patela rotativa com o intuito de ganhar uma maior estabilidade durante a rotação da estrutura. Por fim, é aparafusado um perfil na chapa, com o

objetivo de apertar a estrutura de paletização através do seu perfil horizontal interior. Na Figura 55 é visível com maior facilidade essa montagem.

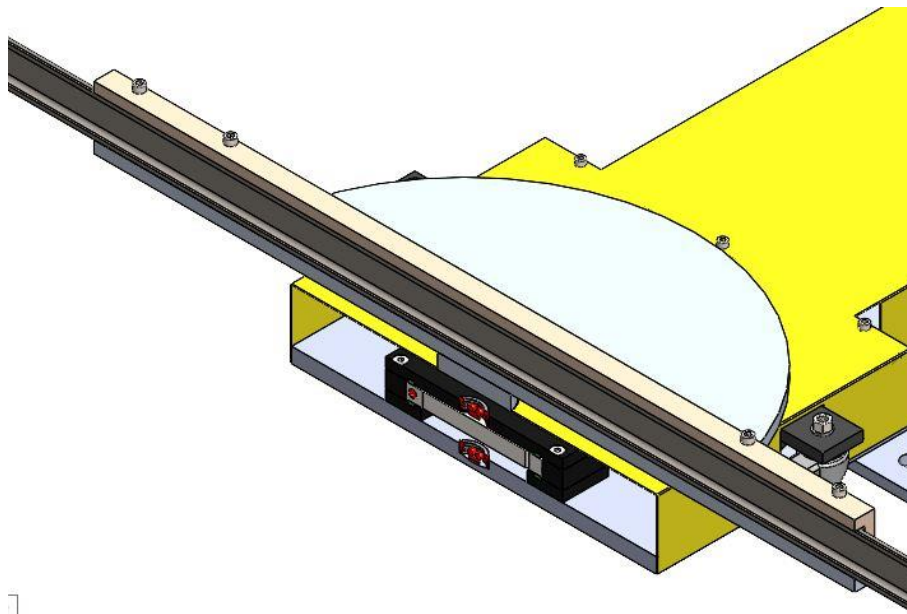
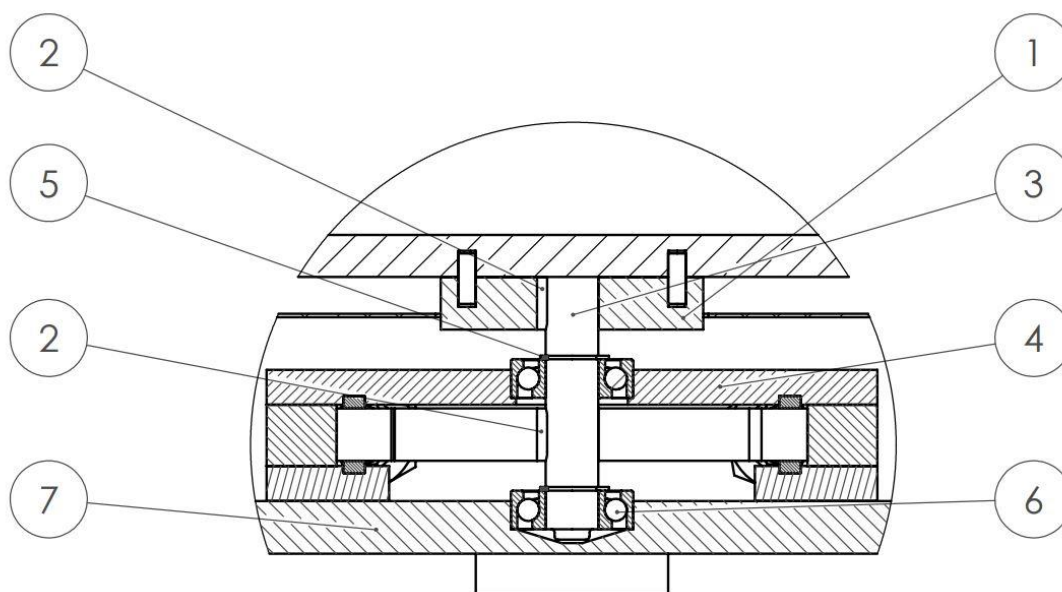


Figura 55 - Corte da montagem da chapa ao perfil e estrutura de paletização.

A Figura 56 permite a melhor percepção dos componentes necessários para a rotação da estrutura.



Legenda: 1 - Patela de rotação; 2 - Chaveta; 3 - Veio; 4 - Componente 1;
5 - Anel elástico; 6 - Rolamento; 8 - Base.

Figura 56 – Vista em corte do sistema de rotação da estrutura.

A rotação é feita a partir de um sistema pinhão-cremalheira, como se pode ver na Figura 56. O cilindro ao avançar ou recuar, como está aparafusado na cremalheira, permite mover a mesma. Como se trata de um engrenamento, o deslocamento da cremalheira permite a rotação do pinhão. É montado no pinhão, através de uma chaveta, um veio que permite transmitir a rotação para a estrutura de paletização dos painéis de porta. Essa transmissão apenas é possível ao fixar o veio à patela de rotação. Sendo que, para isso, é utilizada outra chaveta. Tratando-se de uma rotação é imprescindível o uso de rolamentos que suportem carga axial e radial.

Neste caso, são utilizados dois rolamentos para evitar descentramentos do veio. Os rolamentos têm de absorver maior carga axial do que radial pois o veio está disposto na vertical, ou seja, na direção axial dos rolamentos. A carga radial teoricamente é nula pois os cilindros atuam em sintonia e em sentido oposto, mas é tida em consideração a carga radial igual à força exercida por um cilindro. O dimensionamento dos rolamentos é efetuado na secção 3.7.2.3.

Os rolamentos, para um correto funcionamento, precisam de estar fixos. Para isso, tanto a base como o componente 1 apresentam um rasgo que permite encostar o rolamento para que este não se mova na vertical no sentido descendente. O rolamento pode, portanto, mover-se na vertical no sentido ascendente pelo que, para anular esse deslocamento, são utilizados anéis elásticos. Os anéis elásticos utilizados são para veio visto apertarem nos rasgos existentes no veio, fixando os rolamentos na posição.

Uma das limitações existente no projeto do sistema de rotação é a altura máxima que esta pode ter. Como o sistema é fixado na estrutura de paletização dos painéis, o sistema rotativo terá de ter no máximo uma altura de 105 mm, como se apresenta na Figura 57. No entanto, o ideal é que a altura seja de 105 mm de forma a garantir o aperto correto do sistema de rotação ao solo.

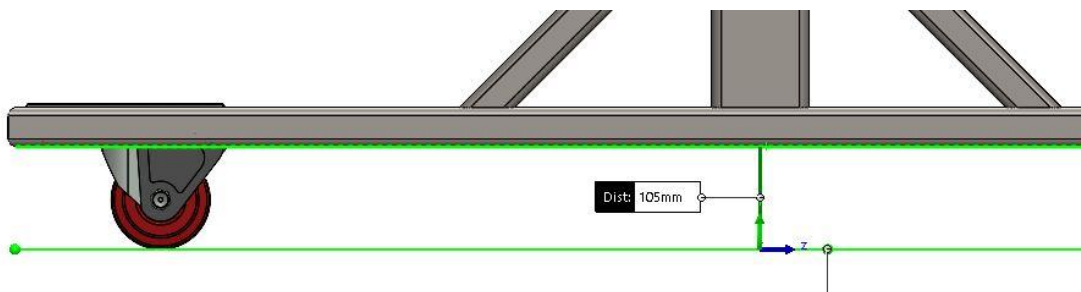


Figura 57 - Altura máxima do sistema de rotação.

Assim, decidiu-se que as rodas do sistema de rotação devem estar niveladas com as rodas da estrutura de paletização para que a movimentação do sistema seja facilitada e que a base do sistema de rotação se encontra a 2 mm do solo (Figura 58). Este desnível acontece para que a movimentação seja facilitada, não havendo arrasto por parte da base. Assim que o sistema de rotação esteja na posição correta de trabalho, a base é apertada ao solo com cinco parafusos.

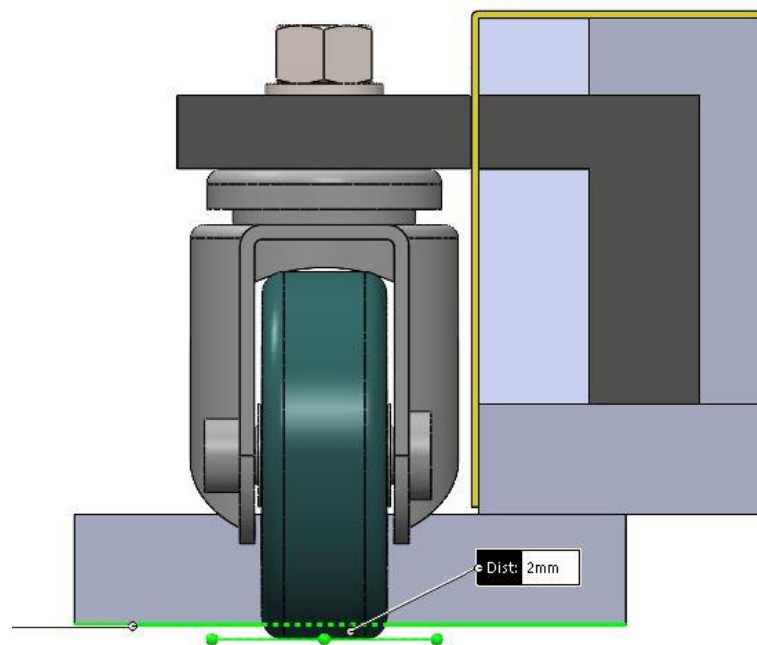


Figura 58 - Desnível entre a roda e base do sistema de rotação.

Na Figura 59 é visível que as rodas do sistema de rotação estão alinhadas com as rodas da estrutura de paletização dos painéis.

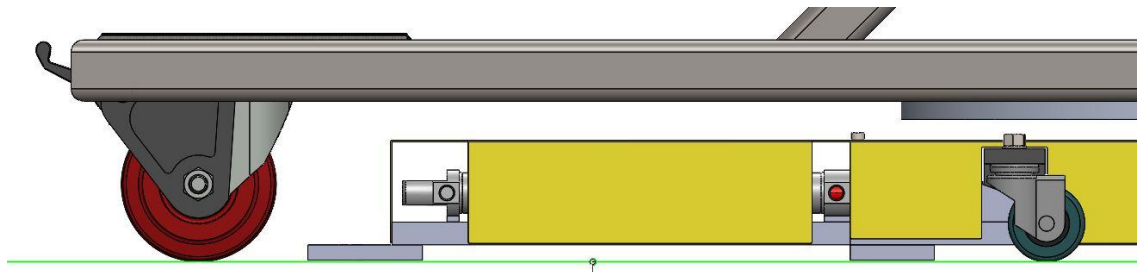


Figura 59 - Alinhamento entre o sistema de rotação e estrutura de paletização.

Assim, para uma melhor percepção do funcionamento deste sistema divide-se o mesmo em três fases de rotação: na primeira, a estrutura está posicionada no lado 1 (Figura 60); na segunda, a estrutura está a rodar (Figura 61); e na terceira, a estrutura está posicionada no lado 2 (Figura 62).

Na primeira fase de rotação, o cilindro 1 está avançado e o cilindro 2 está recuado, o que permite ao lado 1 da estrutura estar virado para o colaborador (Figura 60).

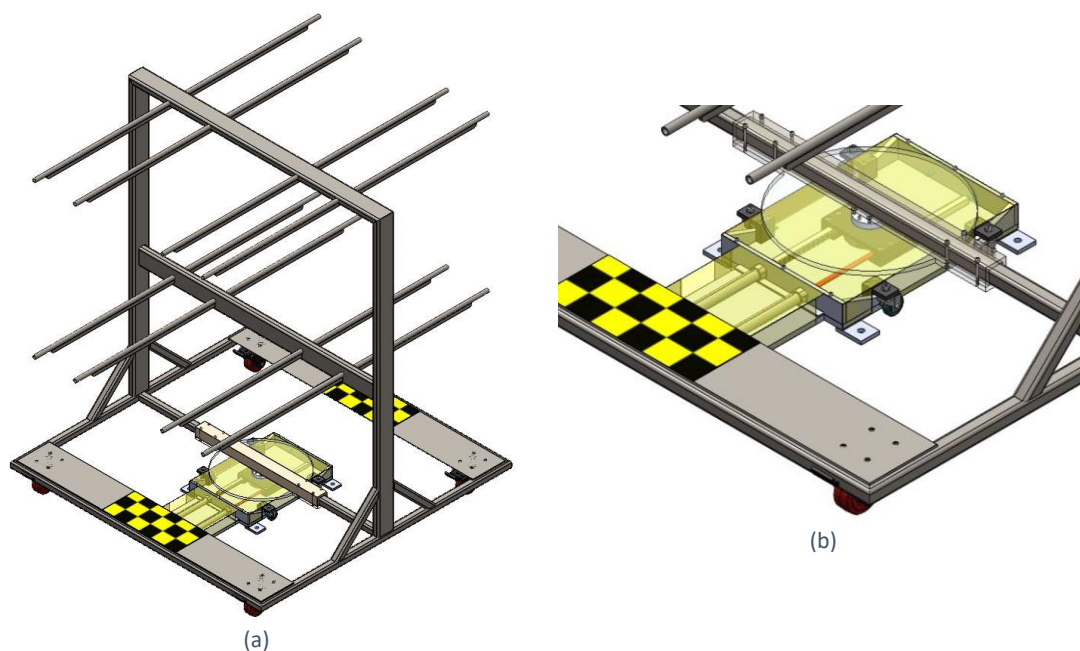


Figura 60 - Primeira fase de rotação: (a) vista isométrica; (b) detalhe para visualizar posição dos cilindros.

Quando é acionada a ordem para rodar a estrutura, o cilindro 1 recua e o cilindro 2 avança, permitindo trocar os lados da estrutura (Figura 61).

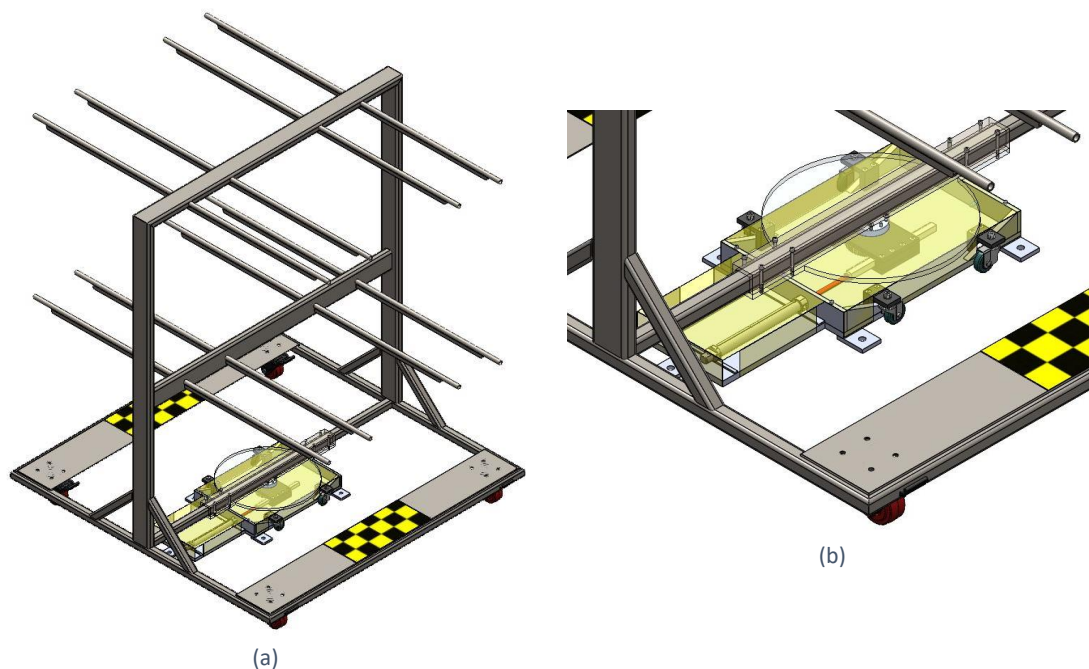


Figura 61 - Segunda fase de rotação: (a) vista isométrica; (b) detalhe para visualizar posição dos cilindros.

Por fim, após concluir a rotação em 180°, o lado 2 virado para o colaborador, sendo a posição final de rotação (Figura 62).

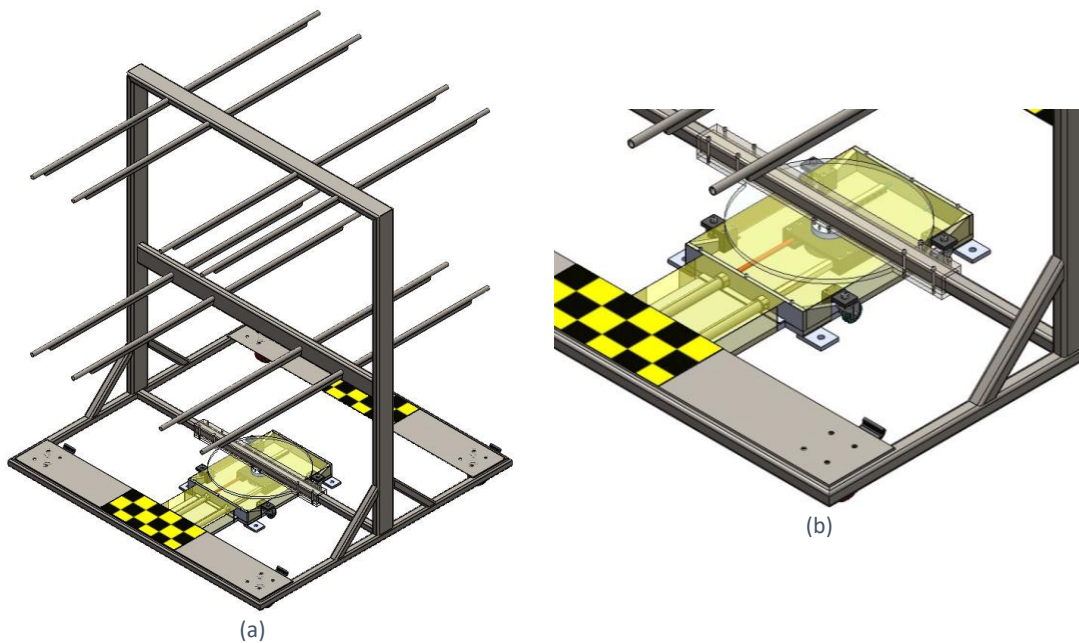


Figura 62 - Terceira fase de rotação: (a) vista isométrica; (b) detalhe para visualizar posição dos cilindros.

Nas secções seguintes são efetuados os dimensionamentos do cilindro pneumático, rodas dentadas e rolamentos.

3.7.2.1 Dimensionamento das rodas dentadas

Nesta secção pretende-se demonstrar todos os cálculos efetuados para o dimensionamento do pinhão e da cremalheira, assim como evidenciar todos os parâmetros necessários para o fabrico dos mesmos. O engrenamento é feito em eixos paralelos com um dentado reto.

Assim, relativamente ao pinhão, para que seja possível calcular todos os parâmetros fundamentais é obrigatório partir de certos parâmetros pretendidos, tais como: módulo normal, ângulo de pressão e número de dentes, tal como mostra na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros pretendidos para o pinhão.

Designação	Símbolo	Valor
Módulo normal [mm]	m_n	1,5
Ângulo de pressão [°]	α_n	20
Número de dentes [-]	Z	72

A escolha destes parâmetros foi feita com base nas engrenagens existentes no mercado e, então opta-se por um módulo de serie baixa, com um ângulo de pressão mais comum. O número de dentes é elevado pois não há necessidade de altas velocidade de rotação, sendo essa velocidade de 6 rpm (valor calculado na secção 3.7.2.2). Assim, um maior número de dentes permite rotações mais lentas.

Assim, a partir de Vilaça (2010), é possível calcular todos os parâmetros restantes para o fabrico do pinhão, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros fundamentais para o pinhão.

Designação	Símbolo	Fórmula	Valor
Módulo normal [mm]	m_n	-	1,5
Passo [mm]	p_p	$\pi \times m_n$	4,71
Largura do pinhão [mm]	B_p	-	17
Ângulo de pressão [°]	α_n	-	20
Número de dentes [-]	Z_p	-	72
Diâmetro primitivo [mm]	d	$m_n \times Z_p$	108
Diâmetro de base [mm]	d_b	$d \cos(\alpha_n)$	101,49
Addendum [mm]	h_a	$1 m_n$	1,5
Dedendum [mm]	h_f	$1,25 m_n$	1,88
Altura total [mm]	h	$h_a + h_f$	3,38
Diâmetro exterior [mm]	d_a	$d + 2m_n$	111
Diâmetro interior [mm]	d_f	$d - 2m_n$	105

A largura do pinhão terá de ser maior que o diâmetro da haste do cilindro pneumático para que seja possível a ligação entre o cilindro e a cremalheira, sendo considerada uma largura de 17 mm. Este valor de largura é comum para engrenagens com as mesmas características existentes no mercado. O diâmetro do cilindro pneumático é calculado na secção 3.7.2.2.

Relativamente ao dimensionamento da cremalheira, para que seja possível o engrenamento com uma cremalheira, tem obrigatoriamente de apresentar o módulo

normal igual. Como foi visto na secção 3.7.2, a cremalheira tem uma forma quadrada sendo que não será necessário calcular o diâmetro primitivo nem parâmetros relacionados com o mesmo.

De forma a garantir que toda a área de contato é utilizada, opta-se pela igual largura da cremalheira e do pinhão. Esta largura, como dito anteriormente, deve ser superior ao diâmetro da haste do cilindro para que possa ser feita a ligação. O curso da cremalheira foi considerado 250 mm.

Assim, resta calcular o número de dentes da cremalheira que se obtém relacionando o seu curso e com o passo do dentado, sendo:

$$Z_c = \frac{\text{curso}_{\text{cremalheira}}}{\text{passo}} = \frac{250}{4,71} = 53,05 \text{ dentes.}$$

Portanto, o número de dentes mínimo deve ser de 54 dentes, mas, para garantir que o engrenamento do pinhão com a cremalheira é feito, adicionam-se dois dentes, um em cada topo da cremalheira, perfazendo um total de 56 dentes. Na Tabela 9 estão presentes os parâmetros fundamentais para o fabrico da cremalheira.

Tabela 9 - Parâmetros fundamentais da cremalheira.

Designação	Símbolo	Fórmula	Valor
Módulo normal [mm]	m_n	-	1,5
Passo [mm]	p_e	$\pi \times m_n$	4,71
Largura da cremalheira [mm]	b_e	-	17
Ângulo de pressão [°]	α_n	-	20
Número de dentes [-]	Z_e	-	56
Addendum [mm]	h_a	$1 m_n$	1,5
Dedendum [mm]	h_f	$1,25 m_n$	1,88
Altura total [mm]	h	$h_a + h_f$	3,38

Com a definição destes parâmetros, tem-se todos os parâmetros para o fabrico do pinhão e cremalheira.

3.7.2.1.1 Razão de condução

Na consideração do tipo de engrenagens de dentado reto, a razão de condução é composta por apenas uma componente, sendo essa a razão de condução radial (no plano de rotação, perpendicular aos eixos), ε_α . A razão de condução total (ε_γ) é, portanto, igual à razão de condução radial. Assim sendo, segundo Vilaça (2010) a equação que permite o cálculo da razão de condução radial é:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{\left(\frac{d_a}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_b}{2}\right)^2} + \frac{h_a - x \cdot m}{\sin \alpha} - \frac{d}{2} \sin \alpha}{\pi \cdot m \cdot \cos \alpha}; \quad (2)$$

Em que x representa a correção de dentado. Como o pinhão apresenta um número elevado de dentes, não existe possibilidade de interferência entre os perfis durante o engrenamento ou na própria geração do dentado. Assim, não é necessário efetuar correção de dentado.

Com os dados da Tabela 8, substitui-se na equação 2 e obtém-se o valor de:

$$\varepsilon_\alpha = 2,346;$$

Portanto, a razão de condução final é de:

$$\varepsilon_\gamma = \varepsilon_\alpha = 2,346;$$

O que significa que existem, pelo menos, 2 pares de dentes em contato.

3.7.2.1.2 Resistência à flexão

Para verificação da resistência dos dentes de uma roda dentada à flexão é necessário que a força tangencial aplicada (F_t) no círculo primitivo de funcionamento seja inferior à força tangencial limite ($F_{t \text{ lim}}$), isto é:

$$F_t \leq F_{t \text{ lim}}; \quad (3)$$

com:

$$F_{t \text{ lim}} = \sigma_{F \text{ lim}} \frac{m_n \times b}{Y_F \times Y_\varepsilon \times Y_\beta} \left(\frac{K_L}{K_V \times K_O} \right) \frac{1}{S_F} \text{ (kgf)}. \quad (4)$$

Sendo: $\sigma_{F \text{ lim}}$ – tensão limite de flexão; m_n – módulo normal; b – largura; Y_F – fator de forma; Y_ε – fator de distribuição de carga; Y_β – fator de ângulo de hélice; K_L – fator de vida; K_V – fator de carga dinâmica; K_O – fator de sobrecarga; S_F – fator de segurança.

Previamente ao cálculo da força tangencial limite é necessário escolher o material para o pinhão. O aço mais comum para rodas dentadas é um aço de cementação ligado, sendo esse o material utilizado. Assim, de acordo com o Anexo B, o aço de cementação com a tensão limite de flexão mínima é o aço S15C da Norma JIS, equivalente ao aço 1,1141 da Norma DIN. Este aço apresenta uma tensão limite de flexão de 18,2 kgf/mm².

As propriedades do módulo normal e largura do pinhão encontram-se na Tabela 8 e os restantes fatores são calculados segundo Vilaça (2010). De seguida são calculados todos os fatores, justificando cada um deles.

- Fator de forma (Y_F):

Este fator é obtido pela Figura 63, que relaciona o número de dentes equivalente (Z_v) e a correção de dentado (x), igual a 0 porque não há correção. Como o pinhão é de dentado reto, então o número de dentes equivalente é igual ao número de dentes do pinhão, ou seja 70.

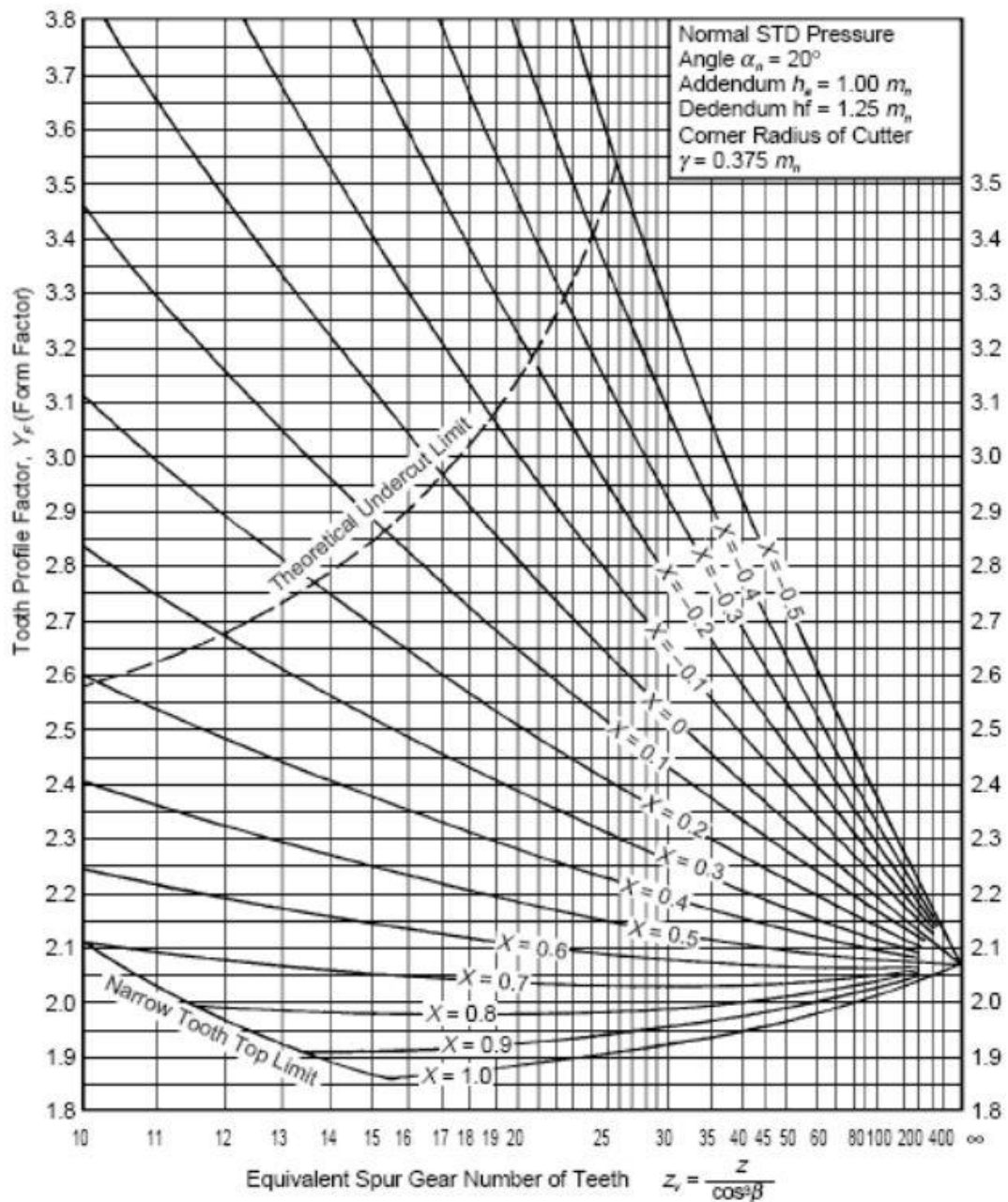


Figura 63 - Ábaco para determinação do fator de forma (Vilaça, 2010).

Logo, a partir do ábaco, retira-se que o fator de forma a considerar é de 2,26.

- Fator distribuição de carga (Y_ε):

Este fator é obtido pelo inverso da razão de condução radial:

$$Y_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_\alpha} = \frac{1}{2,346} = 0,426.$$

- Fator do ângulo de hélice (Y_β):

Como se trata de dentado reto, o ângulo de hélice é nulo, pelo que este fator é dado por:

$$Y_\beta = 1 - \frac{\beta}{120} = 1 - \frac{0}{120} = 1.$$

- Fator de vida (K_L):

O fator de vida é dado pela Figura 64, em que este varia com o número de ciclos realizados pelos dentes durante a sua vida útil de funcionamento e, com o tipo de material que os dentes são fabricados.

Number of Cyclic Repetitions	Hardness ⁽¹⁾ HB 120 ... 220	Hardness ⁽²⁾ Over HB 220	Gears with Carburizing Gears with Nitriding
Under 10000	1.4	1.5	1.5
Approx. 10 ⁶	1.2	1.4	1.5
Approx. 10 ⁶	1.1	1.1	1.1
Above 10 ⁷	1.0	1.0	1.0

Figura 64 - Fator de vida (Vilaça, 2010).

O número de ciclos do pinhão é considerado infinito visto que o pinhão roda quando se pretende rodar a estrutura metálica. Assim, considerando um número de rotações acima de 10⁷ para aços de cementação, ou seja, *Gears with Carburizing*, o valor do fator é de 1,0.

- Fator de carga dinâmica (K_V):

Este fator é obtido pela Figura 65 e varia em função da qualidade da roda dentada e da velocidade linear no círculo primitivo.

A velocidade pretendida para o pinhão é demasiado pequena, pois a estrutura tem de rodar lentamente para que os painéis de porta não caiam da estrutura, pelo que a velocidade tangencial não ultrapassa os 1 m/s.

Precision Grade of Gears from JIS B 1702		Tangential Speed at Pitch Line (m/s)						
Tooth Profile		Under 1	1 to less than 3	3 to less than 5	5 to less than 8	8 to less than 12	12 to less than 18	18 to less than 25
Unmodified	Modified							
	1	—	—	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3
1	2	—	1.0	1.05	1.1	1.2	1.3	1.5
2	3	1.0	1.1	1.15	1.2	1.3	1.5	
3	4	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5		
4	—	1.0	1.3	1.4	1.5			
5	—	1.1	1.4	1.5				
6	—	1.2	1.5					

Figura 65 - Fator de carga dinâmica (Vilaça, 2010).

Logo, considerando uma qualidade de 3 e uma velocidade tangencial menor que 1 m/s, o fator a ponderar é de 1,0.

- Fator de sobrecarga (K_o):

Este fator é considerado como sendo o coeficiente entre a força tangencial atuante e a força tangencial nominal. Este fator é obtido através da Figura 66.

Impact from Prime Mover	Impact from Load Side of Machine		
	Uniform Load	Medium Impact Load	Heavy Impact Load
Uniform Load (Motor, Turbine, Hydraulic Motor)	1.0	1.25	1.75
Light Impact Load (Multicylinder Engine)	1.25	1.5	2.0
Medium Impact Load (Single Cylinder Engine)	1.5	1.75	2.25

Figura 66 - Fator de sobrecarga (Vilaça, 2010).

A força atuante é a força exercida pelo cilindro pneumático, e consiste numa força uniforme. Assim, considerando uma força tangencial atuante de impacto uniforme e uma força tangencial nominal de impacto uniforme, o fator de sobrecarga é de 1,0.

- Fator de segurança (S_f):

O fator de segurança normalmente usado é de pelo menos 1,2. Portanto, aplicando a equação 4, a força tangencial limite é de:

$$F_{t \text{ lim}} = 18,2 \frac{1,5 \times 17}{2,26 \times 0,426 \times 1} \left(\frac{1,0}{1 \times 1} \right) \frac{1}{1,2} = 324,16 \text{ kgf} = 3179,97 \text{ N}$$

Por fim, deve-se confirmar a condição presente na equação 3:

$$F_t \leq F_{t \text{ lim}} \Leftrightarrow 240,38 \text{ N} \leq 3179,97 \text{ N}$$

Assim, verifica-se que a engrenagem suporta a força tangencial aplicada. A força tangencial é calculada na secção 3.7.2.2.

3.7.2.1.3 Resistência à pressão superficial

Como referido anteriormente para a resistência à flexão, também para a resistência à pressão superficial a força tangencial não deve ultrapassar um determinado limite. Neste caso, a força tangencial não pode impor tensões de Hertz superiores à permitida pelo material, dada por $\sigma_{H \text{ lim}}$.

Assim, para a resistência à pressão superficial, também se aplica a equação 2, só que a força tangencial limite é dada por:

$$F_{t \text{ lim}} = \frac{\sigma_{H \text{ lim}}^2 \times d \times b}{K_{H\beta} \times K_V \times K_O \times S_H^2} \left(\frac{K_{HL} \times Z_L \times Z_R \times Z_V \times Z_W}{Z_H \times Z_M \times Z_\epsilon \times Z_\beta} \right)^2 \frac{u}{u \pm 1} \text{ (kgf)}. \quad (5)$$

Sendo: d – diâmetro primitivo; $K_{H\beta}$ – fator distribuição de carga na face do dente; Z_H – fator de zona; Z_M – fator material; Z_ϵ – fator da razão de condução; Z_β – fator do ângulo de hélice; K_{HL} – fator de vida; Z_L – fator do lubrificante; Z_R – fator da rugosidade superficial; Z_V – fator da velocidade escorregamento; Z_W – fator da razão de dureza; S_H – fator de segurança.

A tensão limite de Hertz depende do material utilizado, sendo que para o aço de cementação utilizado para o dimensionamento da resistência à flexão, o seu valor é de 115 kgf/mm², segundo o Anexo C. Como o engrenamento é feito por sistema pinhão cremalheira, segundo Vilaça (2010) a expressão $u/(u \pm 1)$ é considerada igual a 1. As propriedades do diâmetro primitivo do pinhão e largura do pinhão encontram-se na Tabela 8, enquanto que os restantes fatores são calculados segundo Vilaça (2010). De seguida são calculados todos os fatores, justificando cada um deles.

- Fator de zona (Z_H):

Este fator é definido pela equação:

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{2 \cos \beta_b}{\tan \alpha}},$$

Com:

$$\beta_b = \tan^{-1}(\tan \beta \cdot \cos \alpha_t).$$

Assim sendo, como o ângulo de hélice é nulo, tem-se que $\beta_b = 0$. Então, substituindo:

$$Z_H = \frac{1}{\cos 20} \sqrt{\frac{2 \cos 0}{\tan 20}} = 2,49$$

- Fator material (Z_M):

Este fator depende das características elásticas dos materiais de cada roda dentada na engrenagem, obtido pela Figura 67.

Gear				Meshing Gear				Material Factor Z_M (kgf/mm ²) ^{0.5}
Material	Symbol	Young's Modulus kgf/mm ²	Poisson's Ratio	Material	Symbol	Young's Modulus kgf/mm ²	Poisson's Ratio	
Structural Steel	*	21000	0.3	Structural Steel	*	21000	0.3	60.6
				Cast Steel	SC	20500		60.2
				Ductile Cast Iron	FCD	17600		57.9
				Gray Cast Iron	FC	12000		51.7
Cast Steel	SC	20500	0.3	Cast Steel	SC	20500	0.3	59.9
				Ductile Cast Iron	FCD	17600		57.6
Ductile Cast Iron	FCD	17600	0.3	Gray Cast Iron	FC	12000	0.3	51.5
				Ductile Cast Iron	FCD	17600		55.5
Gray Cast Iron	FC	12000	0.3	Gray Cast Iron	FC	12000	0.3	50.0
				Gray Cast Iron	FC	12000		45.8

Figura 67 - Fator material (Vilaça, 2010).

Uma vez que o material *Structural Steel* é considerado ambas as engrenagens, pela Figura 67, o fator a ser considerado é de 60,6.

- Fator da razão de condução (Z_ϵ):

O fator relativo à razão de condução é de 1,0 para engrenagens paralelas de dentado reto.

- Fator do ângulo de hélice (Z_β):

Como o dentado é reto, considera-se este fator igual a 1,0 de forma a não interferir no cálculo da força tangencial limite.

- Fator de vida (K_{HL}):

O fator de vida reflete o número de ciclos de tensão, sendo dado pela Figura 68, e, tal como considerado para o fator de vida na resistência à flexão, o número de ciclos é superior a 10^7 .

Ciclos de carga	Factor de vida
menos do que 10^3	1,5
aprox. 10^3	1,3
aprox. 10^6	1,15
acima de 10^7	1,0

Figura 68 - Fator de vida (Vilaça, 2010).

Então, o valor considera-se igual a 1,0.

– Fator do lubrificante (Z_L):

Este fator é definido a partir da viscosidade cinemática do lubrificante aplicado à temperatura de 50°C. Como o mecanismo é aberto, considera-se engrenamento a seco e não existe lubrificação. Assim, considera-se este fator de 0,9, pois é a tendência para uma viscosidade cinemática nula de uma *Surface Hardened Gear*, como se pode ver na Figura 69.

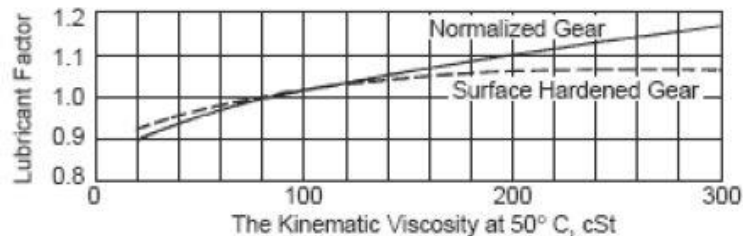


Figura 69 - Fator do lubrificante (Vilaça, 2010).

– Fator da rugosidade superficial (Z_R):

Este fator é obtido em função de uma rugosidade média das superfícies dos dentes da engrenagem. Como este fator depende da distância entre eixo, então não é possível aplicar a equação para o seu cálculo. Sendo assim, admitindo uma rugosidade média de 6, pela Figura 70, o valor do fator é de $\approx 0,95$.

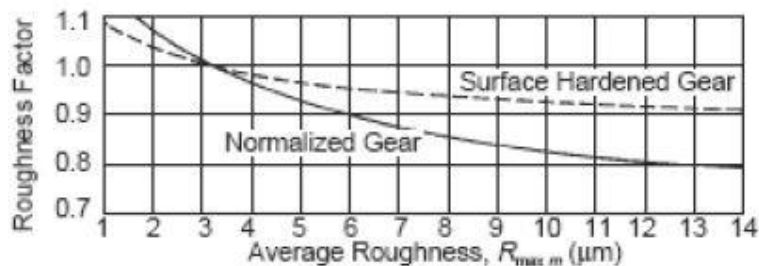


Figura 70 - Fator da rugosidade superficial (Vilaça, 2010)

– Fator da velocidade de escorregamento (Z_V):

Este parâmetro é obtido pela Figura 71, a partir da velocidade no primitivo. A velocidade pretendida para o pinhão é demasiado pequena, pois a estrutura tem de rodar lentamente para que os painéis de porta não caiam da estrutura, sendo que a velocidade tangencial não ultrapassa os 0,5 m/s.

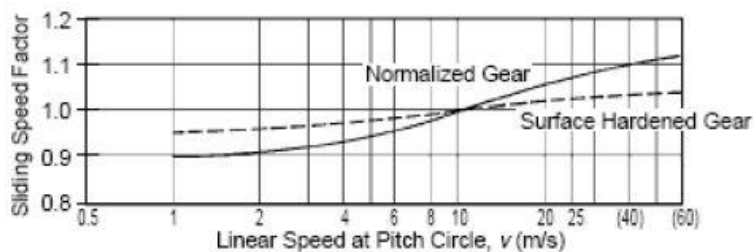


Figura 71 - Fator da velocidade de escorregamento (Vilaça, 2010).

Sendo assim, a tendência da curva para uma velocidade de escorregamento de 0,5 para *Surface Hardened Gear* é de 0,9.

- Fator da razão de dureza (Z_W):

Este fator só é aplicável a rodas dentadas que estejam engrenadas com um pinhão que foi recozido em massa. Assim sendo, este fator não é considerado, logo é igual a 1.

- Fator da distribuição de carga na face do dente ($K_{H\theta}$):

Para obtenção deste fator são consideradas duas situações, que se encontram dependentes da distribuição de carga na largura do dentado. Segundo Vilaça (2010), esta fator depende de uma distribuição de carga uniforme, carga incorreta ou carga desconhecida. Como a distribuição de carga é uniforme pela largura do dentado, o fator a considerar é de 1,1.

- Fator de carga dinâmica (K_V):

Como já referido para a análise de resistência à flexão, o fator de carga dinâmica é o mesmo, sendo igual a 1.

- Fator de sobrecarga (K_O):

Como já referido para a análise de resistência à flexão, o fator de sobrecarga é o mesmo, sendo igual a 1.

- Fator de segurança (S_H):

O fator de segurança de “*pitting*” faz intervir muitos fatores ambientais e é de difícil obtenção com rigor. Normalmente o valor usado é de pelo menos 1,15.

Portanto, aplicando a equação 5, a força tangencial limite é de:

$$F_{t \text{ lim}} = \frac{115^2 \times 105 \times 17}{1,1 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,15^2} \left(\frac{1,0 \times 0,9 \times 0,95 \times 0,9 \times 1,0}{2,49 \times 60,6 \times 1,0 \times 1,0} \right)^2 = 420,46 \text{ kgf} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F_{t \text{ lim}} = 4124,72 \text{ N};$$

Por fim, deve-se confirmar a condição presente na equação 3:

$$F_t \leq F_{t \text{ lim}} \Leftrightarrow 240,38 \text{ N} \leq 4124,72 \text{ N}.$$

Assim, verifica-se que a engrenagem suporta a força tangencial aplicada. A força tangencial é calculada na secção 3.7.2.2.

3.7.2.1.4 Discussão dos resultados

Como se pode verificar, o dentado está sobredimensionado. Uma forma de diminuir este valor é através da diminuição da largura de dentado. Visto que a haste do cilindro tem 8 mm de diâmetro, como se poderá ver na secção 3.7.2.2, é necessário uma largura mínima de dentado, de pelo menos, 10 mm.

Não se opta por diminuir a largura do dentado por várias razões. A primeira deve-se à garantia da estabilidade da engrenagem pois, com uma espessura reduzida esta ganha instabilidade durante o engrenamento. A largura é igual tanto para o pinhão como a cremalheira, de forma que toda a área de contato seja utilizada. Assim é necessário garantir uma distância considerável entre as faces laterais da cremalheira e o furo roscado para aperto da haste do cilindro para evitar grandes tensões instaladas. Por fim, de forma a evitar o fabrico das engrenagens, evitando custos elevados, optou-se pela escolha de engrenagens existentes no mercado.

Assim, segundo Norelem (2021), optou-se pelo pinhão com a referência 22400-0215170072 e a cremalheira com a referência 22420-015170X500.

De salientar que a cremalheira tem um comprimento normalizado menor, com uma dimensão de 500 mm, sendo necessário diminuir esse comprimento para 250 mm através do processo de corte.

3.7.2.2 Dimensionamento do cilindro pneumático

O dimensionamento de um cilindro pneumático consiste no cálculo do diâmetro mínimo do veio do cilindro. Para saber o diâmetro mínimo é imprescindível conhecer as forças que vão atuar no cilindro. Neste caso, a força que atua no cilindro é dada pelo momento produzido pelas forças externas a atuar no corpo.

Como se trata de rotação em torno de um eixo fixo, a força/momento transmitida (\vec{M}) por essa rotação é dada em função da aceleração angular (α) e do momento de inércia da estrutura de paletização (I_G), de acordo com a seguinte expressão:

$$\vec{M} = I_G \times \alpha. \quad (6)$$

Como dito anteriormente, a rotação da estrutura é dada em torno de um eixo fixo, mais propriamente no eixo do veio fixado no pinhão. Assim, existe uma componente deslocamento, velocidade e aceleração que são necessárias conhecer, sendo todas consideradas angulares devido à rotação e dependentes do tempo.

Assim, o deslocamento angular (θ) é dado pela rotação que se pretende para a estrutura, em radianos. Como a estrutura apenas necessita de rodar 180° , então:

$$\theta = \pi \text{ rad.}$$

O tempo (t) é dado pelo tempo pretendido, em segundos, para a estrutura rodar os 180° , sendo optado por uma duração de 5 segundos.

Portanto, a velocidade angular é definida pela derivada do vetor deslocamento angular em ordem ao tempo, representada pela variável ω , expressa em rad/s, sendo de:

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{\pi}{5} \text{ rad/s.}$$

A velocidade linear (v) é dada por:

$$v = \omega r = \frac{\pi}{5} \times 0,0525 = 0,033 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 6 \text{ rpm.}$$

A aceleração angular é definida como a derivada em ordem ao tempo do vetor velocidade angular, representada pela variável α , expressa em rad/s^2 , sendo de:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{\frac{\pi}{5}}{5} = \frac{\pi}{10} \text{ rad/s}^2.$$

Por fim, resta conhecer o momento de inércia da estrutura metálica para paletização da totalidade dos painéis de porta. Através do *software* SolidWorks pode-se retirar o momento da estrutura segundo a origem ou qualquer ponto. A estrutura foi modelada com a origem na posição do centro de rotação da estrutura para facilitar o conhecimento do momento de inércia. Na Figura 72 estão presentes os momentos de inércia em torno dos três eixos, retirados através da ferramenta *Mass Properties*.

Moments of inertia: (kilograms * square meters)		
Taken at the output coordinate system.		
lxx = 179.09	lxy = -0.47	lxz = 0.00
lyx = -0.47	lyy = 75.93	lyz = 0.00
lzx = 0.00	lzy = 0.00	lzz = 200.85

Figura 72 - Momentos de inércia da estrutura.

Aplicando a equação (6), utilizando o valor máximo do momento inércia, que neste caso é $I_{zz} = 200,85 \text{ kg.m}^2$, a expressão é dada por:

$$M = 200,85 \times \frac{\pi}{10} = 25,24 \text{ N.m.}$$

Segundo a Figura 73, o momento atuante é dado pela multiplicação de uma força por um braço. Neste caso, o braço a considerar é o raio do pinhão.

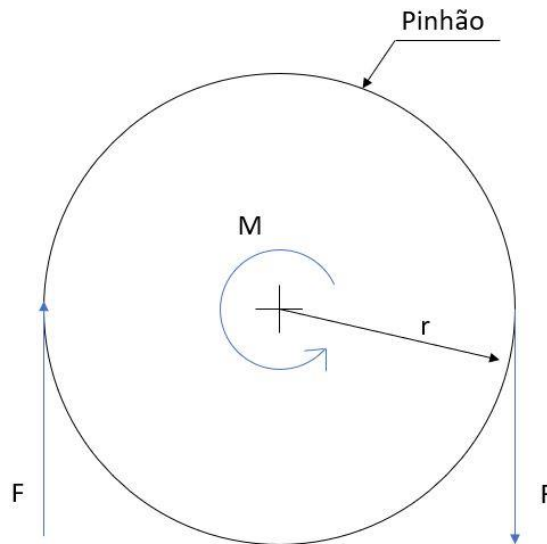


Figura 73 - Esquema do cálculo da força atuante no cilindro.

Como visto na secção 3.7.2.1, o pinhão tem um diâmetro primitivo de 108 mm, que corresponde a um raio de 54 mm. Assim, a força de geração do momento é de:

$$F = \frac{M}{r} = \frac{25,24}{0,054} = 467,40 \text{ N}$$

Como o acionamento é feito por dois cilindros pneumáticos equidistantes do centro do pinhão, então a força máxima atuante é metade da força de geração do momento, ou seja, $F_{atuante}^{máx} = 233,70 \text{ N}$.

Esta força máxima atuante é, portanto, a força mínima que o cilindro precisa de vencer para garantir o engrenamento por parte da cremalheira e o pinhão, de forma a rodar a estrutura metálica.

Antes do dimensionamento do diâmetro mínimo do cilindro, deve-se compreender como este dimensionamento deve ser feito. A Figura 74 representa o funcionamento do cilindro pneumático no que toca ao cálculo da área útil no avanço e recuo.

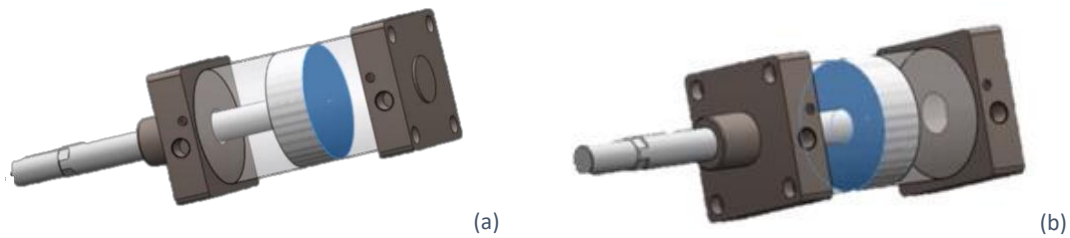


Figura 74 - Funcionamento cilindro pneumático: (a) área útil no avanço; (b) área útil no recuo (Master Tecnologia Industrial, 2021).

Como se pode ver na Figura 74, a área útil é maior no avanço do que no recuo, o que significa que o cilindro exerce uma força maior no avanço, visto que a área útil no recuo é dada pela área do cilindro subtraída a da área da haste. Assim, é imprescindível verificar se o cilindro no recuo consegue vencer a força máxima atuante. Mas, primeiramente, calcula-se o diâmetro mínimo para o avanço do cilindro.

Então, para o avanço, a seguinte equação permite calcular o diâmetro mínimo do cilindro para vencer essa força:

$$F_{atuante}^{m\acute{a}x} \leq p \times A_{\acute{u}til}^{avan\c{c}o},$$

sendo:

$$A_{\acute{u}til}^{avan\c{c}o} = \frac{\pi d_{min}^2}{4}$$

Logo, sendo utilizada uma pressão de 6 bar, pressão de ar comprimido utilizada na empresa, então:

$$d_{min} \geq \sqrt{\frac{F_{atuante}^{m\acute{a}x} \times 4}{\pi \times 6 \times 10^5}} \geq 0,02227 \text{ m} \geq 22,27 \text{ mm}.$$

Portanto, tendo em conta o catálogo na empresa MetalWork, para um cilindro de dupla ação, opta-se pelo cilindro com diâmetro de 25 mm. Escolhe-se um cilindro existente no mercado com um diâmetro superior ao diâmetro mínimo calculado, de modo a garantir que este exerce uma força maior que a força máxima atuante.

Para o recuo do cilindro, primeiramente deve-se retirar o diâmetro da haste para o cilindro escolhido, sendo esse diâmetro, segundo MetalWork (2021), de 8 mm.

Então, a área útil para o recuo é dada por:

$$A_{\acute{u}til}^{recuo} = \frac{\pi}{4} (d_{cilindro}^2 - d_{haste}^2) = \frac{\pi}{4} (25^2 - 8^2) = 440,61 \text{ mm}^2.$$

Logo, a força que o cilindro exerce no recuo é de:

$$F_{cilindro}^{recuo} = p \times A_{\acute{u}til}^{recuo} = 6 \times 10^5 \times 440,61 \times 10^{-6} = 264,36 \text{ N}.$$

Para se verificar se o cilindro consegue recuar, deve satisfazer a seguinte condição:

$$F_{cilindro}^{recuo} \geq F_{atuante}^{m\acute{a}x}$$

Logo, como:

$$264,36 \geq 233,70.$$

O cilindro consegue vencer a força máxima atuante no recuo. Portanto, o cilindro de 25 mm é capaz de mover a cremalheira, rodando a estrutura metálica.

Por fim, tendo em conta as dimensões da base do sistema de rotação e uma cremalheira com 250 mm de comprimento, será necessário um comprimento da haste do cilindro de 200 mm.

Em suma, utiliza-se um cilindro pneumático de dupla ação que apresente um diâmetro de 25 mm, com uma haste de 200 mm de comprimento e diâmetro de 8 mm, com referência: 1100250250CP.

3.7.2.3 Dimensionamento dos rolamentos

Na escolha dos rolamentos foi tido como referência o catálogo da SKF. Para o sistema de rotação, como explicado anteriormente, os rolamentos são utilizados para o veio que estabelece a ligação entre o pinhão e a patela de rotação, estando o veio disposto na vertical. Como a carga aplicada nos rolamentos é vertical, ou seja, na direção axial dos rolamentos, então os rolamentos têm de suportar uma carga axial muito superior à carga radial, sendo a radial mínima ou quase inexistente.

Assim, para este caso não se devem utilizar rolamentos para cargas puramente axiais, devido à possibilidade de existir uma carga radial que é causada pela força atuante nos cilindros. A maior carga aplicada nos rolamentos é a carga axial causada pela massa da estrutura metálica para paletização dos painéis de porta. Na Tabela 10 está presente a massa e respetiva carga máxima aplicada nos rolamentos.

Tabela 10 - Massa e carga máxima aplicada no veio do sistema de rotação.

	Massa [kg]	Carga [N]
Estrutura metálica	156,79	1538,11
Tubo em PTFE	2,09	20,51
72 painéis de porta	108,00	1059,48
Total	266,88	2618,10

O valor da massa da estrutura foi retirado a partir da ferramenta *Mass Properties* do software SolidWorks. Considerou-se uma massa de 1,5 kg para o painel de porta de maior massa, correspondente ao painel de porta dianteiro.

Assim, ambos os rolamentos devem absorver uma carga axial de 2618,10 N. Caso apenas trabalhe um cilindro, considera-se uma carga radial de 467,40 N, sendo a carga radial dada pela força atuada no cilindro pneumático. De acordo com a SKF, os rolamentos indicados para absorver cargas combinadas são rolamentos de uma e duas carreiras de esferas de contato angular ou rolamentos de rolos cónicos de uma carreira, embora rolamentos rígidos de esferas e rolamentos autocompensadores de rolos também sejam indicados.

A capacidade de carga axial de um rolamento é determinada pelo ângulo de contato. Quanto maior o ângulo de contato, maior a capacidade de carga axial do rolamento. Assim sendo, de acordo com a Figura 75, pode-se visualizar o ângulo de contato para os rolamentos recomendados pela SKF.

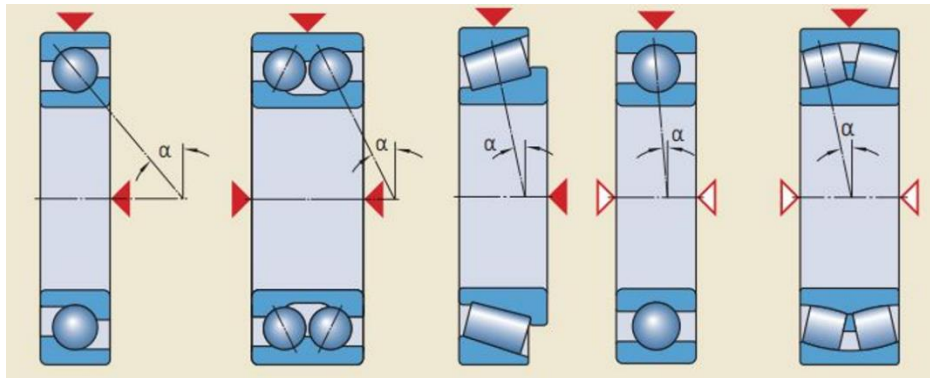


Figura 75 - Ângulo de contato para os rolamentos indicados pela SKF (SKF, 2017).

Visualizando a Figura 75 conclui-se que o ângulo de contato é maior para os rolamentos de uma carreira de esferas de contato angular, com um ângulo de 40°.

Tendo escolhido a categoria dos rolamentos a utilizar, passa-se para o dimensionamento da carga estática e dinâmica equivalente do rolamento. Primeiramente, efetua-se o cálculo da razão entre a carga axial e radial, dada por:

$$Razão = \frac{F_a}{F_r} = \frac{2618,10}{467,40} = 5,60.$$

Assim, de acordo com a SKF, como a razão é maior que o fator limitante (e) de 1,44, e os rolamentos são dispostos individualmente, então devem-se aplicar as seguintes equações:

$$\begin{cases} P = 0,35 F_r + 0,57 F_a \\ P_0 = 0,5 F_r + 0,26 F_a \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} P = 0,35 \times 467,40 + 0,57 \times 2618,10 \\ P_0 = 0,5 \times 467,40 + 0,26 \times 2618,10 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} P = 1655,91 \text{ N} \\ P_0 = 914,41 \text{ N}' \end{cases}$$

Sendo: P – carga dinâmica equivalente do rolamento; P_0 – carga estática equivalente do rolamento.

Por fim, resta calcular as classificações de carga para o rolamento. A classificação de carga dinâmica do rolamento (C) é igual à carga dinâmica equivalente do rolamento (P), visto que a razão entre a carga axial e radial é superior ao fator limitante (e), pelo que:

$$C \geq P \geq 1655,91 \text{ N.}$$

A classificação de carga estática do rolamento (C_0) é dada pela carga estática equivalente (P_0) multiplicada pelo fator de segurança estático (s_0). O fator de segurança estático é igual a 1, considerando um rolamento rotativo com desempenho normal para uma operação de trabalho normal. Logo:

$$C_0 \geq P_0 \times s_0 \geq 914,41 \times 1 \geq 914,41 \text{ N.}$$

Finalmente, após calculados todos os parâmetros de escolha do rolamento, e uma vez que o veio tem um diâmetro de 15 mm, então opta-se pelo rolamento da SKF 7202 BEP com uma classificação de carga dinâmica de 8,32 kN e uma classificação de carga estática de 4,4 kN.

3.7.3 Suporte para robô colaborativo

Como foi dito na secção 3.6.3, o suporte para o robô colaborativo deve permitir alojar os componentes pneumáticos e quadro elétrico. A solução final permite de forma simples e organizada fixar os componentes no suporte. A Figura 76 representa o projeto final do suporte para o robô.

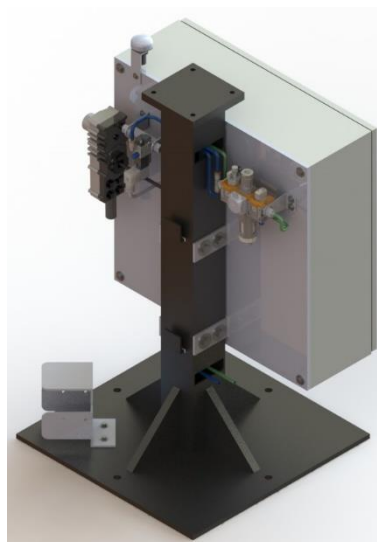


Figura 76 - Suporte do robô colaborativo com todos os acessórios.

O suporte é apertado ao solo através de quatro chumbadores. O suporte apresenta quatro nervuras para reforçar a estabilidade e rigidez do pé do suporte.

Como dito anteriormente, o sistema pneumático e quadro elétrico estão acoplados no suporte do robô, o que implica a existência de cabos elétricos e tubos de passagem de ar comprimido. A Figura 77 representa o suporte do robô final com a solução encontrada para proteger e isolar cabos e tubos.

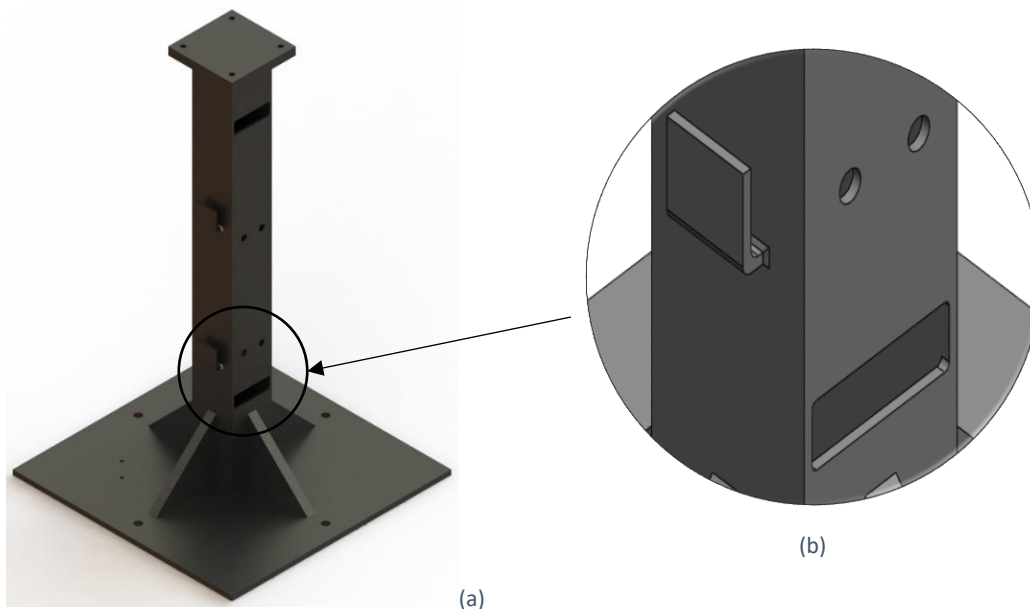


Figura 77 - Suporte final do robô: (a) suporte do robô com os furos necessários e aberturas para tubos e fios elétricos e (b) detalhe da soldadura do suporte do controlador do robô colaborativo.

Como é possível ver na Figura 77 existem várias aberturas no suporte, com o intuito de todos os cabos elétricos e tubos de ar comprimido estarem isolados e protegidos. A abertura de duas entradas na parte superior permite a ligação do sistema pneumático. Quanto menor for o comprimento de tubo maior será a passagem de caudal de ar sem a necessidade de aumentar a pressão de ar. As duas aberturas na parte inferior do suporte permitem a saída dos cabos elétricos e tubos de ar o mais perto possível do solo possibilitando uma maior proteção.

O robô colaborativo é constituído pelo próprio robô e o seu controlador. O robô está ligado ao controlador através de dois fios elétricos e o controlador ligado por um fio à corrente elétrica. Apesar de estes fios elétricos serem extensos, de forma a diminuir o espaço utilizado no posto de trabalho, foi desenvolvida uma solução para alojar o controlador no suporte do robô. A solução é visível na Figura 78 e consiste numa chapa maquinada e soldada no suporte do robô, de forma a suspender o controlador, de acordo com as dimensões das aberturas próprias para esse efeito.

A adição de uma chapa ao suporte do robô permite organizar melhor o espaço, optando-se por fixar os componentes pneumáticos de um lado e o quadro elétrico do outro.

Nesta chapa é soldado um suporte maquinado, que é aparafusado no suporte do robô 4, como se pode ver na Figura 78.

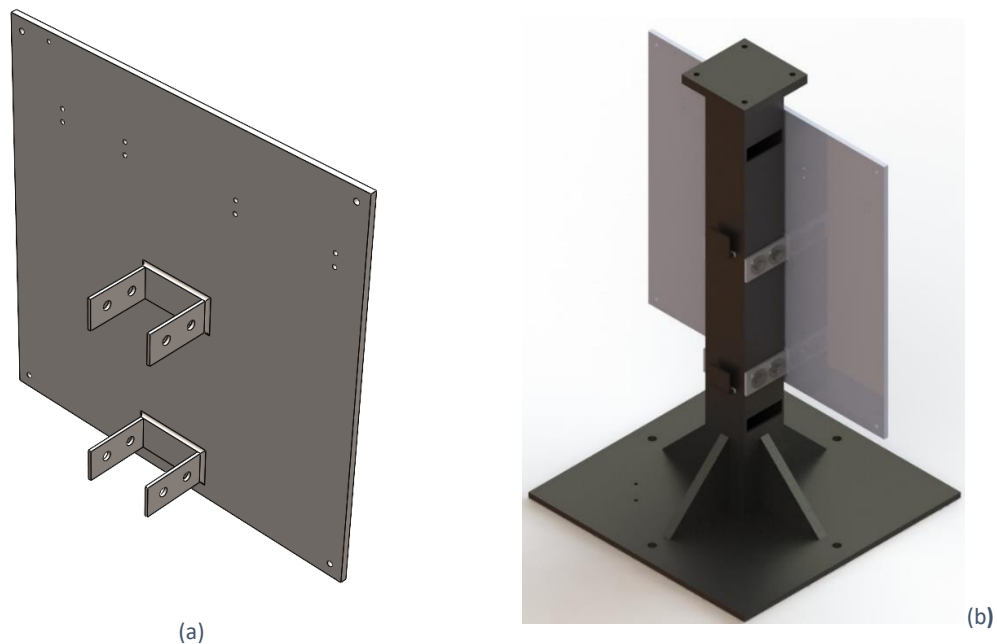


Figura 78 -Montagem da chapa: (a) chapa metálica e (b) chapa aparafusada no suporte do robô.

Comparativamente aos esboços anteriores, existem inúmeras mudanças. A grande mudança é a ausência de uma base de trabalho dos painéis de porta. A adição da base de trabalho aumenta o tempo de ciclo de produção dos painéis, o que não é desejado. A solução encontrada resume-se à entrega do painel, por parte do robô SEPRO, ao robô colaborativo. A Figura 79 representa a entrega dos painéis entre os robôs.

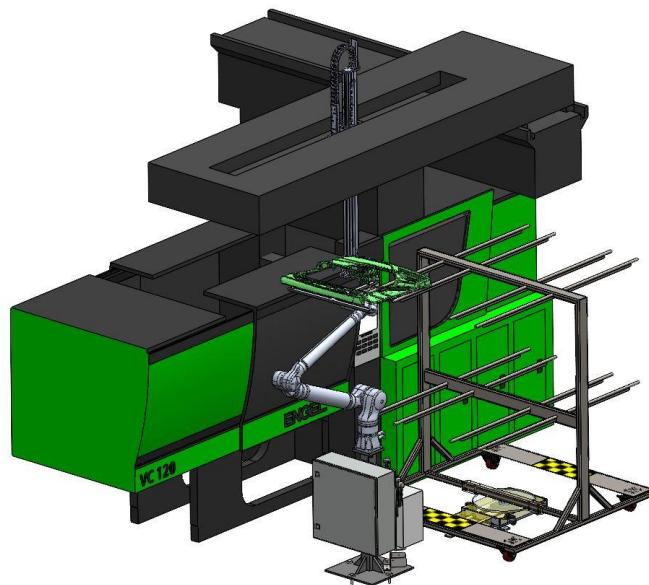


Figura 79 - Entrega do painel entre o robô SEPRO e robô colaborativo.

O funcionamento deste processo de entrega de painéis é simples. O robô SEPRO retira o painel da máquina de injeção, desloca-se para a posição de entrega e aguarda o sinal de presença do robô colaborativo. O sinal de presença significa que o robô colaborativo está em posição de receber o painel. Quando o sinal é reconhecido, o robô SEPRO pode deslocar-se para a posição de entrega do painel. Na posição de entrega, primeiro, o robô colaborativo ativa o vácuo e, de seguida, o robô SEPRO desliga entregando o painel. Posto isto, o robô SEPRO volta para a posição de retirar o painel da máquina de injeção e o robô colaborativo paletiza o painel na estrutura metálica. Com esta solução, existe um melhor fluxo no ciclo de trabalho e são evitadas quebras entre tarefas.

Esta melhoria do processo é implementada em pleno chão de fábrica, logo todos os componentes devem ser robustos e o mais protegidos possíveis. Assim, o sistema de segurança, por se encontrar a poucos milímetros do solo, deve ser protegido a eventuais danos causados por colaboradores ou empilhadores. Então, foi desenvolvida uma proteção, de acordo com as dimensões do sistema de segurança, que se encontra aparafusada à câmara. A Figura 80 mostra a proteção do sistema de segurança e a Figura 81 a proteção fixada no suporte do robô.

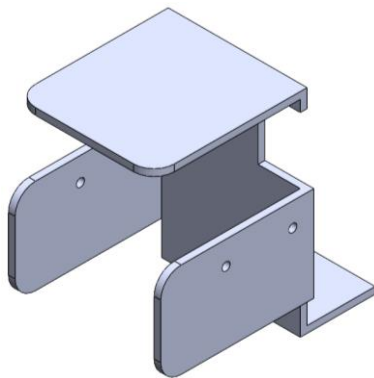


Figura 80 - Suporte para sistema de segurança.

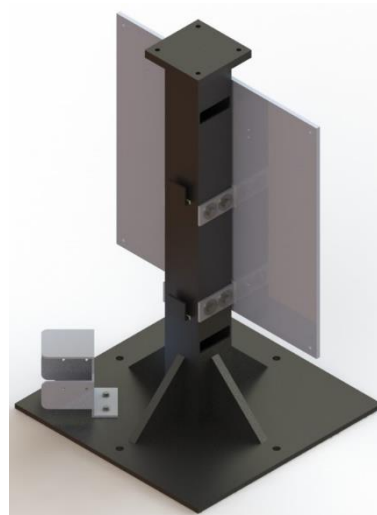


Figura 81 - Montagem da proteção no suporte do robô.

Esta proteção pretende proteger a parte lateral do sistema de segurança, sendo aparafusada ao suporte do robô.

Por fim, todos os equipamentos de produção dentro da empresa, como máquinas de injeção ou periféricos, têm um sinóptico. O sinóptico permite a fácil compreensão do funcionamento atual da máquina, que pode ser distinguido através de luzes e som emitido. Este sinóptico é controlado eletronicamente, sendo neste caso controlado pelo robô, dado que emite luz:

- Verde: funcionamento correto do processo de paletização;
- Amarelo: último painel a paletizar na estrutura antes da rotação da mesma;

- Vermelho: processo de paletização parado.

Sempre que as luzes, amarela e vermelha, acendem, o sinóptico emite constantemente um efeito sonoro.

O sinóptico precisa, como dito anteriormente, de ser facilmente visível e, para tal, o próprio sinóptico tem uma chapa própria para o efeito. A Figura 82 representa a chapa de aperto do sinóptico e a Figura 83 mostra a posição do sinóptico no suporte do robô colaborativo.

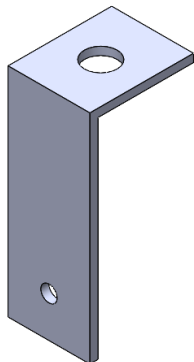


Figura 82 - Chapa para aperto do sinóptico.

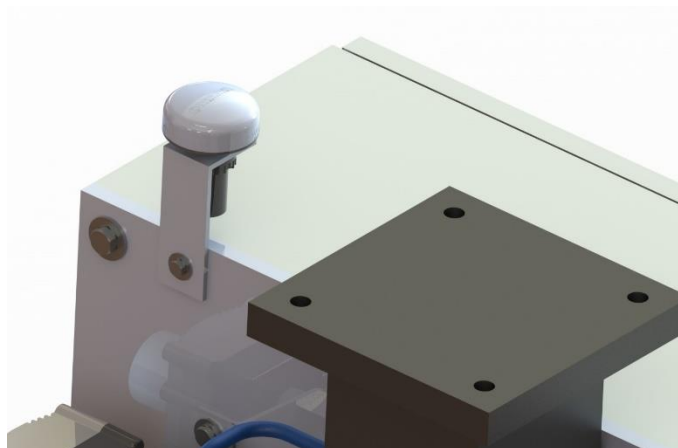


Figura 83 - Montagem do sinóptico no suporte do robô.

3.7.4 Mão-presa para robô colaborativo

O robô colaborativo precisa obrigatoriamente de um acessório para paletizar os painéis de porta na estrutura metálica e, a esse acessório, é chamado de mão-presa. A mão-presa, para ser acoplada à cabeça do robô colaborativo, necessita de um acessório ou ferramenta. A Figura 84 representa o projeto final da mão-presa para o robô colaborativo.



Figura 84 -Mão-presa para o robô colaborativo.

Antes de projetar a mão-presa do robô colaborativo, deve-se analisar a forma como se paletiza o painel de porta, visto que a entrega do painel entre o robô SEPRO e o robô colaborativo é direta, como se viu na secção 3.7.3. Na Figura 85 é possível ver a forma como ambos os robôs transportam os painéis de porta traseiro na mão-presa.



Figura 85 – Entrega do painel traseiro: (a) lado frontal do painel e (b) lado traseiro do painel.

O robô SEPRO retira os painéis de porta da máquina de injeção pelo lado frontal do painel (Figura 85 (a)), ou seja, as ventosas da mão-presa do robô SEPRO estão do lado frontal do painel. Como a entrega é direta, o robô colaborativo terá de transportar o painel pelo lado traseiro. Logo, o projeto da mão-presa será para transportar o painel pelo lado traseiro.

Posto isto, é possível projetar a mão-presa para o robô colaborativo. Tal como para a estrutura metálica de paletização dos painéis, o seu projeto foi para ambos os painéis o que permite paletizar qualquer painel de porta. Assim, a mão-presa segue a mesma solução, ou seja, projetar uma mão-presa comum a todos os painéis de porta. Posto isto, a primeira abordagem que é feita é encontrar os pontos comuns em ambos os painéis para estes serem transportados.

Tendo em conta a maior massa do painel de porta, do painel da frente, cerca de 1,5 kg, decidiu-se que seria melhor, o transporte por parte das ventosas em três pontos, com um distanciamento entre eles considerável para evitar desequilíbrios durante o transporte do painel.

Relativamente à análise de pontos comuns em ambos os painéis, esta tornou-se complicada pois o lado traseiro do painel apresenta elevadas nervuras e reduzidas faces planas, o que não favorece o transporte por parte das ventosas. De facto, para garantir o correto acoplamento da ventosa à superfície, esta última deve ser limpa, sem detritos e plana.

Os pontos de absorção no painel dianteiro têm de ser iguais aos do painel traseiro, como dito anteriormente. Seja para o painel dianteiro ou traseiro, o lado esquerdo é simétrico ao direito e vice-versa, o que significa que os pontos encontrados num lado do painel são exatamente iguais ao outro lado, como se pode comprovar na Figura 86.



Figura 86 - Comparação dos pontos de transporte entre lado esquerdo e direito, respetivamente, do painel dianteiro.

Na Figura 86 estão presentes os painéis dianteiro, esquerdo e direito, respetivamente, em que se comprova que os pontos de transporte das ventosas (a cor amarela) são exatamente os mesmos.

A Figura 87 permite observar de forma mais clara os pontos de transporte para o painel dianteiro esquerdo, com o intuito de comprovar que as ventosas estão num face plana e sem nervuras, caso contrário não funcionaria.

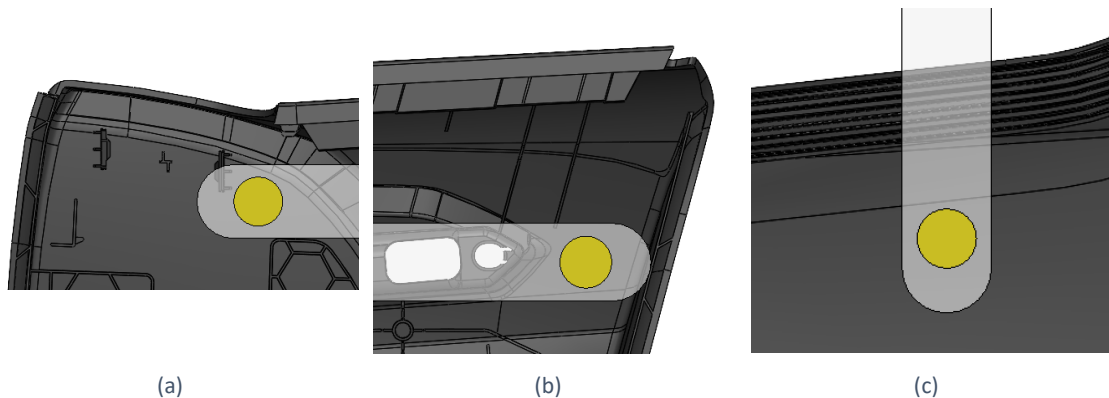


Figura 87 -Pormenor dos pontos de transporte do painel dianteiro esquerdo: (a) canto superior esquerdo; (b) canto superior direito e (c) parte inferior.

Tendo os pontos escolhidos pode-se então encontrar a disposição das ventosas para o painel traseiro. O painel traseiro é mais pequeno tanto em comprimento como em largura relativamente ao painel dianteiro, o que constitui uma dificuldade acrescida para encontrar os pontos ideais para o transporte por parte das ventosas. Assim, na Figura

88 pode-se visualizar os pontos de transporte para o painel traseiro, esquerdo e direito, respetivamente.



Figura 88 - Comparação dos pontos de transporte entre lado esquerdo e direito, respetivamente, do painel traseiro.

De forma a observar melhor os pontos de transporte, a Figura 89 representa um pormenor dos três pontos com o intuito de comprovar que as ventosas estão numa face plana e sem nervuras, o que permite um bom transporte por parte das ventosas.

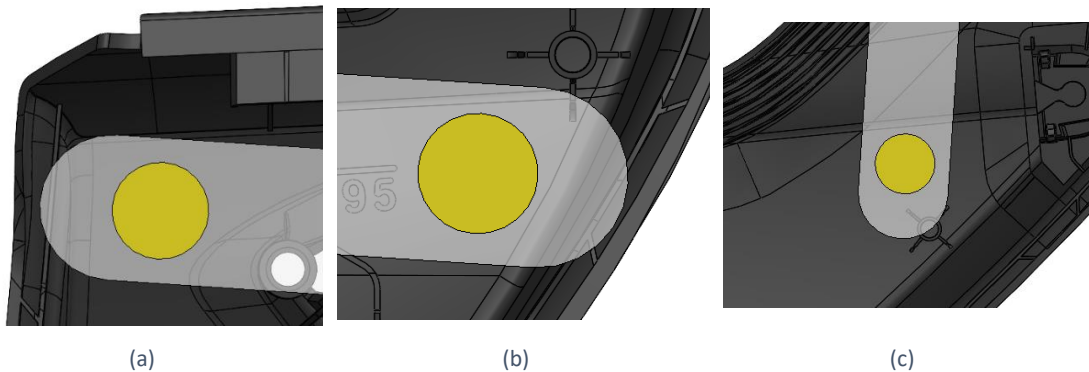


Figura 89 - Pormenor dos pontos de transporte do painel traseiro esquerdo: (a) canto superior esquerdo; (b) canto superior direito e (c) parte inferior direito.

A mão-presa necessita de ser apertada na cabeça do robô, sendo que o ponto de aperto deve ser o mais próximo possível do centroide da mão-presa de modo a diminuir eventuais cargas remotas aplicadas no robô.

Como é possível observar na Figura 90, a cabeça do robô colaborativo dispõe de seis furos roscados para aperto da ferramenta de trabalho, e ainda dois furos não roscados para alojar dois pinos cilíndricos para guiamento da mesma (indicados por setas).

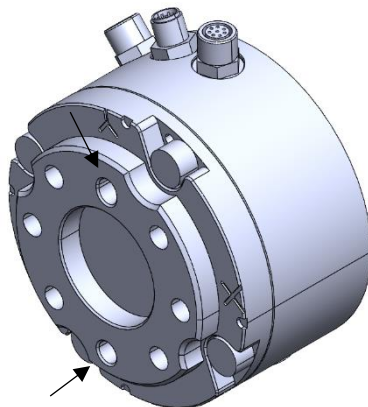


Figura 90 - Cabeça do robô colaborativo.

Portanto, a mão-presa tem a mesma geometria da cabeça do robô para ser possível o seu aperto, como se apresenta na Figura 91.

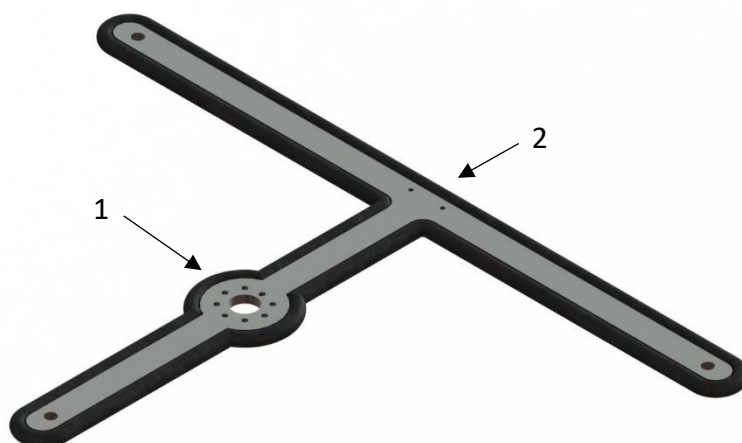


Figura 91 - Mão-presa para o robô colaborativo.

A mão-presa para o robô colaborativo tem a forma em T de forma a facilitar na maquinagem da peça e a centralizar o centroide da ferramenta. Como foi dito anteriormente, a cabeça do robô tem por predefinição uma furação, sendo igual à da mão-presa, indicada em (1). São ainda visíveis, os três furos passantes para acoplar as três ventosas nas extremidades das secções. Em (2) representam-se dois furos roscados para aparafusar um distribuidor de vácuo, de forma a distribuir o vácuo que provém da bomba de vácuo para as três ventosas. Por fim, com vista a proteger os colaboradores de eventuais impactos, isolou-se a mão-presa colando uma borracha polietileno à toda a volta. Este material é muito macio e permite proteger os colaboradores em caso de embate na mão-presa.

A Figura 92 representa as ventosas aplicadas na mão-presa, normalizadas e fornecidas pela empresa FESTO. A ventosa é apertada na mão-presa através de duas porcas, o que traduz um sistema porca e contraporca. A alimentação do vácuo é feita diretamente na zona superior da ventosa (a cor azul) através de um encaixe rápido.



Figura 92 - Ventosa normalizada.

3.7.5 Análise de Elementos Finitos

Nesta secção será abordada a análise de elementos finitos da estrutura metálica para paletização dos painéis e o suporte do robô colaborativo. Em cada análise são apresentadas as condições fronteira, cargas aplicadas e elementos de malha com as respetivas explicações. Com o MEF é possível obter as tensões de von Mises, deslocamentos e fator de segurança.

Nesta análise foram feitas três iterações para cada estrutura, de modo a obter conclusões relativamente a alterações nas estruturas para minimizar tensões instaladas e deslocamentos. Aplicaram-se condições fronteiras, cargas remotas e elementos de malha iguais para ambas as iterações com vista a obter uma referência de comparação fidedigna. Considerou-se para ambas as iterações o mesmo material, nomeadamente um aço estrutural S235JR com uma tensão de cedência de 235 MPa, um módulo de elasticidade longitudinal de 210 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,28 (MatWeb, 2021).

3.7.5.1 Estrutura metálica para paletização

A análise por MEF da estrutura para paletização permite conhecer o ponto de maior tensão instalada na estrutura e o ponto de maior deslocamento. Esta análise da estrutura de paletização dos painéis de porta foi feita em três iterações sendo: o teste 1 feito com um perfil circular de $21,3 \times 2 \text{ mm}^2$ para os tubos de paletização; no teste 2 alterou-se o perfil circular para $21,3 \times 3 \text{ mm}^2$, o que permite o aumento a espessura do tubo; o teste 3 adicionou-se um reforço nos tubos de paletização.

Como foi visto na secção 3.4, o robô colaborativo paletiza um lado da estrutura e após completar esse lado, a estrutura roda e pode paletizar no lado contrário. Assim sendo, foram efetuados dois tipos de testes: um para metade da lotação possível da estrutura e outro com a lotação completa da estrutura.

Antes da simulação é necessário conhecer as condições fronteira e forças atuantes. De referir que as forças atuantes nos tubos de paletização têm de ser calculadas para o painel com maior massa, o painel dianteiro. Como o painel dianteiro não é simétrico em nenhuma das três dimensões, através do *SolidWorks* é possível saber a distância do centro de gravidade até um dos pontos de paletização. A Figura 93 representa as distâncias do centro de gravidade (CG) do painel dianteiro ao tubo de paletização direito.

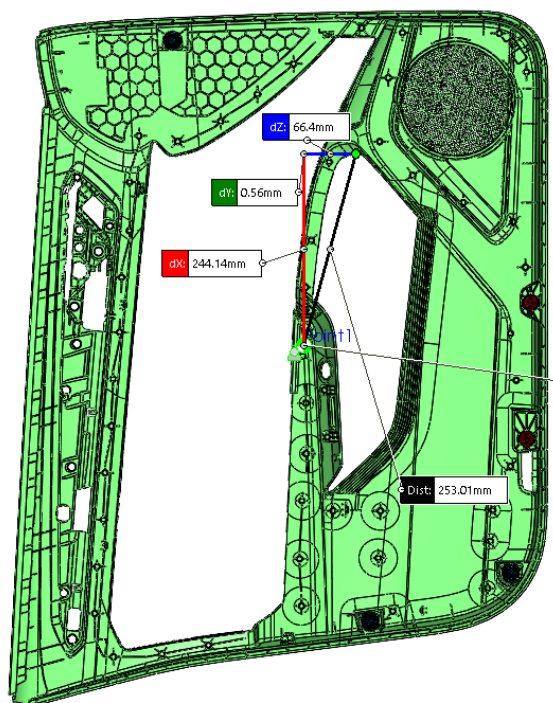


Figura 93 - Distância do CG do painel dianteiro ao tubo de paletização direito.

Através de um simples diagrama de corpo livre (DCL) (Figura 94) podem-se conhecer as cargas aplicadas nos tubos de paletização, sendo apenas necessária a massa do painel dianteiro, distanciamento entre tubos de paletização e distância em Oz do CG ao tubo de paletização direito.

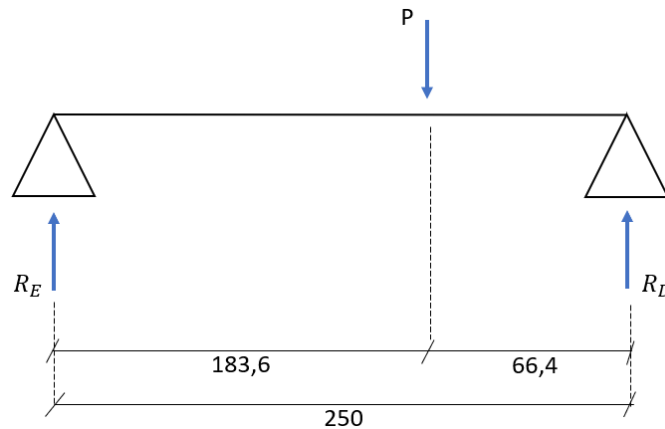


Figura 94 - DCL para cálculo de forças atuantes nos tubos de paletização.

P representa a carga para o número de painéis por cada par de tubos de paletização, ou seja, nove painéis, e é dada por: $P = 9 \times 1,5 \times 9,81$ N.

O sistema de equações é dado por:

$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \\ \sum M_{R_E} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} R_D + R_E = 9 \times 1,5 \times 9,81 \\ R_D \times 250 = 9 \times 1,5 \times 9,81 \times 183,6 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} R_E = 35,175 \text{ N} \\ R_D = 97,260 \text{ N} \end{cases}$$

Assim, a cada par de tubos de paletização, nos tubos da esquerda é aplicada uma carga de 35,175 N e nos tubos da direita uma carga de 97,260 N.

Com as forças atuantes calculadas, é necessário conhecer as condições fronteira para a simulação em elementos finitos. De modo a conhecer tensões e deslocamentos causados pela carga dos painéis nos tubos, decidiu-se aplicar as condições fronteira nos furos para fixação das rodas da estrutura de paletização, como se apresenta na Figura 95.

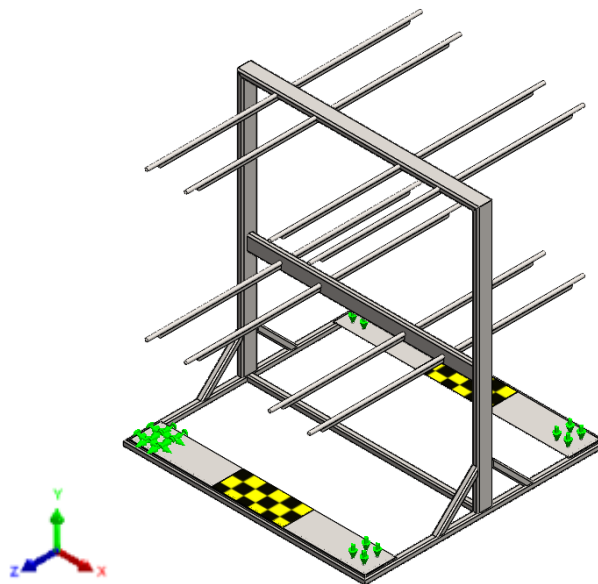


Figura 95 -Condições fronteira para análise da estrutura metálica.

As rodas da estrutura permitem o deslizamento da estrutura durante a rotação da mesma e, assim sendo, uma roda deve estar encastrada e as outras três apenas fixadas no sentido Oy. Ao rodar a estrutura, esta pode ter deslocamentos no plano Oxz, o que se impede apenas os deslocamentos na vertical. É necessário o encastramento de uma roda para que não haja deslocamentos de corpo rígido.

Por fim, efetua-se a criação dos elementos de malha para a simulação estática da estrutura (Tabela 11). Como foi visto pela revisão bibliográfica, um maior número de elementos de malha permite uma maior aproximação da solução exata. A malha é igual para os testes para metade da lotação da estrutura e para a estrutura completa visto que apenas se alteram as cargas aplicadas.

Tabela 11 - Dados das malhas para a estrutura metálica.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Tipo de malha		Malha sólida	
Gerador de malha	Malha de alta qualidade com base em curvatura		
Tipo de elemento	Tetraedro quadrático de 10 nós		
Pontos jacobianos		16 pontos	
Tamanho máx. de elementos		100 mm	
Tamanho min. de elementos		20 mm	
Total de nós	129.147	129.212	157.589
Total de elementos	66.478	66.661	79.864

- Simulações realizadas para metade da lotação da estrutura

O *SolidWorks*[®] permite a visualização da tensão de von Mises máxima, o deslocamento máximo e coeficiente de segurança mínimo a utilizar no suporte do robô.

Comparando inicialmente os resultados entre os testes 1 e 2, em que a alteração foi a espessura de parede dos tubos para paletização dos painéis, os resultados são idênticos, não havendo uma diferença significativa.

Em termos de tensão de von Mises (Figura 96), a tensão aumenta de 76,632 MPa para 83,962 MPa, o que ocorre em zonas distintas. No teste 1 ocorre na zona de aperto das rodas e no teste 2 na zona de soldadura dos tubos de paletização. Este aumento é influenciado por apenas um lado estar carregado.

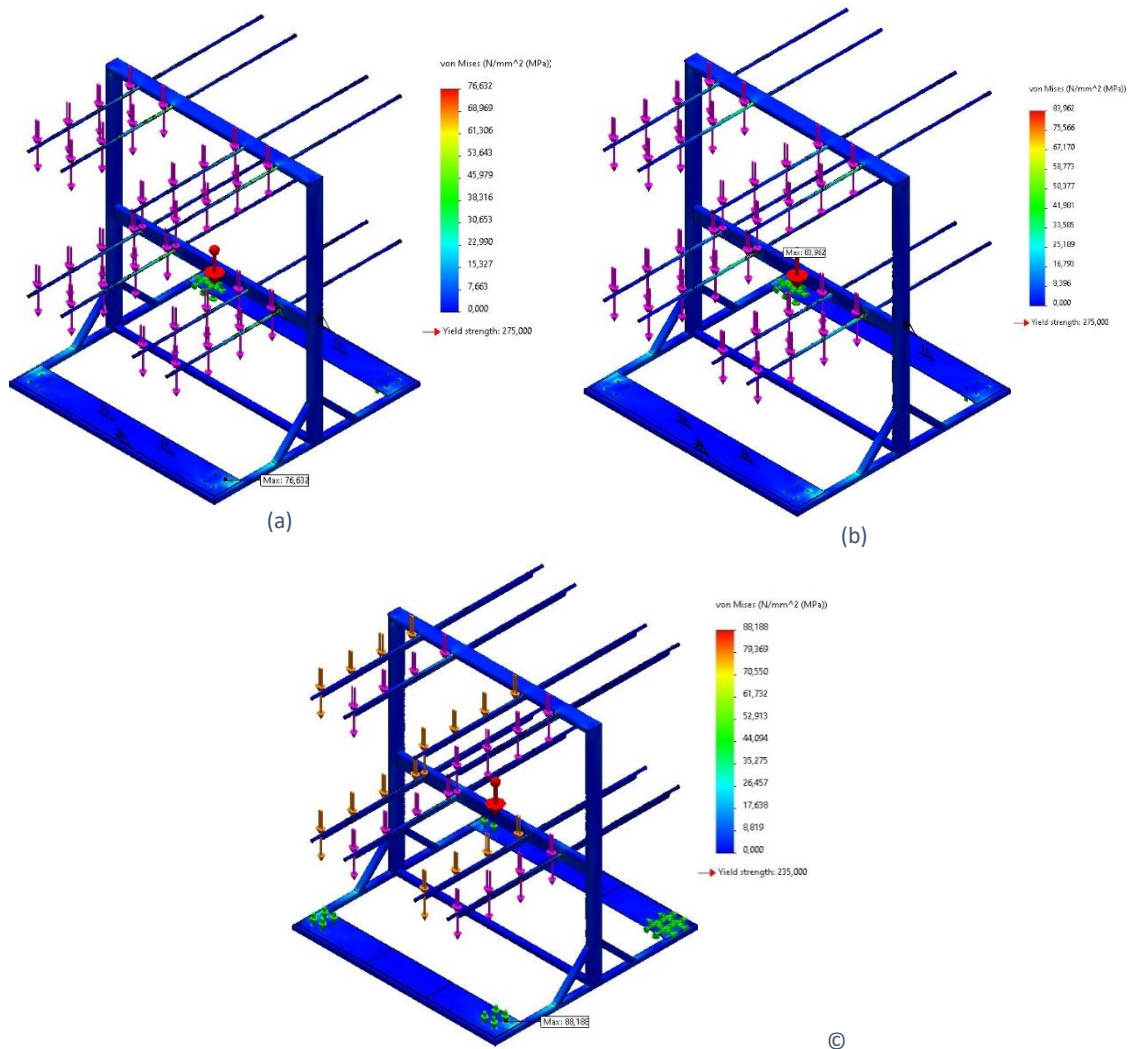


Figura 96 – Comparação da Tensão de von Mises máxima presente na estrutura de paletização: (a) teste 1; (b) teste 2 e (c) teste 3.

No teste 3 a tensão de von Mises aumentou relativamente aos testes 1 e 2, como era de prever, pois foi adicionado um reforço na zona crítica da estrutura, o que dá maior rigidez aos tubos de paletização, sendo um valor de 88,988 MPa.

Relativamente ao deslocamento de URES obtido (Figura 97), este é influenciado pelo facto de apenas se aplicar carga num dos lados da estrutura, o que faz com que o pilar vertical ceda para o lado da carga, o que origina uma flecha elevada.

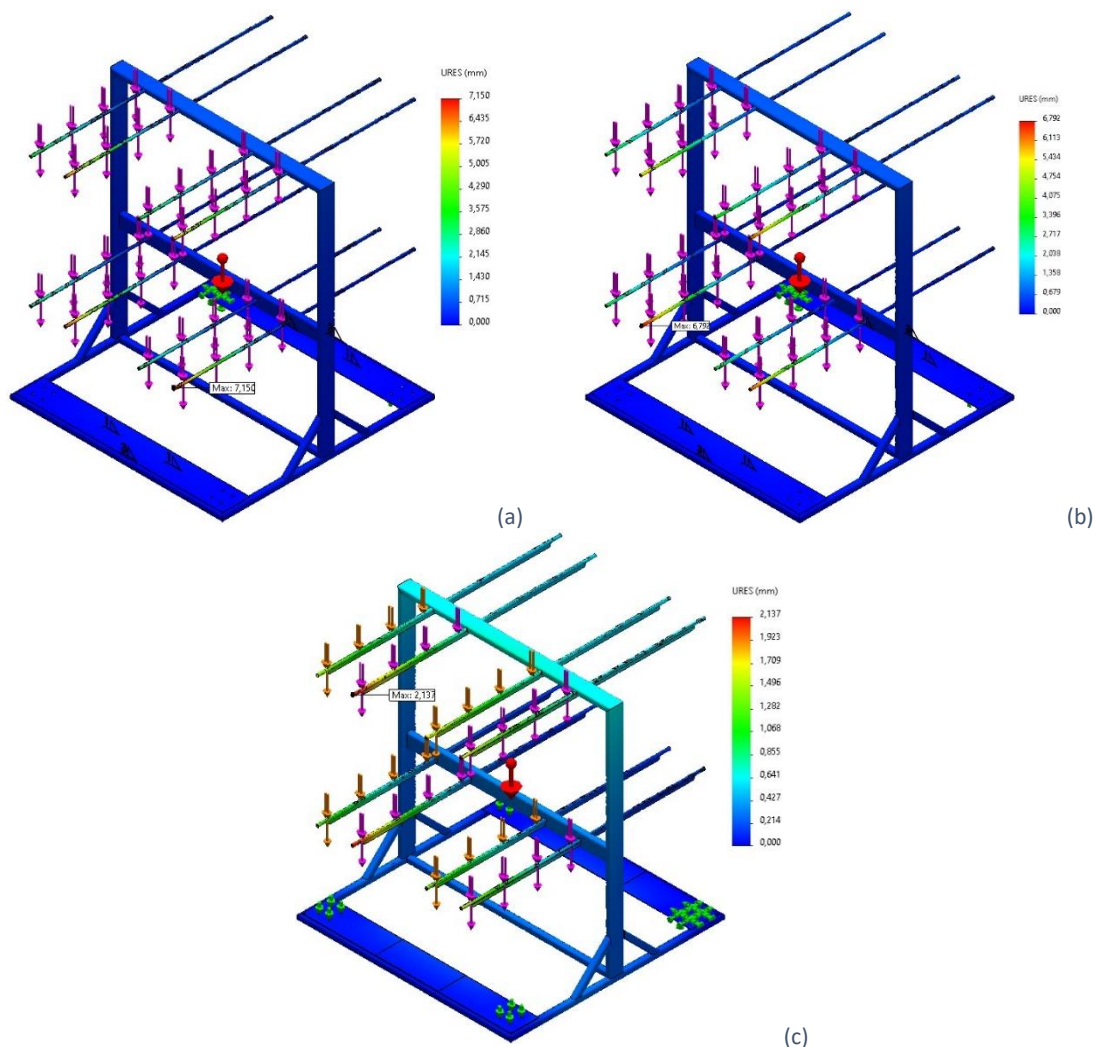


Figura 97 – Comparação do deslocamento resultante máximo presente na estrutura de paletização: (a) teste 1; (b) teste 2 e (c) teste 3.

Os resultados obtidos no deslocamento máximo, de 7,150 mm para o teste 1 e de 6,792 mm para o teste 2, não são aceitáveis. Desta forma, é necessário desenvolver uma solução para diminuir drasticamente este deslocamento. O deslocamento máximo para o teste 3 é bastante diferente e reduzido cerca de 1/3, com um valor de 2,137 mm.

O CS para o teste 1 e teste 2 foi de 3,589 e 3,275, respetivamente (Figura 98). Como a tensão de cedência do aço utilizado para as simulações é de 235 MPa, a tensão de von Mises é próxima, mas aceitável.

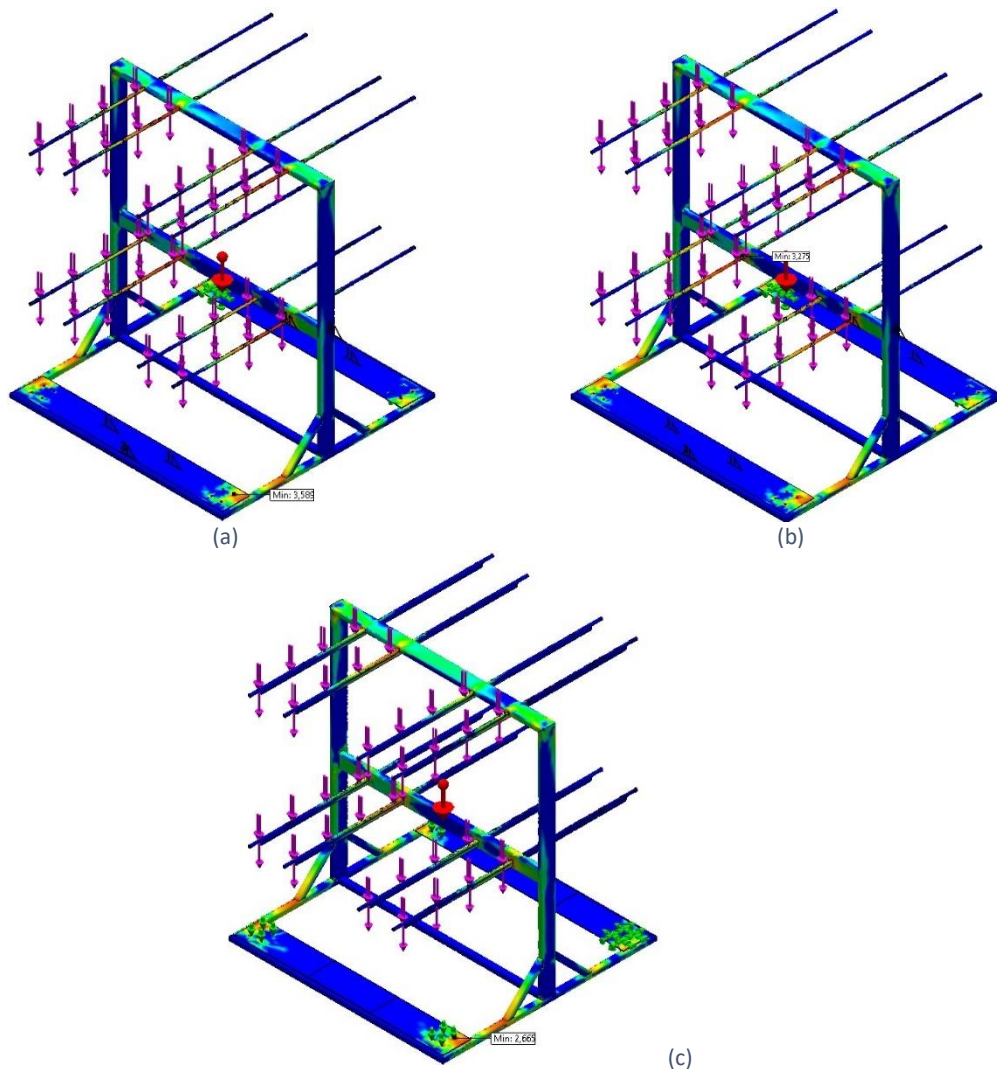


Figura 98 - Comparação do CS min. presente na estrutura de paletização: (a) teste 1; (b) teste 2 e (c) teste 3.

O CS para o teste 3 é de 2,665, o que constitui um valor bastante aceitável. A solução para um aumento do CS é a escolha de um aço com maior tensão de cedência, como por exemplo o aço S275JR, com tensão de cedência de 275 MPa.

Os resultados obtidos para os testes 1 e 2 não foram de encontro ao esperado visto que, em termos de deslocamento máximo este é demasiado elevado. Assim, após as alterações para o teste 3, que consistiram na aplicação de reforços em aço nos tubos de paletização, os resultados são bastante diferentes e aceitáveis.

– Simulações realizadas para a lotação máxima da estrutura

Nesta simulação pretende-se saber a tensão de von Mises máxima e deslocamento para a estrutura carregada totalmente, com o intuito de validar que a estrutura suporta toda a carga nela imposta. De salientar que, relativamente à simulação anterior, nesta são considerados mais 36 painéis de porta, uma massa total de 54 kg.

Ao contrário da simulação anterior, esta simulação não é influenciada pela inclinação da estrutura ao ser carregada, visto que esta é carregada de forma igual em ambos os lados. Comparando inicialmente os resultados entre os testes 1 e 2, os resultados são idênticos e observa-se uma diminuição da tensão, mas não existindo uma diferença significativa, como se pode ver na Figura 99.

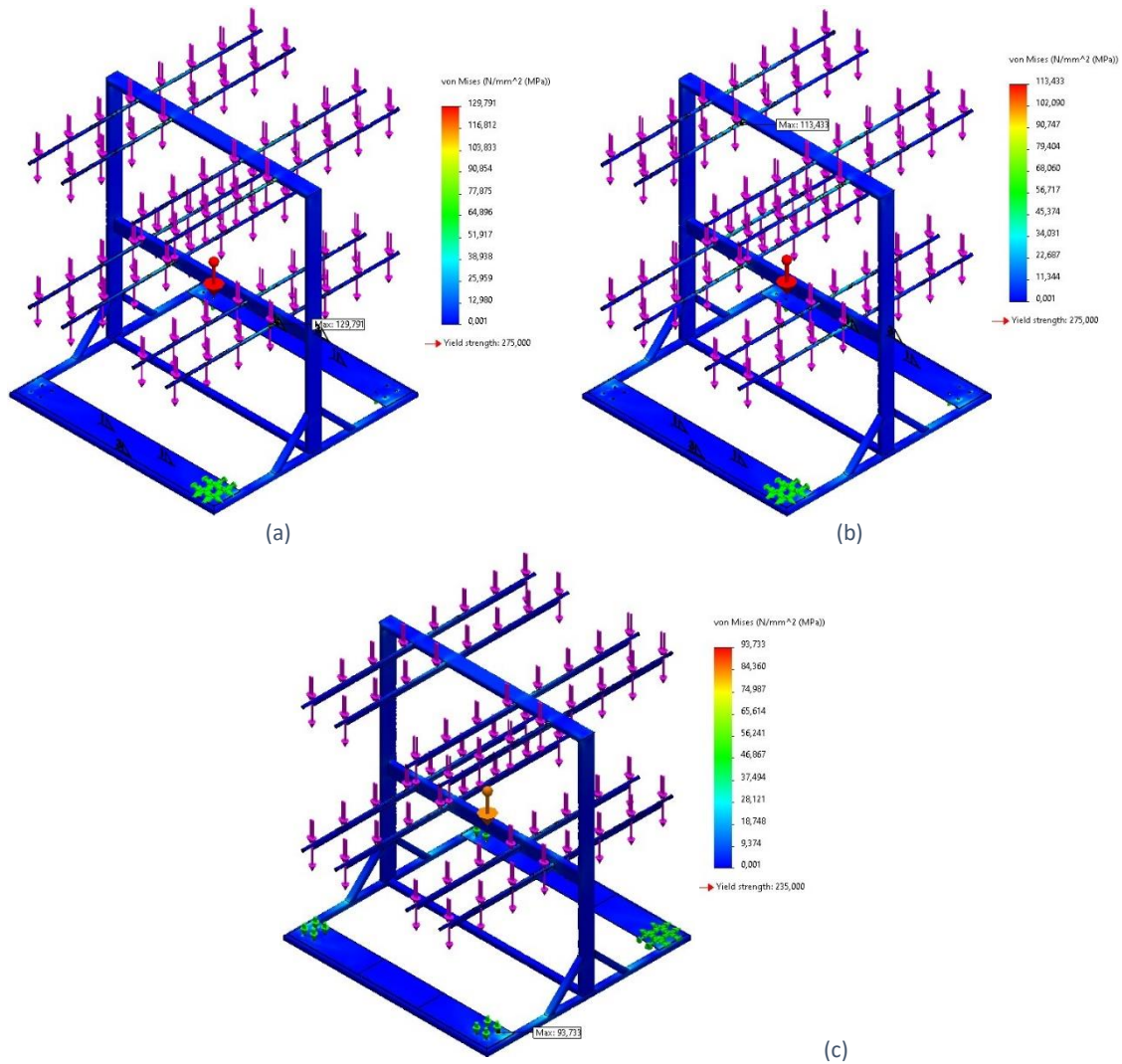


Figura 99 - Comparação da Tensão de von Mises máxima presente na estrutura de paletização: (a) teste 1; (b) teste 2 e (c) teste 3.

A tensão de von Mises diminuiu de 129,791 MPa para 113,433 MPa, entre os testes 1 e 2, devido ao aumento de espessura de parede dos tubos de paletização, o que leva a uma maior rigidez da estrutura. A tensão máxima é dada na zona de soldadura dos tubos de paletização, o que necessita de um cuidado acrescido, isto é, é uma zona crítica na estrutura e deve-se solucionar uma forma para diminuir esta tensão.

Tal como na simulação anterior, os resultados obtidos para os testes 1 e 2 não foram de encontro ao esperado visto que em termos de deslocamento máximo, este é demasiado

elevado. Assim, após as alterações para o teste 3, a aplicação de reforços em aço nos tubos de paletização, os resultados são bastante diferentes.

No teste 3 a tensão de von Mises diminuiu para um valor de 93,733 MPa, relativamente aos testes 1 e 2, como esperado, uma vez que se adicionou um reforço na zona crítica da estrutura, o que permite dar maior rigidez aos tubos de paletização.

De salientar que, com a aplicação dos reforços, a zona crítica deixa de ser a zona de soldadura dos tubos de paletização e passa a ser na fixação das rodas.

A Figura 100 permite conhecer os deslocamentos máximos obtidos para a estrutura de paletização.

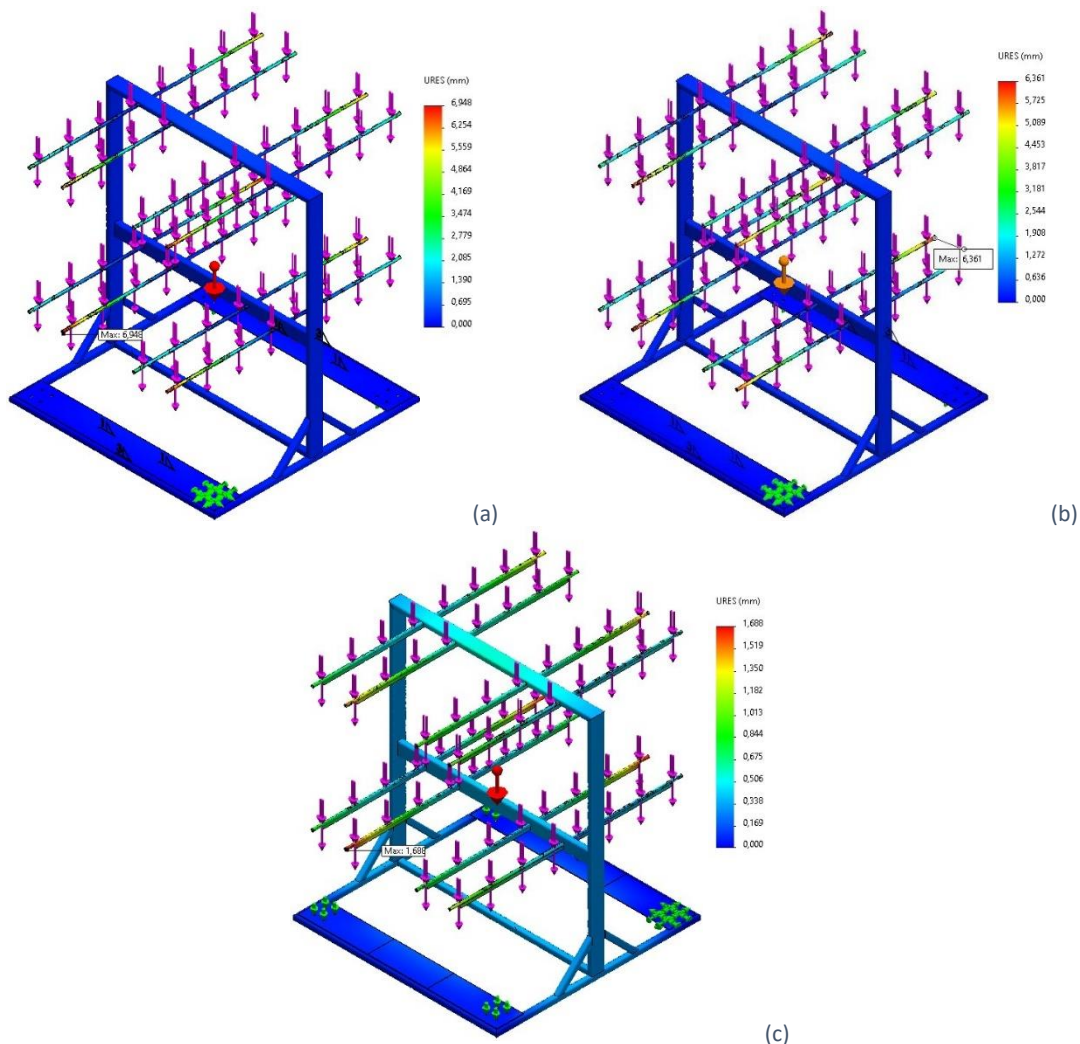


Figura 100 – Comparação do deslocamento obtido máximo presente na estrutura de paletização: (a) teste 1; (b) teste 2 e (c) teste 3.

O deslocamento máximo obtido para o teste 1 foi de 6,948 mm e, para o teste 2 de 6,361 mm. Estes valores não são aceitáveis tendo obrigatoriamente de arranjar uma solução para diminuir drasticamente este deslocamento. O aumento de apenas 1 mm

de espessura de parede dos tubos de paletização é visível na simulação de forma positiva pois ocorre uma diminuição do deslocamento máximo.

No teste 3 o deslocamento máximo obtido é bastante diferente e reduzido. Com um deslocamento máximo de 1,688 mm, a flecha máxima é aceitável, o que valida que os reforços dos tubos de paletização são bastantes eficazes, o que reduz em cerca de seis vezes o valor do deslocamento.

O CS do teste 1 e teste 2 foi de 2,119 e 2,424, respetivamente (Figura 101). Como a tensão de cedência do aço utilizado para as simulações é de 235 MPa, a tensão de von Mises é próxima, mas aceitável, sendo um CS considerável. Relativamente ao teste 3, o CS aumenta, mas é aceitável, sendo de apenas 2,507.

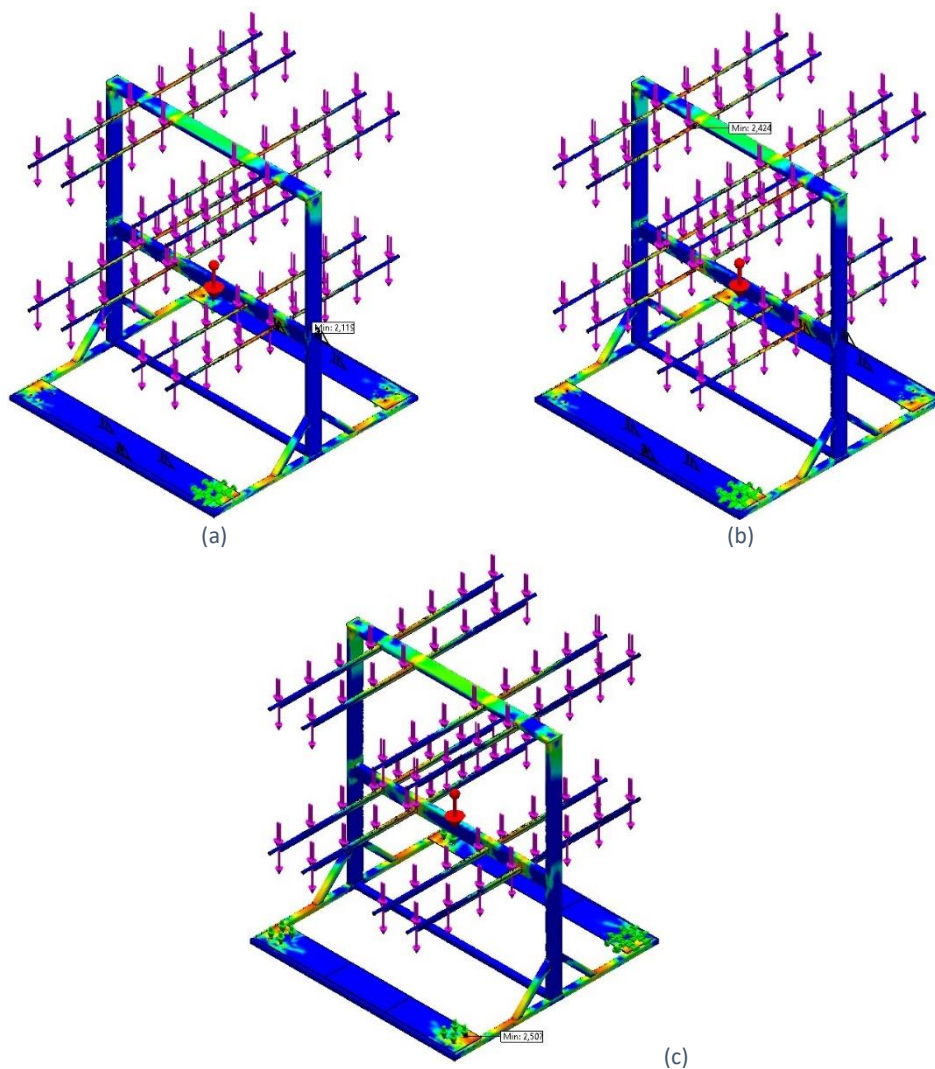


Figura 101 - Comparação do CS mínimo presente na estrutura de paletização: (a) teste 1; (b) teste 2 e (c) teste 3.

3.7.5.2 Suporte para robô colaborativo

A análise por MEF do suporte do robô colaborativo permite conhecer o ponto de maior tensão instalada na estrutura e o ponto de maior deslocamento. O suporte do robô, como visto anteriormente, permite a fixação do robô colaborativo e a fixação dos componentes elétricos e pneumáticos. As três iterações feitas para o suporte do robô colaborativo são as seguintes: o teste 1 é feito com um perfil de $100 \times 100 \times 5 \text{ mm}^3$ para o pé do robô, e as aberturas para passagem de tubos de ar comprimido e cabos elétricos têm uma dimensão de $90 \times 30 \text{ mm}^2$; no teste 2 aumentou-se a espessura do perfil para 10 mm e diminuíram-se as aberturas para uma dimensão de $60 \times 30 \text{ mm}^2$; no teste 3 alterou-se o perfil de tubo para $80 \times 80 \times 8 \text{ mm}^3$, as aberturas para uma dimensão de $50 \times 30 \text{ mm}^2$ e reduziram-se as dimensões da base inferior e nervuras.

É necessário conhecer o carregamento crítico para o suporte, sendo este com todos os componentes elétricos e pneumáticos fixados na estrutura e o robô colaborativo na posição mais afastada da base. Na Figura 102 é possível visualizar a posição de trabalho crítica do robô colaborativo a paletizar os painéis de porta.

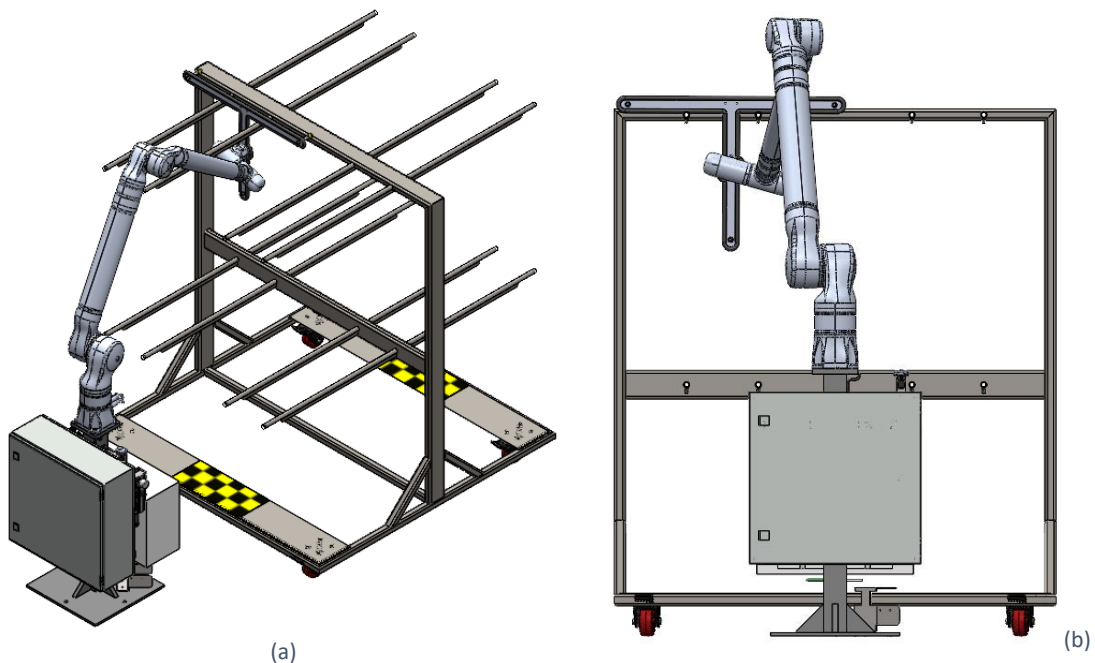


Figura 102 - Posição de trabalho crítica do robô colaborativo: (a) vista isométrica e (b) vista frontal.

A posição mais crítica do suporte do robô corresponde ao momento em que o robô paletiza o primeiro painel de porta no segundo nível de paletização, seja a paletização feita na primeira ou segunda fila visto que o suporte é fixado no eixo de simetria da estrutura. O primeiro painel de porta diz respeito à posição mais afastada do suporte, o que traduz num maior momento aplicado à base do robô colaborativo.

Posto isto, é necessário calcular as distâncias das cargas remotas aplicadas ao suporte do robô colaborativo. As distâncias apresentadas na Tabela 12 são calculadas desde o centro da base do robô até ao respetivo ponto, através do *software SolidWorks®*.

A Figura 103 mostra as cargas remotas aplicadas no suporte do robô colaborativo e origem do suporte do robô.

Tabela 12 - Distâncias das cargas remotas aplicadas à origem do suporte.

	Carga remota	Oxx [mm]	Oyy [mm]	Ozz [mm]	Massa [kg]
1	CG dos componentes elétricos e pneumáticos	9,56	551,78	-78,81	46,77
2	CG do controlador do robô	0	405	176,64	25
3	CG do robô colaborativo para ponto critico	113,03	1573,05	358,01	71,01
4	CG da mão-presa para ponto critico	362,69	1624,69	1337,98	2,79

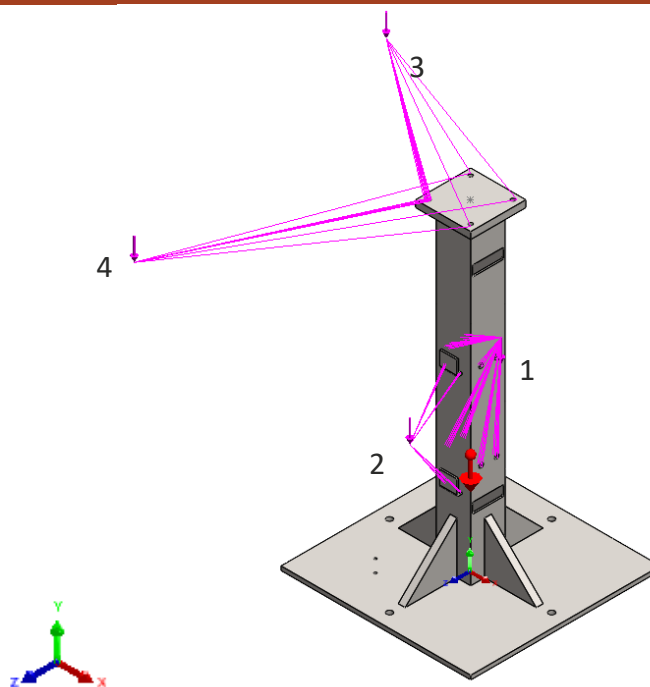


Figura 103 - Cargas remotas aplicadas no suporte do robô colaborativo.

Na Figura 103 encontram-se representadas as cargas remotas aplicadas no suporte do robô colaborativo. Para o teste do suporte do robô colaborativo, a condição fronteira imposta foi o encastramento da face inferior do suporte, visto que o suporte é fixado ao solo.

Relativamente às cargas aplicadas, a face de aplicação é distinta entre as cargas. A carga dos componentes elétricos e pneumáticos (1) diz respeito à chapa do suporte do quadro elétrico, sendo alojados os componentes pneumáticos e quadro elétrico, em que este é aparafusado nos oito furos roscados do suporte do robô. Assim, a face de aplicação da carga remota é nos oitos furos roscados. Para o controlador do robô colaborativo (2), a face de aplicação da carga remota é no suporte soldado no suporte do robô, visto que o controlador é inserido nesse suporte e, como tal, fica suspenso e aplica uma cargas sobre elas.

As cargas da posição máxima do robô colaborativo são dadas pelo CG da mão-presa com o painel dianteiro (3) e pelo CG do robô colaborativo (4), sendo a face de aplicação da carga remota a face da fixação do robô. É considerado o painel dianteiro pois apresenta uma massa superior ao painel traseiro, o que origina uma maior carga aplicada na mão-presa do robô colaborativo.

Finalmente, depois de aplicadas as condições fronteira, cargas remotas e escolha de material, pode-se criar os elementos de malha para a simulação estática. Na Tabela 13 estão presentes os dados das malhas para as três iterações feitas.

Tabela 13 - Dados das malhas para suporte do robô.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Tipo de malha	Malha sólida		
Gerador de malha	Malha de alta qualidade com base em curvatura		
Tipo de elemento	Tetraedro quadrático de 10 nós		
Pontos jacobianos	16 pontos		
Tamanho máx. de elementos	20 mm		
Tamanho min. de elementos	4 mm		
Total de nós	44.961	45.021	38.253
Total de elementos	22.784	22.859	19.721

– Simulações realizadas

O *SolidWorks*[®] permite a visualização da tensão de von Mises máxima, o deslocamento máximo e coeficiente de segurança mínimo a utilizar no suporte do robô. A comparação entre os testes 1 e 2, apresentada na Figura 104, com os resultados são bastante diferentes. A tensão de von Mises máxima é de 23,595 MPa para o teste 1 e de

11,487 MPa para o teste 2. A alteração foi aumentar a espessura do perfil do pé do robô e diminuir as aberturas para passagem dos tubos de ar comprimido e cabos elétricos.

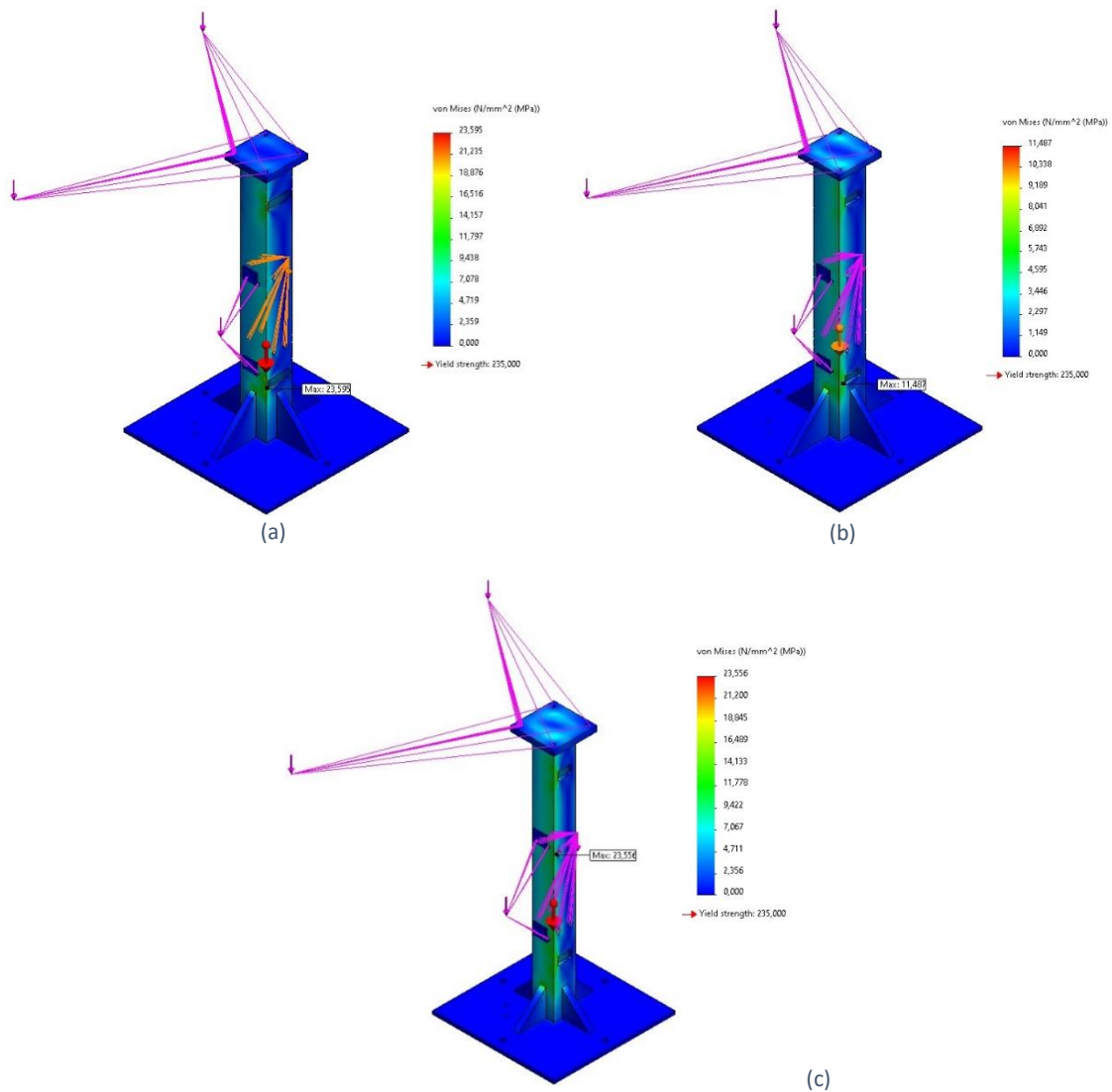


Figura 104 – Comparação da Tensão de von Mises máxima presente no suporte do robô: (a) teste 1; (b) teste 2 e (c) teste 3.

A tensão de von Mises máxima é dada nas aberturas feitas no perfil para passagens de cabos elétricos e tubos de ar comprimido e, com o aumento da espessura do perfil, reduz a tensão instalada. Esta diminuição acontece também devido à diminuição das aberturas.

Quanto ao teste 3, o seu objetivo é a diminuição das dimensões do suporte do robô sem alteração da altura e da base de aperto do robô colaborativo, de modo a diminuir o peso da estrutura e custo de materiais, mas sem comprometer a rigidez da estrutura. Assim, pode-se ver que a tensão de von Mises é idêntica ao teste 1 sendo de 23,556 MPa, resultando num CS de 9,976 (Figura 106). Com a diminuição do perfil e dimensões da

chapa, nomeadamente na base inferior e nervuras, foi possível uma redução de peso da estrutura de cerca 22,18 kg, sem comprometer a rigidez da estrutura.

Relativamente aos deslocamentos (Figura 105), no teste 1 o deslocamento máximo é de 0,212 mm e para o teste 2 de 0,115 mm. O deslocamento máximo é dado na face de aperto do robô colaborativo e, comparando os dois testes, esta diminuição do deslocamento é dado pelo aumento da espessura de parede do perfil.

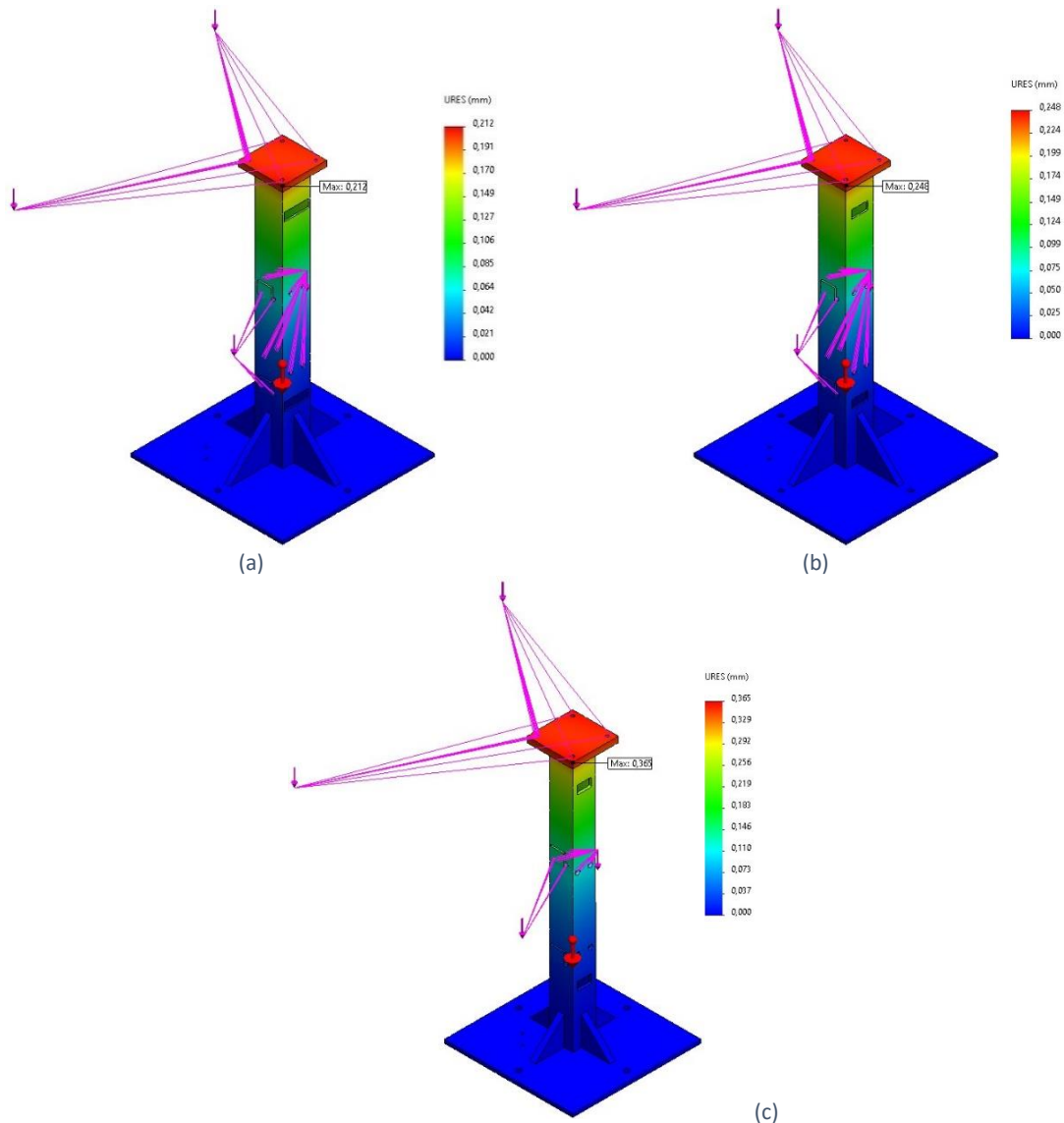


Figura 105 - Comparação do deslocamento máximo obtido presente no suporte do robô: (a) teste 1; (b) teste 2 e (c) teste 3.

Quanto ao deslocamento máximo presente no teste 3, este tem de ser inferior a 0,5 mm devido à precisão do robô colaborativo. Um deslocamento superior origina vibrações no robô e não garante a paletização na posição correta. Assim, com um deslocamento de 0,365 mm, esta estrutura permite um bom funcionamento do robô colaborativo.

Relativamente ao coeficiente de segurança (CS) do suporte do robô, no teste 1 foi de 9,96 e para o teste 2 de 20,459, como se pode ver na Figura 106. Este aumento significativo do CS deve-se ao aumento da espessura de parede do perfil, resultando numa diminuição da tensão de von Mises. Para o teste 3 o CS é de 9,976, o que permite aferir a segurança da estrutura com margem considerável.

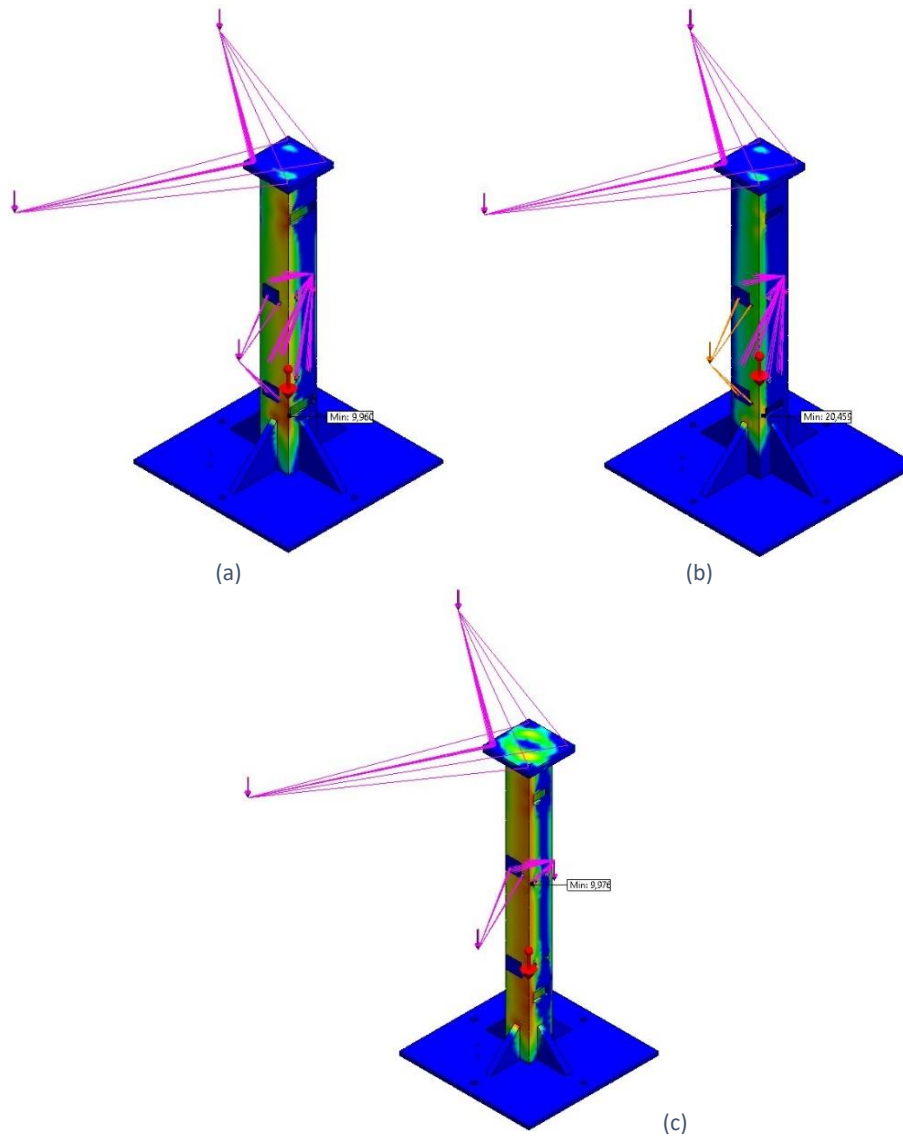


Figura 106 - Comparação do CS min. presente no suporte do robô: (a) Teste 1; (b) Teste 2; (c) Teste 3.

3.7.6 Escolha de materiais

A escolha do material para os diversos equipamentos projetados deve ser ponderada, escolhendo o material adequado, equilibrando rigidez, massa e preço. Relativamente à estrutura metálica, como se viu anteriormente, utilizaram-se dois perfis de tubo. Neste tipo de estrutura o material escolhido é um aço estrutural com baixo teor em carbono,

visto ser fácil de conformar plasticamente e soldar, com alta ductilidade e alta resistência mecânica.

Todos os perfis e materiais utilizados foram escolhidos tendo em conta a sua existência no mercado. Na Tabela 14 estão presentes os perfis e respetivos materiais a utilizar no suporte do robô colaborativo.

Tabela 14 - Escolha do material para o suporte do robô colaborativo.

Perfil	Material
Chapa de 5 mm	Aço S235JR
Chapa de 10 mm	
Chapa de 12 mm	
Chapa de 20 mm	
Quadrado oco de 80×8 mm ²	

Os perfis em aço S235JR podem ser encontrados no catálogo do Grupo Ferpinta. As chapas com as espessuras pretendidas são fornecidas num aço laminado a quente com uma tensão de cedência de 235 MPa, e com uma tensão de rotura entre 360-510 MPa (MatWeb, 2021).

Relativamente à estrutura metálica para paletização dos painéis de porta, os perfis e materiais respetivos estão presentes na Tabela 15.

Tabela 15 - Escolha do material para a estrutura metálica para paletização dos painéis de porta.

Perfil	Material
Chapa de 3 mm	Aço S235JR
Chapa de 10 mm	
Circular oco de 21,3×3 mm ²	
Quadrado oco de 40×4 mm ²	
Retangular oco de 100×40×5 mm ³	PTFE
Circular oco de 23×1 mm ²	

Para os perfis tubulares, o material que se utiliza é o aço S235JR, sendo o mesmo utilizado para o suporte do robô colaborativo. Utilizam-se tubos de PTFE pois é um material com boas propriedades mecânicas e excelente resistência à fadiga em aplicações que envolvem flexões e vibrações (Poly Lanema, 2021c). Este material permite absorver o impacto do painel ao ser paletizado pelo robô, o que minimiza o risco de deformação do painel, pois este ainda está a uma temperatura elevada quando paletizado.

Relativamente ao sistema rotativo da estrutura metálica para paletização dos painéis, os materiais utilizados estão presentes na Tabela 16.

Tabela 16 - Escolha do material para o sistema rotativo da estrutura metálica.

Perfil	Material
Chapa de 4 mm	Aço S235JR
Chapa de 10 mm	
Chapa de 15 mm	
Retangular oco de 140×60×10 mm ³	
Perfil em L com 120×120×15 mm ³	
Chapa de 1,5 mm	Alumínio AW5005
Chapa de 10 mm	Alumínio AW5083
Chapa de 12 mm	
Chapa de 20 mm	
Borracha de 5 mm	Borracha Poliéster
Veio de 18 mm	Aço 18 MnCr 5

O aço S235JR é o mesmo material utilizado no suporte do robô e na estrutura metálica para paletização dos painéis. Segundo o catálogo da empresa Ramada Aços, o aço mais adequado para veios e engrenagens é um aço de cementação, mais propriamente o aço 18 MnCr 5, que apresenta uma tensão de cedência de 493 MPa e uma tensão de rotura de 942 MPa (Steel Grades, 2021).

Os perfis de alumínio foram escolhidos segundo a empresa Poly Lanema e optou-se por um alumínio AW5005 para a folha de 1,5 mm, necessária para o fabrico da proteção do sistema de rotação. O alumínio AW5005 apresenta uma tensão de cedência mínima de 145 MPa e uma tensão de rotura mínima de 185 MPa (Poly Lanema, 2021a).

Optou-se pelo alumínio AW5083 para todas as placas de alumínio, pois este material apresenta uma tensão de cedência superior ao alumínio AW5005. O alumínio AW5083 apresenta uma tensão de cedência de cerca 270 MPa e uma tensão de rotura de 345 MPa (Poly Lanema, 2021b), visto que são aplicadas maiores cargas sob estas.

A borracha em poliéster é um material com baixo atrito e permite à cremalheira deslizar mais facilmente.

Relativamente à mão-presa do robô colaborativo, os materiais utilizados estão presentes na Tabela 17.

Tabela 17 - Escolha do material para a mão-presa do robô colaborativo.

Perfil	Material
Chapa de 10 mm	Alumínio AW5083
Tubo de 15 mm	Borracha polietileno

3.7.7 Processos de fabrico

Nesta secção pretende-se a explicação dos processos de fabrico de cada projeto, abordando a ordem de construção e respetivo processo de fabrico.

- Estrutura metálica para paletização

A construção da estrutura metálica é feita por conformação plástica de tubo, mais precisamente corte a laser. Na ligação dos diversos tubos utiliza-se o processo de ligação de soldadura.

A montagem da estrutura inicia-se pela soldadura entre a base inferior e do pilar vertical. De forma a simplificar a construção da estrutura, o pilar vertical apresenta furos de 22 mm de diâmetro (Figura 107) para que, posteriormente, seja possível a passagem e dos tubos para paletização e posterior processo de soldadura.

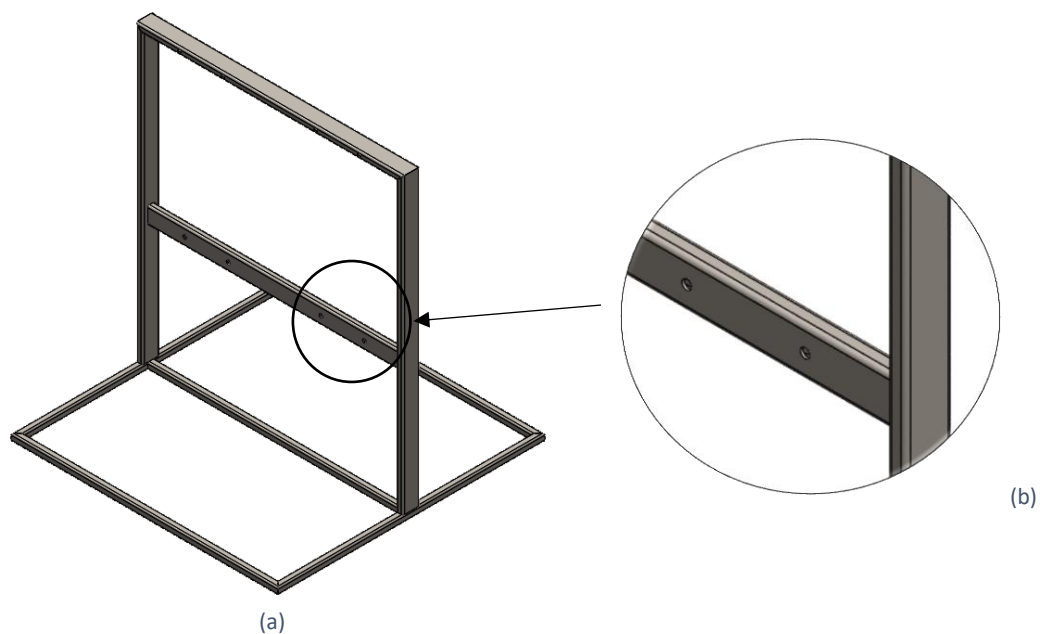


Figura 107 – Construção da estrutura metálica: (a) montagem das duas bases, horizontal e vertical e (b) pormenor dos furos existentes na estrutura para acoplar tubos de paletização.

De seguida, os tubos de paletização são soldados na estrutura (Figura 108). O tubo de paletização tem uma dimensão de 1,75 m, ou seja, este passa pelo furo e é soldado na posição correta, no eixo de simetria.

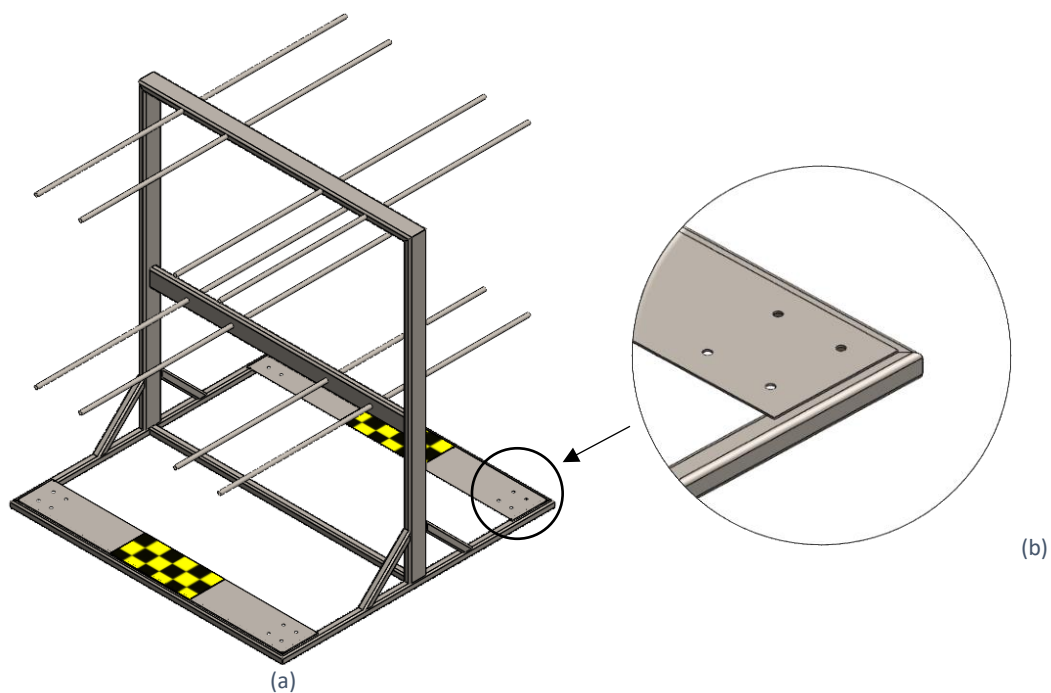


Figura 108 -Construção da estrutura metálica: (a) montagem dos tubos para paletização e (b) detalhe dos furos para aperto das rodas.

Devido à altura elevada da estrutura, esta tem tendência a oscilar perdendo o equilíbrio, e, para melhorar a nível de estabilidade aplica-se através de soldadura quatro tubos de perfil quadrado com uma inclinação de 45°.

Como se pode ver na Figura 108, aplica-se através de soldadura, a chapa para fixação das rodas da estrutura. As rodas possuem um travão mecânico acionado manualmente e, a chapa apresenta furos roscados para aparafusar quatro parafusos M12.

Por fim, na Figura 109, exemplifica-se a soldadura dos reforços para os tubos de paletização de modo a reduzir a flecha ao serem carregados com os painéis de porta. Após estes serem soldados à estrutura aplicam-se os tubos de PTFE nos tubos de paletização.

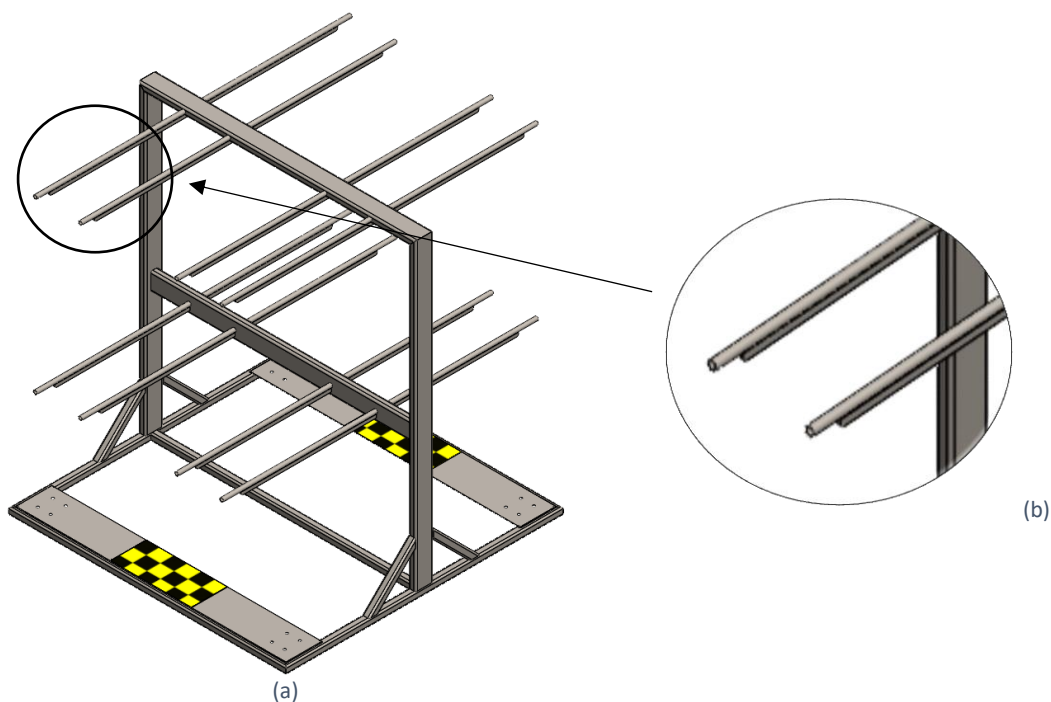


Figura 109 -Construção da estrutura metálica: (a) montagem dos reforços dos tubos e (b) detalhe dos reforços.

– Sistema rotativo da estrutura metálica

A grande maioria dos componentes do sistema de rotação é feita por corte de chapa de aço e alumínio, sendo que alguns necessitam de serem maquinados, mais propriamente por fresagem. A chapa de proteção do sistema de rotação é obtida através de quinagem de chapa. Todos os furos são realizados através de uma furadora vertical para melhor precisão. Os processos de ligação dos componentes são feitos por soldadura ou por ligação aparafusada.

Assim, primeiramente, é necessário obter a base do sistema de rotação. A base da estrutura é composta por sete componentes, obtidos através de corte de chapa em aço. Na Figura 110 é visível a primeira fase do processo de fabrico da base do sistema de rotação.

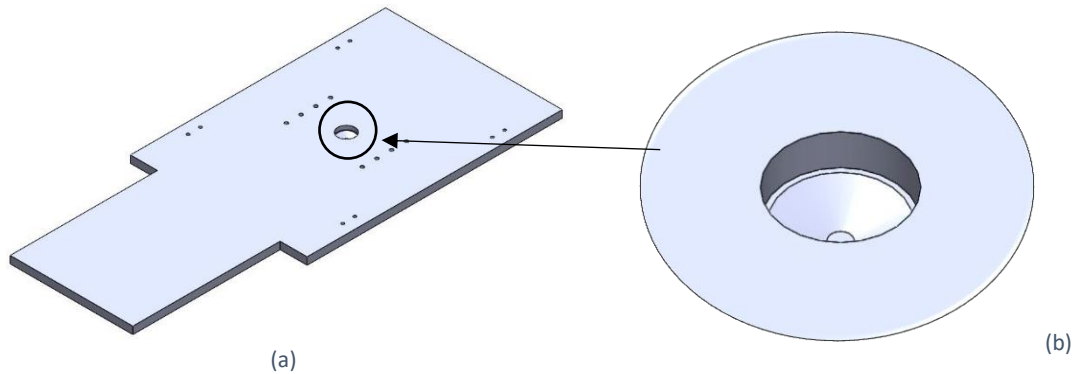


Figura 110 - Primeiro processo da base do sistema de rotação: (a) chapa da base e (b) detalhe do rasgo para o rolamento.

Esta chapa é obtida através de corte, sendo posteriormente feitos vários furos roscados através de um macho numa furadora vertical. O rasgo para o rolamento é obtido através do processo de fresagem. O segundo passo é a ligação através de soldadura das duas chapas que se limitam as zonas de trabalho (Figura 111).

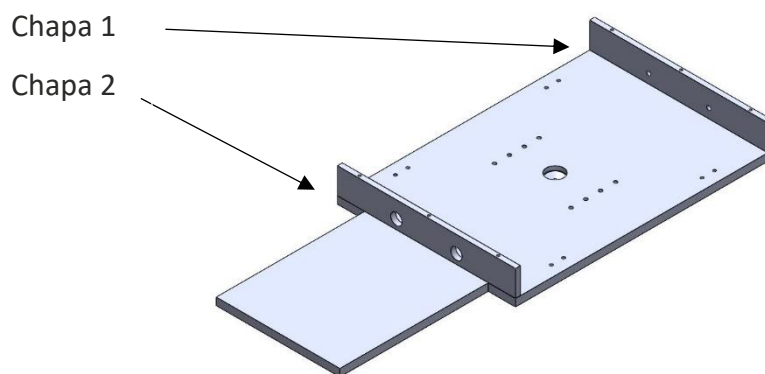


Figura 111 - Segundo processo da base do sistema de rotação.

A chapa 1 pretende limitar o curso do cilindro pneumático através da utilização de um batente para cada cilindro. Os furos para os batentes são roscados de modo a facilitar o ajuste dos mesmos. A chapa 2 pretende limitar a posição do cilindro, sendo que o cilindro entra pelos furos passantes e é apertado através de uma porca. Ambas as chapas têm furos roscados no topo para aperto da chapa de proteção. De seguida são soldadas quatro nervuras para reforçar a base do sistema de rotação (Figura 112).

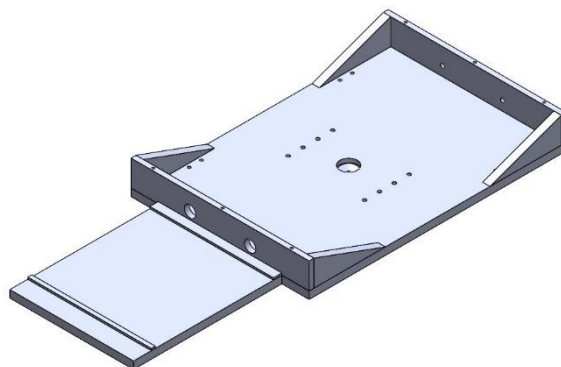


Figura 112 - Terceiro processo da base do sistema de rotação.

Neste momento também é necessário soldar duas chapas para nivelar os cilindros pneumáticos, que se encontram alinhados com as rodas dentadas e concêntricos com os furos passantes para aperto dos mesmos. Por fim, soldam-se cinco chapas com um furo passante para a fixação da base ao solo (Figura 113).

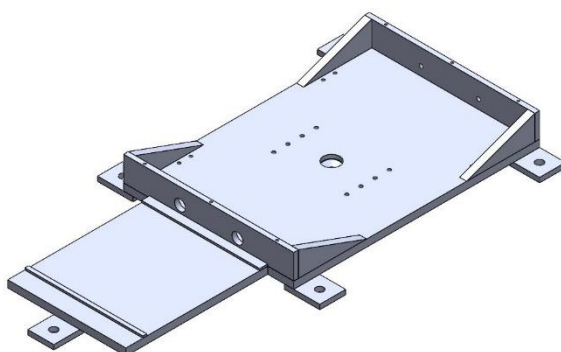


Figura 113 - Quarto e último processo da base do sistema de rotação.

Como foi dito na secção 3.7.2, estas chapas para fixação ao solo estão a uma altura do solo de 2 mm para facilitar a movimentação do sistema através das rodas. Assim, estas chapas têm de ser soldadas na parte inferior da base para dar essa mesma altura de 2 mm. De facto, caso as chapas fizessem parte da chapa de base (Figura 110), a altura referida alterava-se para 12 mm. Esse aumento de altura em 10 mm não garante a fixação do sistema de rotação ao solo pois já é uma altura consideravelmente alta.

Após a obtenção da base do sistema de rotação é possível a montagem dos cilindros pneumáticos, dos batentes e do perfil em L para montagem das rodas. Na Figura 114 é possível ver a montagem nos componentes mencionados anteriormente e um detalhe do perfil em L para a fixação das rodas.

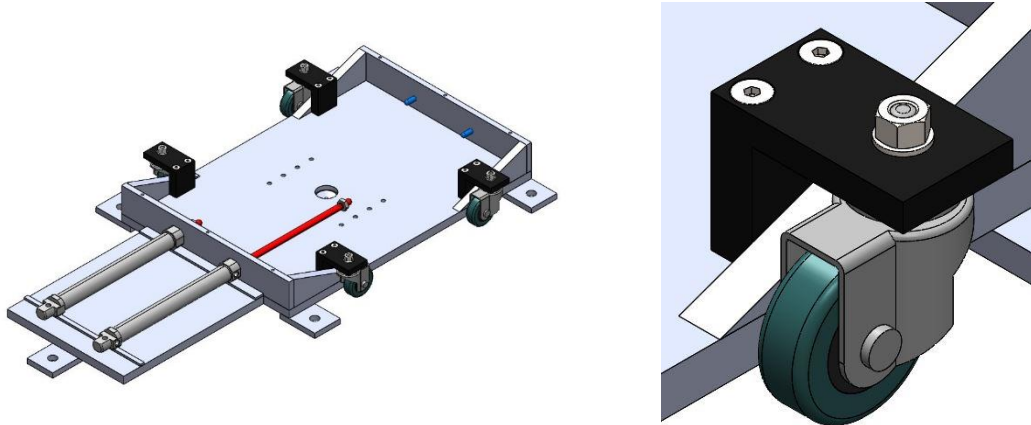


Figura 114 - Montagem de componentes na base: (a) cilindro pneumático, batentes e perfil em L e (b) perfil em L para aperto das rodas.

Como se pode ver, os cilindros estão apoiados nas chapas e entram pelos furos passantes da chapa 2, em que estes são apertados na outra face por uma porca. A ponta da haste do cilindro é roscada para se que se possa apertar o cilindro à cremalheira, sendo o cilindro aparafusado na posição correta com uma porca. Os batentes estão roscados na chapa 2, como se vê na Figura 114, e os perfis em L são apertados através de dois parafusos. O suporte das rodas apresentam um pino roscado que passa pelo furo existente no perfil em L, e posteriormente são apertadas pelo meio de uma anilha e uma porca. Como não é possível encontrar no mercado um perfil em L com as dimensões pretendidas, antes da fixação do perfil em L, este passa pelo processo de corte. Posto isto, é possível a abertura dos furos passantes.

De seguida, o rolamento pode ser alojado na base do sistema de rotação e coloca-se na posição correta o componente 0208 para nivelar a cremalheira com o cilindro pneumático, em que este aloja duas borrachas para diminuir a fricção existente durante o avanço e recuo da cremalheira (Figura 115).

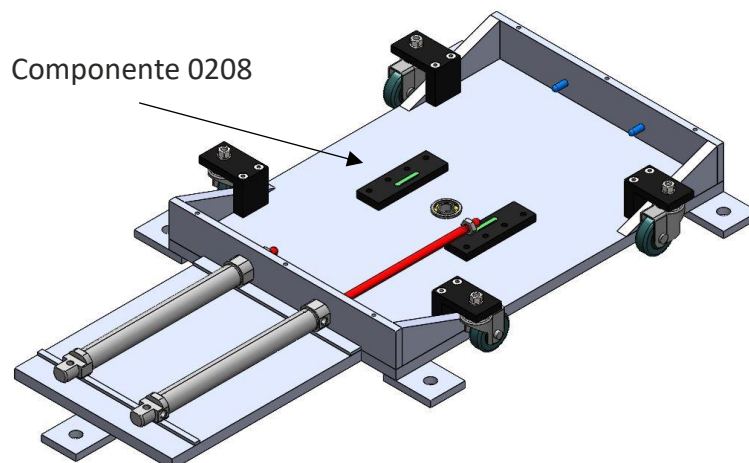


Figura 115 - Colocação do rolamento e duas chapas com borrachas.

Estas chapas são feitas através de corte de alumínio e abertos furos passantes. Como as borrachas precisam de ser alojadas, as chapas passam por um processo de fresagem, o que permite abrir um rasgo para as borrachas.

Posteriormente, coloca-se o componente 0208 para bloquear o deslocamento da cremalheira na posição correta e apertam-se as cremalheiras aos cilindros pneumáticos (Figura 116). Este componente é obtido por corte e apresenta furos passantes obtidos por uma furadora vertical.

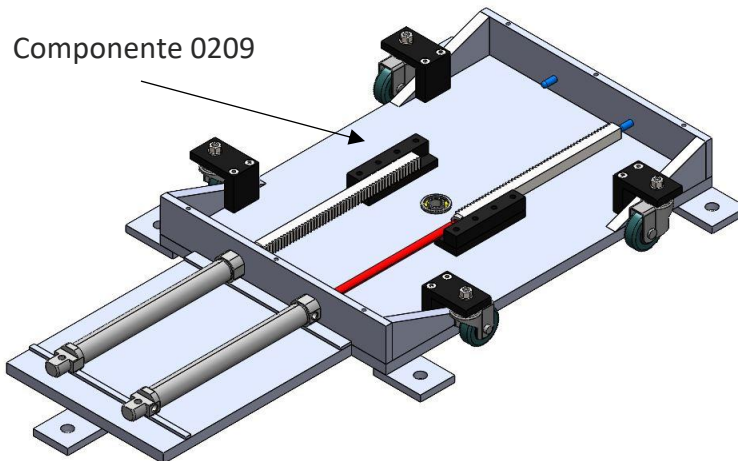


Figura 116 - Montagem das chapas de bloqueio da cremalheira, cremalheira e rolamento.

Assim, já existem condições para a montagem do veio com o pinhão na base do sistema de rotação. O veio é obtido por torneamento numa máquina CNC e fresagem para melhor qualidade e precisão. Antes da montagem na base, deve ser colocado no veio uma chaveta e de seguida, com o auxílio de uma prensa hidráulica, colocar o veio no pinhão à pressão, tal como se pode ver na Figura 117.

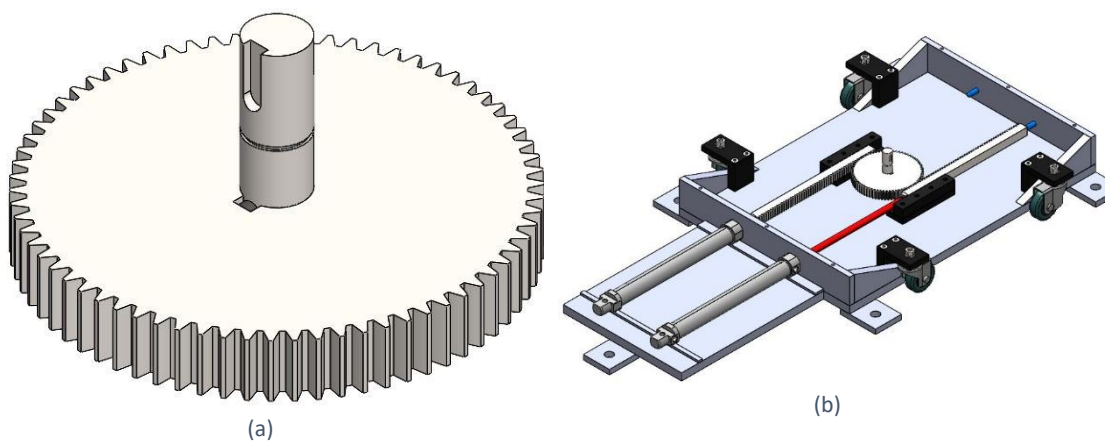


Figura 117 - Montagem do veio na base: (a) veio com chaveta e pinhão e (b) veio montado na base.

O veio é colocado concêntrico com o rolamento da base e fixo com o auxílio de um anel elástico para veio. Por fim, pode-se apertar uma tampa, por meio de oito parafusos (Figura 118). A tampa apresenta dois rasgos para a colocação de duas borrachas para diminuir a fricção durante o avanço e recuo da cremalheira e, apresenta oito furos passantes feitos através de uma furadora vertical para a passagem de oito parafusos para aperto da cremalheira. A tampa passa por um processo de fresagem para a abertura dos rasgos para alojar as borrachas.

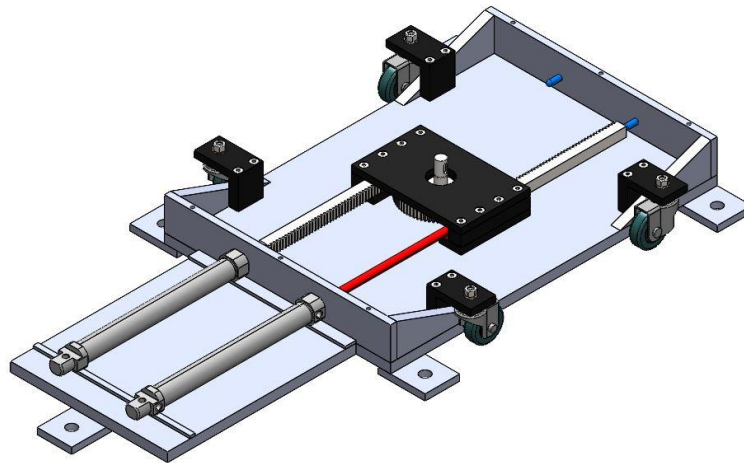


Figura 118 - Montagem da tampa para fixação da cremalheira.

De seguida, é montado o segundo rolamento na tampa e fixado através de um anel elástico ao veio, como se apresenta na Figura 119.

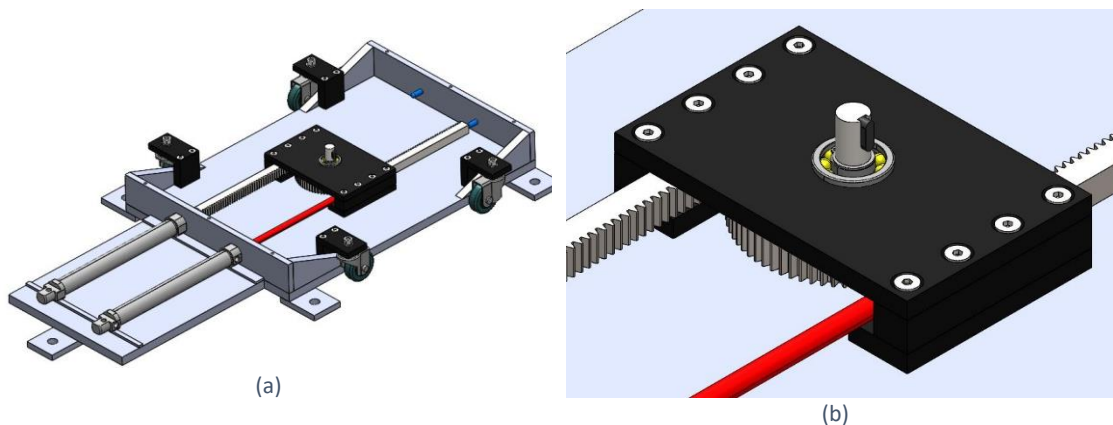


Figura 119 – Montagem do rolamento: (a) vista isométrica; (b) detalhe do encaixe do rolamento e anel elástico.

Na Figura 119 é também visível a colocação de uma chaveta no veio. Pretende-se com a chaveta transmitir a rotação do veio para uma patela, que irá transmitir essa rotação para a estrutura de paletização. Na Figura 120 é visível a patela de rotação e a sua montagem no sistema de rotação.

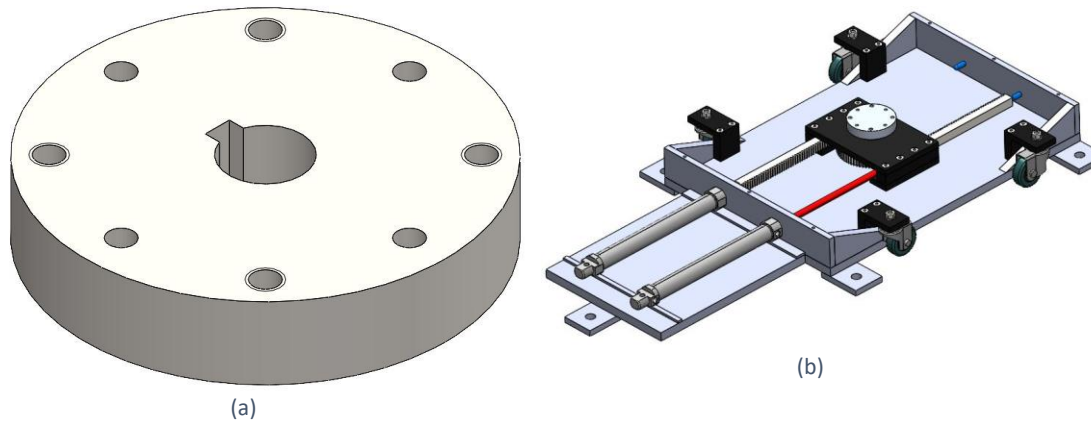


Figura 120 - Montagem da patela de rotação: (a) patela de rotação e (b) montagem da patela no sistema de rotação.

A patela de rotação é obtida por torneamento numa máquina CNC para melhor qualidade e precisão. Depois de obtida a patela sólida, esta passa por um processo de fresagem para a abertura de quatro furos para alojar os pinos cilíndricos e, ainda, a abertura de quatro furos roscados. Por fim, através de eletroerosão, obtém-se o rasgo central passante visto apresentar uma geométrica complexa. Este furo permite o encaixe à pressão do veio com a chaveta com o auxílio de uma prensa.

Nesta patela é apertada uma chapa que permite transmitir a rotação para a estrutura de paletização. A chapa de proteção do sistema de rotação é apertada depois da patela de rotação (Figura 121). Esta chapa é obtida por corte e de seguida por quinagem, apresentado seis furos passantes para fixação à base do sistema de rotação.

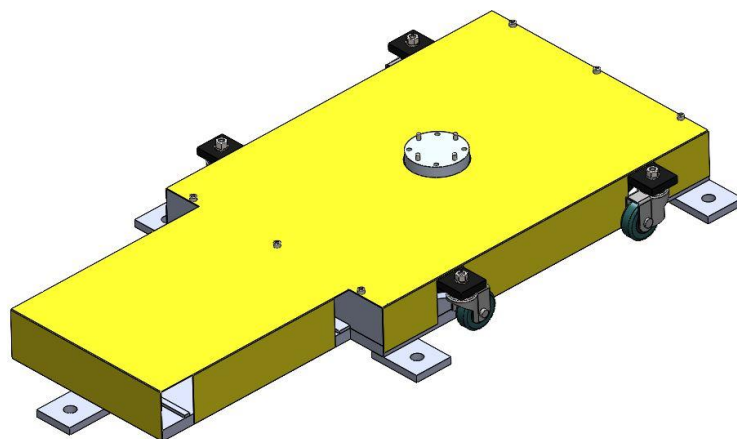


Figura 121 - Chapa de proteção.

Na Figura 122 é visível a chapa que aperta na patela de rotação e transmite a rotação da patela para a estrutura de paletização. Como esta chapa apresenta uma dimensão elevada e uma geométrica complexa, nomeadamente a forma circular, esta é obtida por

corde a laser. Por fim, é necessária a abertura de quatro furos passantes e oito furos roscados, que são feitos através de uma furadora vertical.

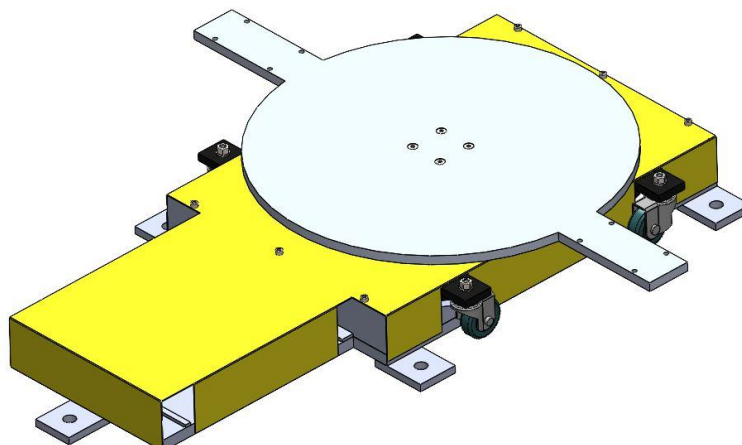


Figura 122 - Chapa de aperto na patela de rotação.

Finalmente, apresenta-se a solução desenvolvida para ligar o sistema de rotação à estrutura metálica para paletização dos painéis de porta (Figura 123). A montagem é feita de forma a encaixar no tubo quadrado da estrutura de paletização e, de seguida, é apertado na chapa.

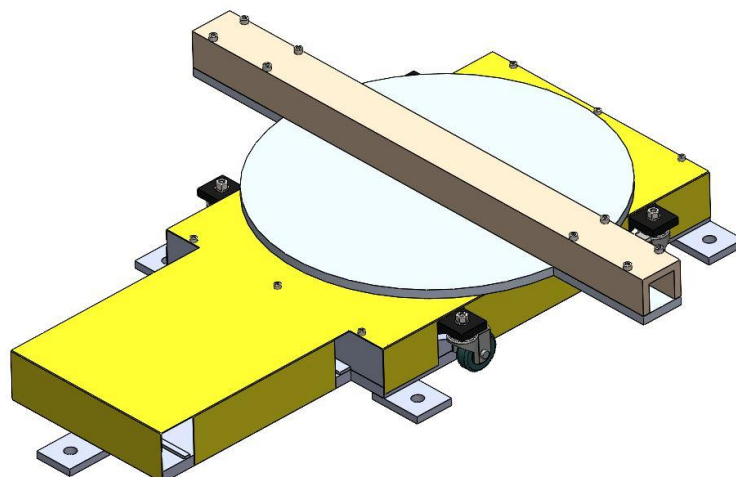


Figura 123 - Perfil para fixação do sistema de rotação à estrutura de paletização.

Como o tubo central da base da estrutura de paletização é de perfil quadrado com lado de 40 mm, é necessário obter um perfil em que o interior tenha a mesma dimensão. Outra limitação é a espessura nominal do perfil. A espessura deve ser no mínimo de 10 mm, para que seja possível a abertura de oito furos passantes de, pelo menos, 8 mm de diâmetro.

Assim, opta-se por adquirir uma perfil retangular oco de $140 \times 60 \times 10 \text{ mm}^3$ e, através do processo de corte a laser, transforma este perfil num perfil em U com dimensões

60×60×10 mm³. Após o corte a laser, o interior do perfil em U tem exatamente as mesmas dimensões do perfil quadrado de 40 mm da estrutura de paletização. Por fim, este perfil passa por um processo de fresagem para a abertura dos oito furos passantes.

– Suporte para robô colaborativo

O suporte do robô colaborativo é feito através de corte de tubo e chapa de aço, sendo as duas chapas unidas através do processo de soldadura ao tubo de secção quadrada, como é visível na Figura 124.

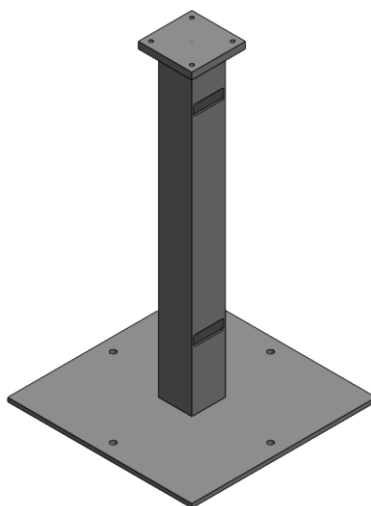


Figura 124 – Primeira fase da construção do suporte do robô colaborativo.

Antes do processo de ligação, o tubo e as chapas de aço são devidamente trabalhadas. Na chapa superior são abertos furos passantes com as devidas dimensões de aperto do robô colaborativo e na chapa inferior são feitos quatro furos passantes para possível aperto do suporte ao solo. Nos tubos de secção quadrada, através de fresagem, são abertos furos passantes para a passagem e proteção dos fios elétricos e tubos de ar comprimido.

Posto isto, são quinadas duas chapas e cortadas de seguida, para suportar o controlador do robô que, posteriormente, são soldadas no tubo de secção quadrada, como se vê na Figura 125. São produzidas, através de corte, quatro nervuras a 45° em chapa de aço para reforço do suporte, de modo a minimizar os esforços nele impostos.

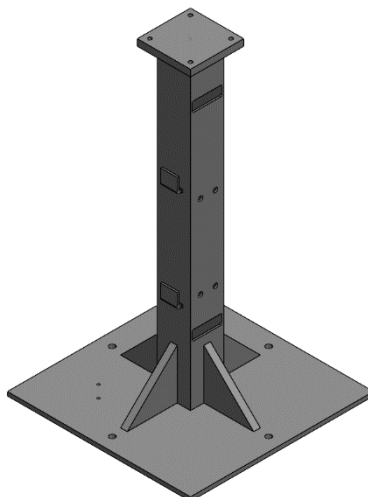


Figura 125 - Segunda fase da construção do suporte do robô colaborativo.

Por fim, são abertos oito furos roscados no tubo de secção quadrada para aperto do suporte do quadro elétrico e, na chapa inferior, são abertos dois furos roscados para aperto do suporte do sistema de segurança.

Posto isto, é necessário fabricar a chapa para aperto do quadro elétrico e do sistema pneumático. Esta chapa é obtida através de corte seguido da realização de furos roscados com o auxílio de uma furadora vertical (Figura 126).

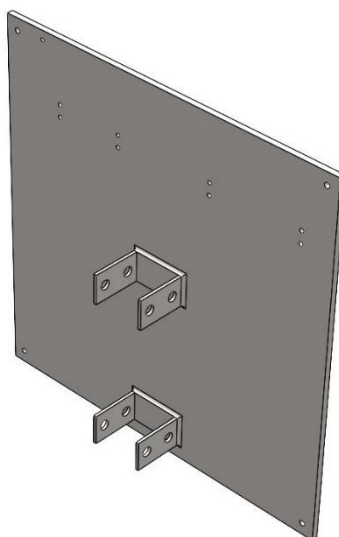


Figura 126 - Chapa para aperto quadro elétrico e sistema pneumático.

Este suporte do quadro é aparafusado no tubo de perfil quadrado do suporte do robô colaborativo. São ainda cortadas quatro chapas que apresentam dois furos passantes para o possível aparafusamento do suporte.

A proteção para o sistema de segurança é feita através do processo de soldadura de quatro chapas, devidamente trabalhadas. Na Figura 127 estão apresentados os passos a ter em consideração para a montagem da proteção.

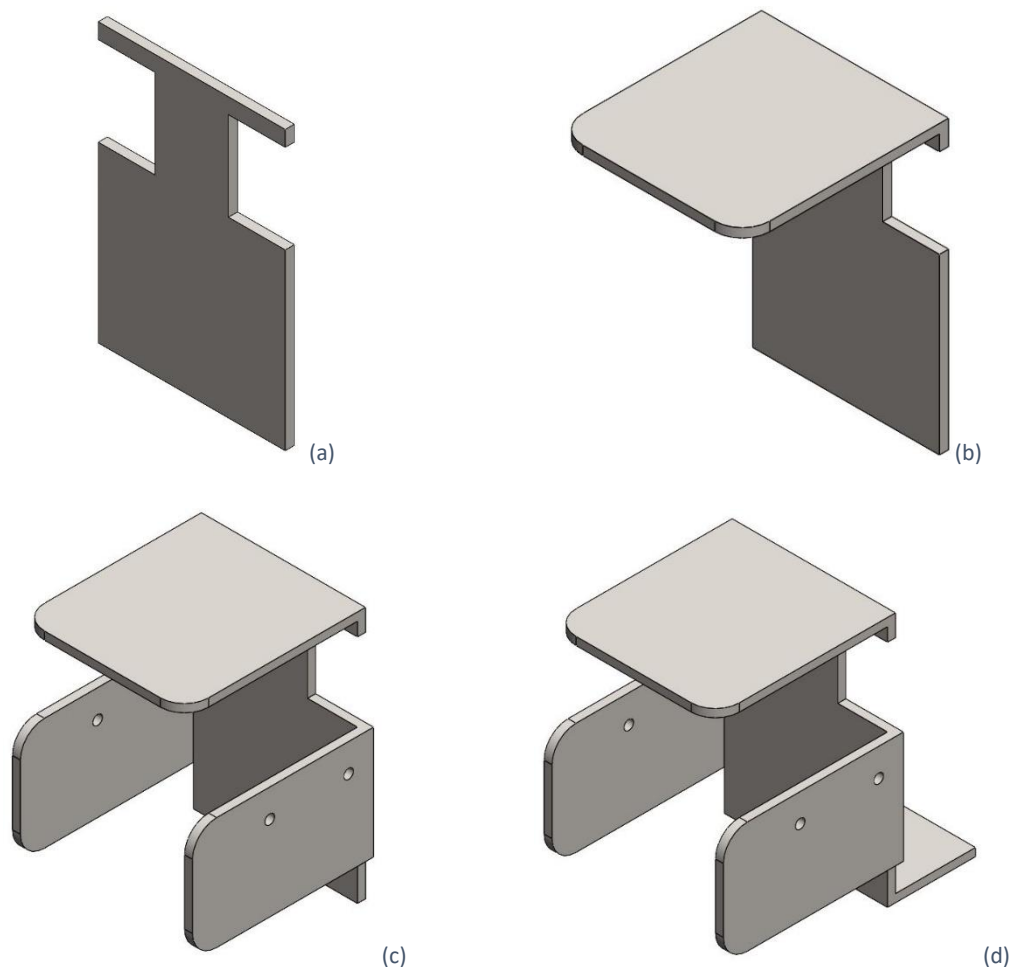


Figura 127 - Proteção do sistema de segurança: (a) fase 1; (b) fase 2; (c) fase 3 e (d) fase 4.

– Mão-presa do robô colaborativo

A mão-presa do robô é feita através de uma chapa em alumínio com 10 mm de espessura. O formato da mão-presa é obtido por corte a laser. Depois de obtida a mão-presa é necessário efetuar os furos roscados e os furos passantes para o aperto da mão-presa no robô, feitos a partir de uma furadora vertical (Figura 128).

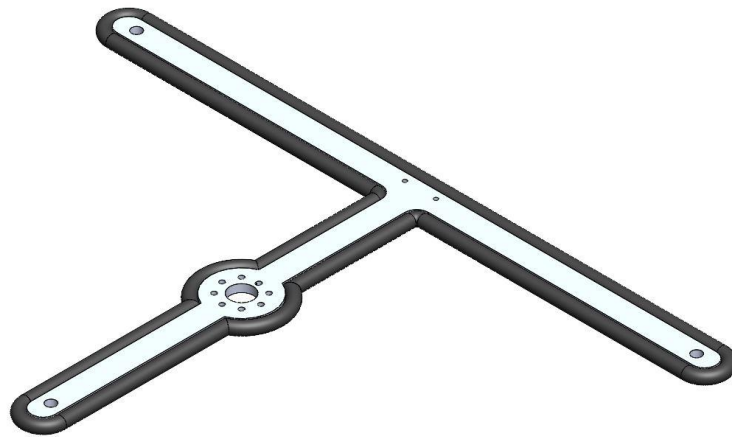


Figura 128 - Mão-presa do robô colaborativo.

Por fim, cola-se uma borracha em polietileno nas laterais da mão-presa para proteger os colaboradores em caso de embate.

3.7.8 Sistema de segurança

O sistema de segurança implementado neste processo foi aconselhado pela empresa Datalogic, produtor mundial de produtos de leitura, como leitores de código de barras, sensores de diferenciação de cor, e ainda, de sistemas de visão, como câmaras e barreiras de segurança.

Como já foi dito, a implementação deste processo será em raiz de fábrica, ou seja, fica em contato direto com os colaboradores e, acima de tudo, deve-se garantir sempre a segurança dos colaboradores. Assim, é imprescindível a aplicação de um sistema que garante a segurança de todos. A Figura 129 mostra o sistema de segurança da Datalogic implementado no processo de produção dos painéis de porta.



Figura 129 - Sistema de segurança implementado no processo (Datalogic, 2021).

O sistema de segurança implementado é designado por SLS-M5-E-1708-E, sendo que este monitoriza a zona à sua volta a 275° num raio máximo de 5,5 m podendo configurar até dez zonas de segurança. Este sistema é programado através de um computador com o *software* instalado da própria marca.

O dispositivo de segurança utilizado é considerado de “*master*”, isto é, este dispositivo é o que controla, é o principal dispositivo na monitorização da zona de segurança. Caso seja necessário outro dispositivo, opta-se por um “*slayer*” ou escravo, em que este interliga-se com o “*master*” e a programação é feita através do “*master*”.

Neste caso, o robô e a estrutura metálica para paletização estará muito perto da máquina de injeção, cerca de 500 mm, e não necessita de ser monitorizado como uma zona de segurança, sendo que este espaço existe para que os técnicos das máquinas de injeção possam alcançar o controlador da máquina. Sendo apenas necessário monitorizar a zona do corredor e atrás do suporte do robô, como se vê na Figura 130, só é exigido um dispositivo de segurança.

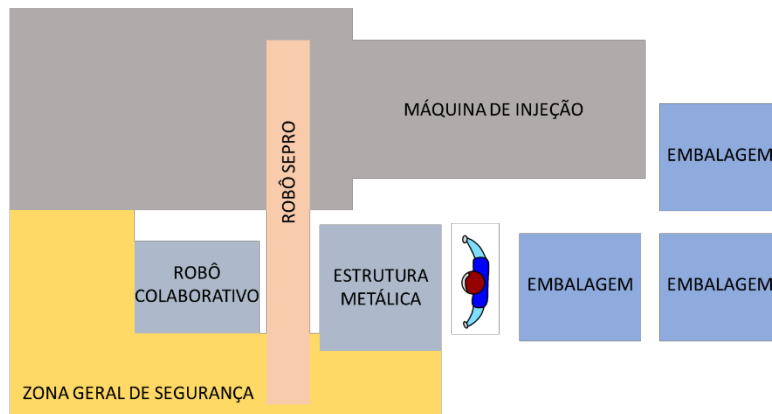


Figura 130 - Zona geral de segurança.

Como foi dito anteriormente, este dispositivo de segurança permite a monitorização de várias zonas de segurança, zonas de prevenção e zonas de perigo, ambas programáveis no *software*. A zona de prevenção é a zona mais afastada do dispositivo e, ao ser invadida, emite um alerta. A zona de perigo é a zona mais próxima do dispositivo, que ao ser invadida, emite um alerta e pára imediatamente o equipamento a que está ligado. Esta zona para atuar necessita primeiramente que a zona de prevenção seja invadida. A Figura 131 representa o *layout* do posto de trabalho com as zonas de segurança programadas.

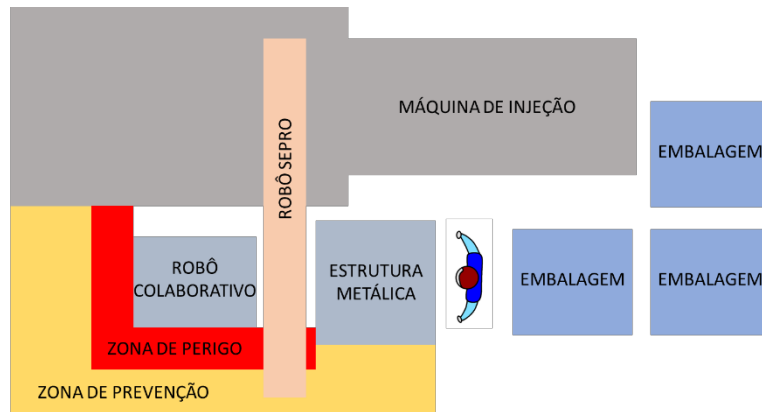


Figura 131 - Zonas de segurança programadas.

Na Figura 131 estão presentes as duas zonas programadas para o processo de produção dos painéis de porta. A zona de prevenção envolve toda a área a amarela e vermelha e, ao ser invadida, transmite ao robô colaborativo para abrandar os seus movimentos, reduzindo para metade a sua velocidade. Como para invadir a zona de perigo, a vermelho, é preciso invadir primeiro a zona de prevenção, então o robô já se encontra a metade da sua velocidade de movimentação. Assim, ao ser invadida a zona de perigo, é transmitido um sinal de paragem de emergência do robô colaborativo, parando imediatamente.




Desta forma, é garantida a segurança de todos os colaboradores pois, caso invadam as zonas, o robô muda de velocidade não causando grande impacto ou se o colaborador se aproximar demasiado da zona de trabalho do robô, este pára imediatamente.

3.7.9 Sistema pneumático

O sistema pneumático para este projeto é constituído por vários componentes, nomeadamente, bomba de vácuo com pressostato, sistema de limpeza do ar comprimido constituído por: filtro regulável, válvula *shut-off*, regulador de pressão, e por fim, uma electroválvula com bobine e, respetivos acessórios de montagem. Todos os componentes pneumáticos são fornecidos pela MetalWork, empresa no ramo da pneumática.

O sistema pneumático pode ser dividido em duas partes: a parte da produção e controlo de vácuo e a parte da limpeza do ar comprimido. A produção de vácuo diz respeito à bomba de vácuo e o seu controlo é feito a partir de uma electroválvula com bobine. Para ser possível a produção de vácuo é imprescindível a purificação do ar comprimido, assim antes de chegar à bomba de vácuo, o ar passa por um processo de limpeza do ar. O processo de limpeza do ar comprimido é constituído por: filtro regulável, válvula *shut-off* e regulador de pressão. Na Tabela 18 estão presentes os componentes da limpeza do ar comprimido, apresentados com uma ilustração e respetiva função.

Tabela 18 -Componentes da limpeza do ar comprimido.

Componente	Ilustração	Função
Filtro regulável		Permite controlar a velocidade e precisão do caudal de ar, depois do ar comprimido ser limpo pelo filtro.
Válvula <i>shut-off</i>		Permite cortar a alimentação de ar comprimido caso necessário ou em caso de emergência.
Regulador de pressão		Permite validar a pressão de ar existente no circuito eletronicamente, sendo possível a alteração da pressão de ar.

Estes três componentes podem ser ligados entre si o que facilita a montagem. A direção do fluxo do ar comprimido no circuito deve corresponder à direção indicada nos componentes. Tal como se pode ver nas ilustrações da Tabela 18, todos os componentes têm duas setas que indicam a direção que o ar comprimido deve fluir.

O ar comprimido passa primeiramente pela válvula *shut-off*, para que, em caso de emergência, a válvula atue logo no início do circuito. De seguida, o ar entra no filtro, inicia a limpeza do ar comprimido, pois este pode conter detritos quando sai do centro de criação de ar comprimido e controla o caudal de ar existente no circuito. Posto isto, o ar encontra-se limpo e em condições de ser criado vácuo, mas antes deve passar pelo regulador de pressão para validar eletronicamente o valor da pressão ou alterar caso necessário. A montagem destes componentes é feita na chapa metálica que está aparafusada no suporte do robô, como se pode ver na Figura 132.

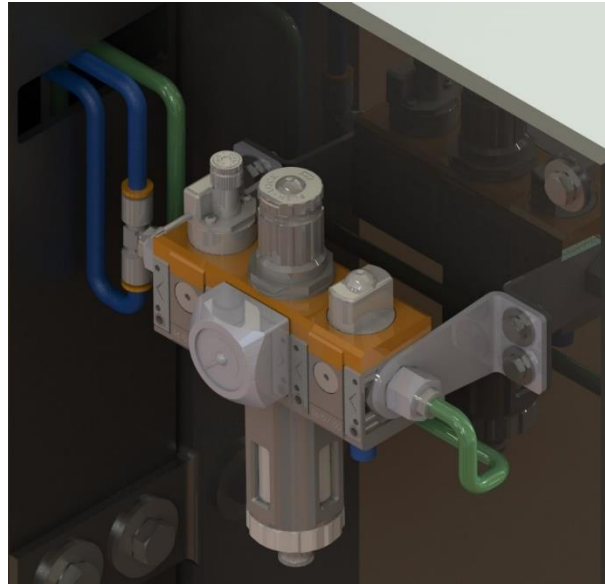


Figura 132 - Montagem dos componentes da limpeza do ar comprimido.

Como foi dito anteriormente, estes três componentes podem ser ligados facilmente. Os suportes para fixar estes componentes são *standard* da marca, sendo apenas necessária a correta furação da chapa do suporte do quadro. Na válvula *shut-off* é ligado o tubo de ar (cor verde) que vem diretamente do centro de criação de ar comprimido. O ar percorre desde a válvula *shut-off* até ao regulador de pressão, sendo que à saída do regulador é distribuído ar comprimido para dois canais. Um canal vai diretamente para o sistema de rotação, visto que é preciso constantemente ar comprimido nos cilindros pneumáticos de forma a garantir sempre a sua posição (avanço ou recuo), para que não exista uma rotação indesejada da estrutura metálica. O outro canal permite a passagem de ar para a produção e controlo de vácuo que fica ligado diretamente na electroválvula.

Relativamente à produção de vácuo, este processo diz respeito à bomba de vácuo e à electroválvula. Na Tabela 19 estão presentes os componentes da produção e controlo de vácuo, apresentados com uma ilustração e respetiva função.

Tabela 19 - Componentes da produção e controlo de vácuo.

Componente	Ilustração	Função
Bomba de vácuo com venturi		Permite a criação de vácuo, sendo que esta bomba não cria desperdícios de vácuo. O venturi silencia ruído provocado durante o funcionamento da bomba.

Pressostato



Utilizado para medição da pressão de vácuo existente no circuito.

Distribuidor de caudal



Permite a distribuição de caudal de ar comprimido, podendo ser acoplados vários acessórios, como electroválvulas de forma a controlar o caudal.

Electroválvula 3/2
Normalmente fechada com bobine



É imprescindível para o bom funcionamento de um sistema pneumático controlando a direção e pressão de ar eletronicamente.

A montagem destes componentes é feita a partir de dois suportes metálicos aparafusados na chapa metálica presente no suporte do robô colaborativo, como se pode ver na Figura 133. Estes suporte também são *standard* da marca.

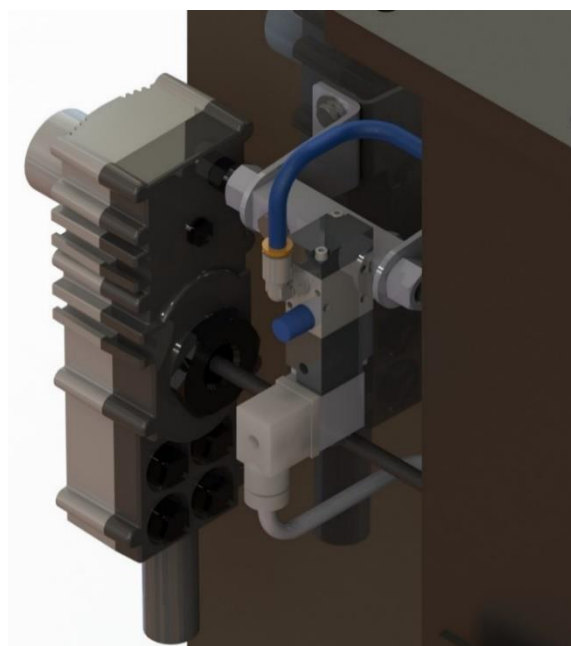


Figura 133 - Montagem da produção e controlo de vácuo.

Os componentes da produção e controlo de vácuo são ligados entre si através de um distribuidor de caudal e permite a passagem do ar comprimido. No distribuidor de caudal é acoplada a electroválvula que controla esse fluxo de caudal presente no distribuidor. Como foi dito anteriormente, o ar após sair do regulador de pressão entra diretamente na electroválvula de forma a ser diretamente controlado.

A electroválvula é de controlo direcional pois é necessário controlar o trajeto do fluxo de ar. O controlo de vácuo é pretendido para ligar e desligar a alimentação de vácuo na mão-presa do robô colaborativo, em que apenas são utilizados dois movimentos/posições. O número de vias utilizado é de três, sendo entrada, saída e escape com silenciador. Assim, é escolhida uma electroválvula 3/2 normalmente fechada.

Como se pode ver na Figura 133, depois da saída do ar da electroválvula, o ar flui no distribuidor e entra na bomba de vácuo. Na bomba de vácuo é feita a transformação de ar comprimido em vácuo, e de forma a silenciar este processo, é utilizado um venturi. Depois de transformado, o vácuo sai da bomba de vácuo diretamente para a mão-presa do robô colaborativo.

Resumidamente, o sistema pneumático neste processo é imprescindível pois é necessário a utilização de vácuo na mão-presa do robô colaborativo para pegar e largar os painéis de porta e, para alimentar os cilindros presentes no sistema de rotação.

3.7.10 Quadro elétrico

A eletricidade está presente em praticamente todos os aparelhos e sem ela é impossível o seu funcionamento. Na empresa todos os periféricos, máquinas e robôs trabalham com eletricidade e ar comprimido sendo as fontes de alimentação. Neste projeto, o robô trabalha com corrente elétrica e, para o seu correto funcionamento, precisa de receber sinais externos de sensores ou do seu próprio controlador. Isto para ser possível é necessário um circuito elétrico, uma componente elétrica.

O quadro elétrico serve para alojar e proteger todos os componentes elétricos indispensáveis para o funcionamento correto do processo. Como foi visto anteriormente, o quadro elétrico é fixado no suporte do robô estando o mais próximo possível do robô e seu controlador, evitando a passagem de fios elétricos pelo posto de trabalho. O quadro elétrico é feito em aço e pode ser fornecido pela empresa Rittal.

Neste processo produtivo existem vários sinais que são transmitidos entre o robô colaborativo e o robô SEPRO, que se encontra na máquina de injeção. De forma a transmitir esses sinais é utilizada uma ficha *harting* de dezasseis pinos.

As ligações desta ficha é *standard* para todos os periféricos e máquinas na empresa, com vista a facilitar a compreensão e montagem da mesma, sendo:

- Pino 1: Corrente;
- Pino 9: Massa;
- Pinos 2 ao 8: Inputs;
- Pinos 9 ao 16: Outputs;

Em todos os periféricos e máquinas a alimentação é feita a partir de uma ficha monofásica do tipo macho sendo a voltagem da corrente elétrica à chegada do posto de trabalho de 230V. Assim, à entrada do quadro elétrico é necessária uma ficha do tipo fêmea para alimentar o sistema elétrico. De seguida, é ligada ao diferencial de modo a proteger todo o circuito elétrico. Como serão utilizadas tomadas elétricas e um *power supply* é necessária a existência de disjuntores.

Os disjuntores permitem a proteção dos componentes em caso de curto-circuito ou sobrecarga, sendo que devem ser indicados para o valor de tensão do componente. No caso do *power supply*, que converte a tensão de 230V para 24V, como trabalha com tensões elevadas opta-se por um disjuntor de 16A. No caso das tomadas opta-se por um disjuntor de 6A.

Sendo um sistema automatizado, durante o processo de paletização utilizam-se diversos sinais de entrada transmitidos por sensores e sinais de saída transmitidos pelo controlador do robô colaborativo. De forma a controlar estes sinais, são necessários relés. Estes permitem controlar os sinais emitidos pelo controlador. Por fim são necessários bornes, optando por bornes de três níveis visto que, para apenas um borne é possível ligar sinal de corrente, neutro e sinal.

Como foi dito na secção 3.7.8, neste processo foi implementado um sistema de segurança que monitoriza a área de trabalho reduzindo ou parando o trabalho do robô colaborativo. De forma a garantir a paragem do robô colaborativo, optou-se por instalar um relé de segurança. Este relé ao receber o sinal do sistema de segurança em caso de invasão da zona de paragem, imediatamente corta a corrente elétrica do circuito parando o processo de paletização.

Os componentes necessários para o sistema elétrico encontram-se na Tabela 20 enunciando a sua função.

Tabela 20 - Componentes do sistema elétrico.

Componente	Ilustração	Função
Ficha <i>Harting</i> 16 pinos		Permite fazer a ligação entre o quadro elétrico e robô SEPRO presente na máquina de injeção.

Diferencial



Permite proteger o circuito elétrico no caso da existência de uma corrente elétrica superior ao valor nominal, cortando o circuito.

Disjuntor 6A e 16A



Protege os componentes em caso de curto-circuito, sobrecarga ou choques elétricos automaticamente.

Power Suply

Converter corrente elétrica de 230V para 24V.

Relé



Permitem comutar um par de contatos ligados a um circuito, isto é, ao ser emitido um sinal, o contato abre ou fecha de acordo com o sinal de entrada.

Borne



Permitem fazer a ligação entre dispositivos elétricos sendo ligados a partir de fios elétricos.

Relé de segurança



Corta a alimentação do sistema elétrico após receber sinal para tal.

Por fim, de modo a facilitar o encerramento do equipamento, é colocado um corta-corrente na porta do quadro elétrico, sendo que este é ligado diretamente ao diferencial.

3.8 Análise financeira do projeto

Nesta secção é feita uma análise da fiabilidade do projeto, analisando custos associados do fabrico e/ou compra dos componentes. Relativamente aos componentes fabricados, é necessário conhecer os custos de operação, sendo indicados na Tabela 21. De salientar que, estes valores, são apenas uma estimativa, bem como o orçamento total do projeto.

Tabela 21 - Custo estimado para cada tipo de operação.

Tipo de operação	Custo
Fresagem	20,00 €/h
Torneamento CNC	20,00 €/h
Eletroerosão	25,00 €/h
Corte a laser	25,00 €/h
Quinagem	1,00 €/operação
Trabalho de bancada	15,00 €/h

Na operação “Trabalho de bancada” são consideradas todas as operações feitas por um serralheiro especializado. As operações necessárias são: corte de chapa e perfis em aço e alumínio, processo de soldadura de componentes e abertura de furos passantes e furos roscados.

Com base nos valores da Tabela 21 e nos Anexos D e E determinou-se o custo de produção de cada componente.

Considerou-se o valor para um tubo em PTFE de 1 polegada, segundo (Plastic Corp, 2021), convertendo o seu valor para metros. Considerou-se o valor de uma borracha poliéster de 2€, visto não encontrar orçamento.

Relativamente ao custo dos componentes feitos em alumínio, para uma melhor estimativa do custo, recorreu-se à empresa Poly Lanema. Foram estimadas as dimensões de folha e placas necessárias para o projeto e, foi pedido um pedido de cotação à empresa.

O custo de cada componente está presente desde a Tabela 22 à Tabela 61.

Tabela 22 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0101.


Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/m]	8,19	Comprimento [m]	1,54
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte laser	0,05	25	1,25
Custo do componente [€]	12,62	Custo total [€]	13,87

Tabela 23 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0102.


Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/m]	8,19	Comprimento [m]	1,46
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte laser	0,05	25	1,25
Custo do componente [€]	11,96	Custo total [€]	13,21

Tabela 24 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0103.

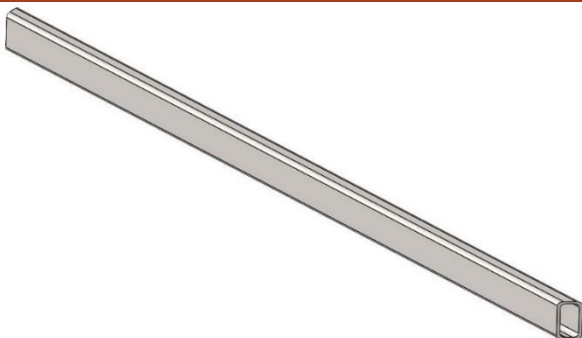
Componente			
	Material	Aço S235	Perfil Retangular 100x40x5 mm ³
Custo matéria-prima [€/m]	20,24	Comprimento [m]	1,69
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte laser	0,05	25	1,25
Custo do componente [€]	34,21	Custo total [€]	35,46

Tabela 25 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0104.

Componente			
	Material	Aço S235	Perfil Quadrado 40x4 mm ²
Custo matéria-prima [€/m]	8,19	Comprimento [m]	0,425
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte laser	0,05	25	1,25
Custo do componente [€]	3,49	Custo total [€]	4,74

Tabela 26 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0105.

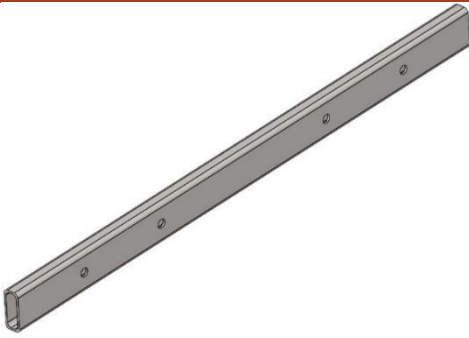
Componente			
	Material	Aço S235	Perfil Retangular 100x40x5 mm ³
Custo matéria-prima [€/m]	20,24	Comprimento [m]	1,46
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte laser	0,1	25	2,5
Furação	0,25	15	3,75
Custo do componente [€]	29,55	Custo total [€]	35,80

Tabela 27 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0106.

Componente			
	Material	Aço S235	Perfil Retangular 100x40x5 mm ³
Custo matéria-prima [€/m]	20,24	Comprimento [m]	1,54
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte laser	0,1	25	2,5
Furação	0,25	15	3,75
Custo do componente [€]	31,17	Custo total [€]	37,42

Tabela 28 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0107.

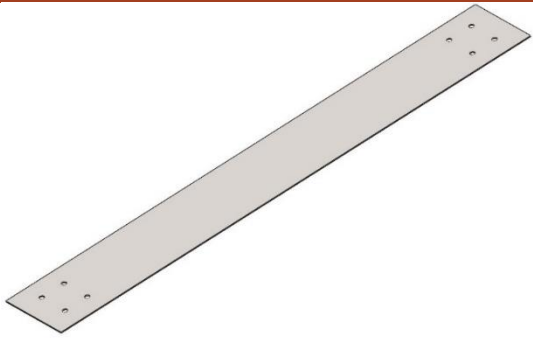
Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 3 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,8	Massa [kg]	7,0	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]		Custo operação [€]
Corte, furação	1	15		15
Custo do componente [€]	12,6	Custo total [€]	27,60	

Tabela 29 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0108.


Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Circular 21,3x3 mm ²
Custo matéria-prima [€/m]	2,35	Comprimento [m]	1,75	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]		Custo operação [€]
Corte laser	0,05	25		1,25
Custo do componente [€]	9,19	Custo total [€]	10,44	

Tabela 30 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0109.

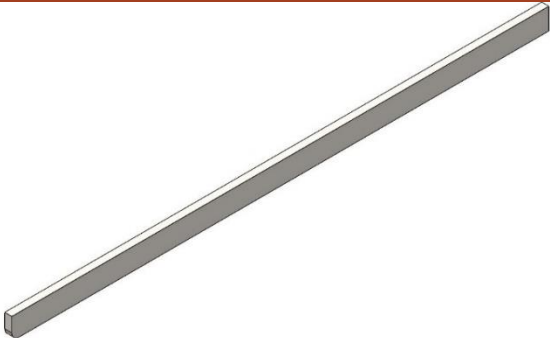
Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/kg]	1,81	Massa [kg]	1,75
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte laser	0,05	25	1,25
Custo do componente [€]	3,17	Custo total [€]	4,42

Tabela 31 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0110.


Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/kg]	1,81	Massa [kg]	3,59
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte laser	0,1	25	2,5
Custo do componente [€]	6,49	Custo total [€]	8,99

Tabela 32 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0111.

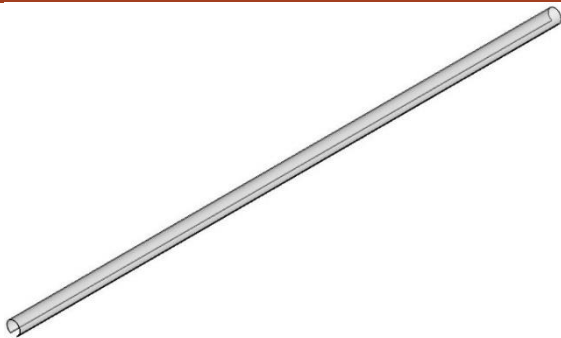
Componente			
	Material	PTFE	Perfil
Custo matéria-prima [€/m]	0,48	Comprimento [m]	0,865
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte	0,05	15	0,75
Custo do componente [€]	0,42	Custo total [€]	1,17

Tabela 33 - Custo do componente da estrutura de paletização: 0112.


Componente			
	Material	PTFE	Perfil
Custo matéria-prima [€/m]	0,48	Comprimento [m]	0,835
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte	0,05	15	0,75
Custo do componente [€]	0,40	Custo total [€]	1,15

Tabela 34 - Custo do componente do sistema de rotação: 0201.

Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 15 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,92	Massa [kg]	30,54	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte laser	0,1	25	2,5	
Fresagem	0,5	20	10	
Furação	1	15	15	
Custo do componente [€]	58,64	Custo total [€]	86,14	

Tabela 35 - Custo do componente do sistema de rotação: 0202.

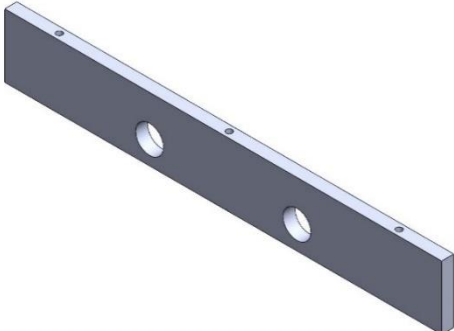
Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 10 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,81	Massa [kg]	1,41	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte laser	0,1	25	2,5	
Furação	0,1	15	1,5	
Custo do componente [€]	2,55	Custo total [€]	6,55	

Tabela 36 - Custo do componente do sistema de rotação: 0203.

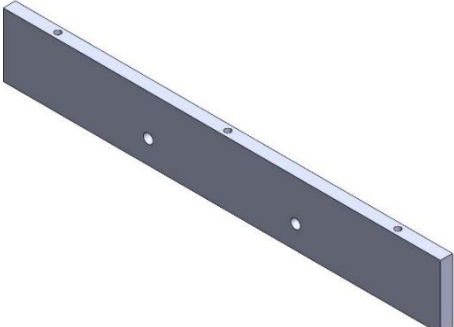
Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 10 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,81	Massa [kg]	1,46	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte laser	0,1	25	2,5	
Furação	0,1	15	1,5	
Custo do componente [€]	2,64	Custo total [€]	6,64	

Tabela 37 - Custo do componente do sistema de rotação: 0204.

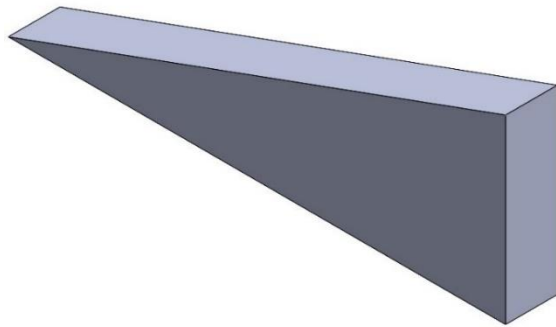
Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 15 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,92	Massa [kg]	0,44	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte	0,1	15	1,5	
Custo do componente [€]	0,84	Custo total [€]	2,34	

Tabela 38 - Custo do componente do sistema de rotação: 0205.

Componente			
Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 4 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,8	Massa [kg]	0,13
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte	0,1	15	1,5
Custo do componente [€]	0,23	Custo total [€]	1,73

Tabela 39 - Custo do componente do sistema de rotação: 0206.

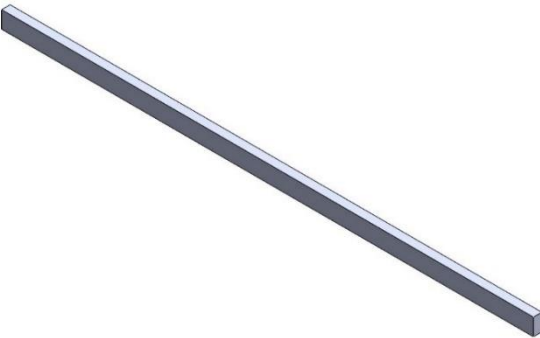
Componente			
Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 4 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,8	Massa [kg]	0,06
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte	0,1	15	1,5
Custo do componente [€]	0,11	Custo total [€]	1,61

Tabela 40 - Custo do componente do sistema de rotação: 0207.

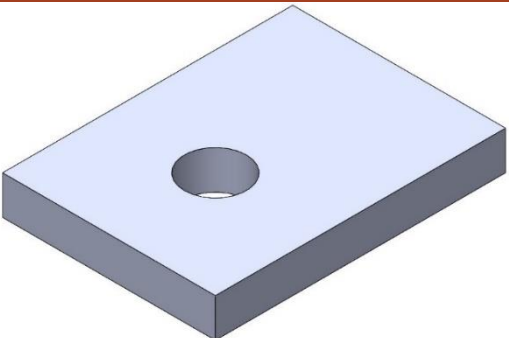
Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 12 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,82	Massa [kg]	0,37	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte, furação	0,15	15	2,25	
Custo do componente [€]	0,68	Custo total [€]	2,93	

Tabela 41 - Custo do componente do sistema de rotação: 0208.


Componente				
	Material	Aluminio	Perfil	Chapa de 10 mm
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte laser	0,1	25	2,5	
Fresagem	0,25	20	5	
Furação	0,25	15	3,75	
Custo do componente [€]	7,31	Custo total [€]	18,56	

Tabela 42 - Custo do componente do sistema de rotação: 0209.

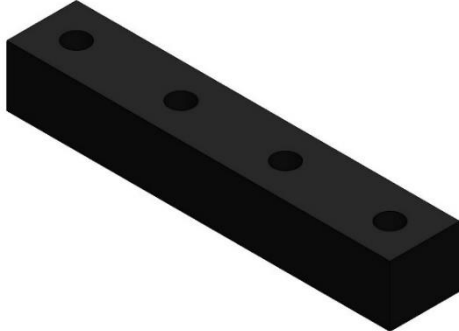
Componente				
	Material	Aluminio	Perfil	Chapa de 20 mm
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte laser	0,1	25	2,5	
Furação	0,25	15	3,75	
Custo do componente [€]	6,60	Custo total [€]	12,85	

Tabela 43 - Custo do componente do sistema de rotação: 0210.


Componente				
	Material	Aluminio	Perfil	Chapa de 10 mm
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte laser	0,1	25	2,5	
Fresagem	0,25	20	5	
Furação	0,25	15	3,75	
Custo do componente [€]	14,62	Custo total [€]	25,87	

Tabela 44 - Custo do componente do sistema de rotação: 0211.

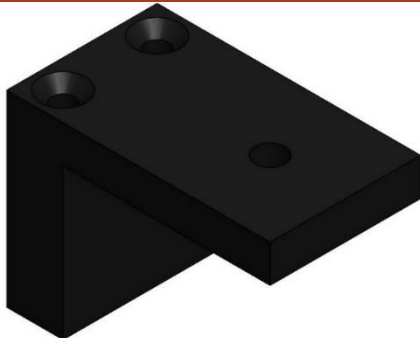
Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/kg]	1,015	Massa [kg]	0,5
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte, furação	1	15	15
Custo do componente [€]	0,51	Custo total [€]	15,51

Tabela 45 - Custo do componente do sistema de rotação: 0212.

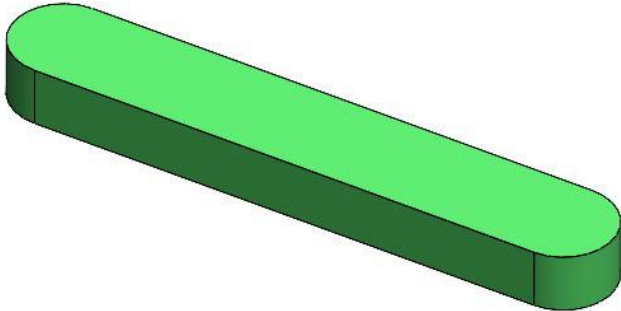
Componente			
	Material	Borracha Poliester	Perfil
Custo matéria-prima [€]	2,0	Massa [g]	13,0
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte	0,1	15	1,5
Custo do componente [€]	2,0	Custo total [€]	3,5

Tabela 46 - Custo do componente do sistema de rotação: 0213.

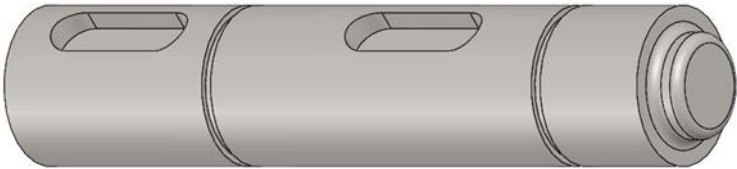
Componente			
Material	Aço 18MnCr5	Perfil	Tubo de 18 mm
Custo matéria-prima [€]	23,49	Comprimento [m]	0,075
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Torneamento CNC	1,5	20	30
Fresagem	0,5	20	10
Custo do componente [€]	23,49	Custo total [€]	63,49

Tabela 47 - Custo do componente do sistema de rotação: 0214.

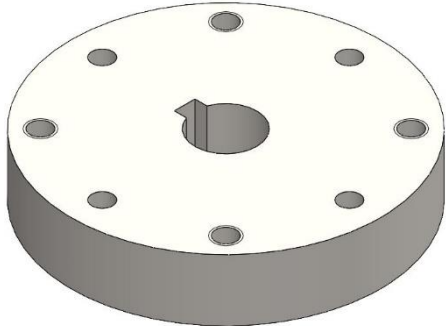
Componente			
Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 15 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,92	Massa [kg]	0,48
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Torneamento CNC	1	20	20
Furação	0,5	15	7,5
Eletroerosão	0,5	25	12,5
Custo do componente [€]	0,92	Custo total [€]	40,92

Tabela 48 - Custo do componente do sistema de rotação: 0215.

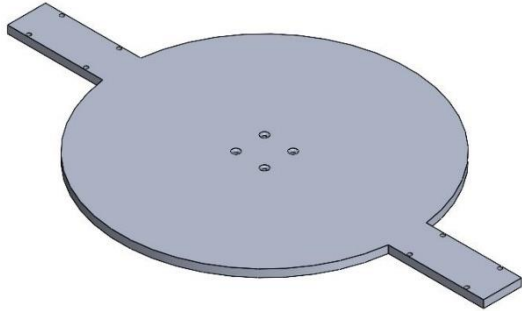
Componente				
	Material	Aluminio	Perfil	Chapa de 12 mm
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte laser	0,75	25	18,75	
Furação	1	15	15	
Custo do componente [€]	83,49	Custo total [€]	117,24	

Tabela 49 - Custo do componente do sistema de rotação: 0216.

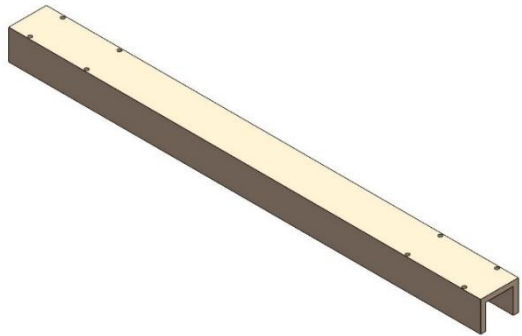
Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Retangular oco de 140×60×10 mm ³
Custo matéria-prima [€/m]	3,22	Comprimento [m]	0,75	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte laser	0,25	25	6,25	
Furação	0,5	15	7,5	
Custo do componente [€]	2,41	Custo total [€]	16,16	

Tabela 50 - Custo do componente do sistema de rotação: 0217.

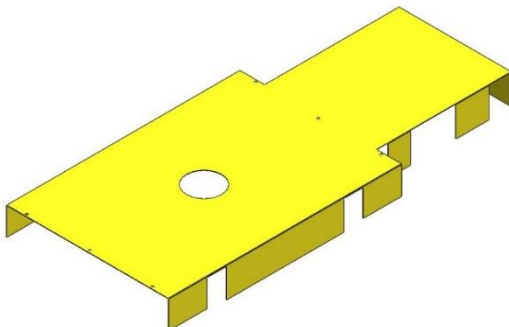
Componente				
	Material	Alumínio	Perfil	Chapa de 1,5 mm
Operações	Tempo de operação [h] / Qtd. operações	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte laser	0,25	25	6,25	
Quinagem	5	5	5	
Furação	0,25	15	3,75	
Custo do componente [€]	57,33	Custo total [€]	72,33	

Tabela 51 - Custo do componente do suporte do robô: 0301.

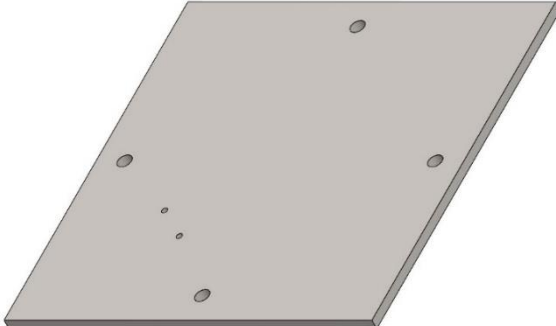
Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 12 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,82	Massa [kg]	18,86	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte, furação	1	15	15	
Custo do componente [€]	34,32	Custo total [€]	49,32	

Tabela 52 - Custo do componente do suporte do robô: 0302.

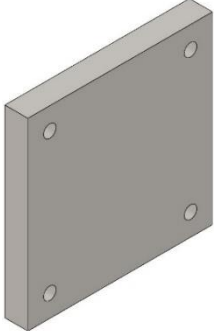
Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 20 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,93	Massa [kg]	3,93	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte, furação	0,25	15	3,75	
Custo do componente [€]	7,59	Custo total [€]	11,34	

Tabela 53 - Custo do componente do suporte do robô: 0303.

Componente				
	Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 20 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,93	Massa [kg]	0,78	
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]	
Corte	0,1	15	1,5	
Custo do componente [€]	1,50	Custo total [€]	3,00	

Tabela 54 - Custo do componente do suporte do robô: 0304.

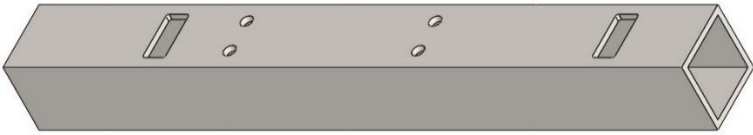
Componente			
Material	Aço S235	Perfil	Quadrado 80×80×8 mm ³
Custo matéria-prima [€/m]	37,89	Comprimento [m]	0,9
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Furação	1	15	15
Fresagem	0,5	20	10
Custo do componente [€]	34,11	Custo total [€]	59,11

Tabela 55 - Custo do componente do suporte do robô: 0305.

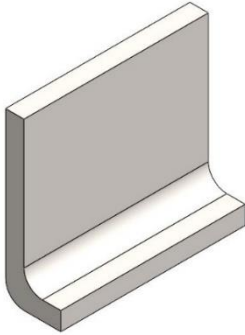
Componente			
Material	Aço S235	Perfil	Chapa de 5 mm
Custo matéria-prima [€/kg]	1,8	Massa [kg]	0,11
Operações	Tempo de operação [h] / Qtd. operações	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte	0,25	15	3,75
Quinagem	1	1	1
Custo do componente [€]	0,2	Custo total [€]	4,95

Tabela 56 - Custo do componente do suporte do robô: 0306.

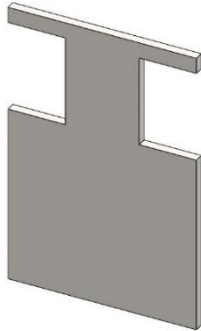
Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/kg]	1,8	Massa [kg]	0,48
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte	0,25	15	3,75
Custo do componente [€]	0,87	Custo total [€]	4,62

Tabela 57 - Custo do componente do suporte do robô: 0307.

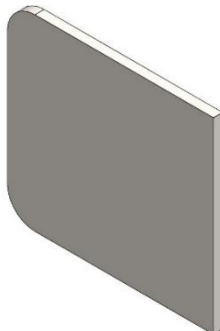
Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/kg]	1,8	Massa [kg]	0,44
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte	0,25	15	3,75
Custo do componente [€]	0,8	Custo total [€]	4,55

Tabela 58 - Custo do componente do suporte do robô: 0308.

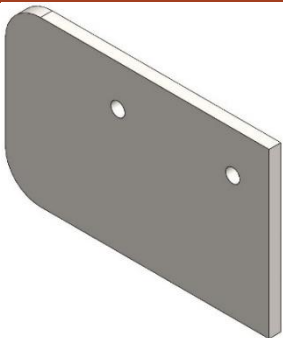
Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/kg]	1,8	Massa [kg]	0,3
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte, furação	0,25	15	3,75
Custo do componente [€]	0,54	Custo total [€]	4,29

Tabela 59 - Custo do componente do suporte do robô: 0309.

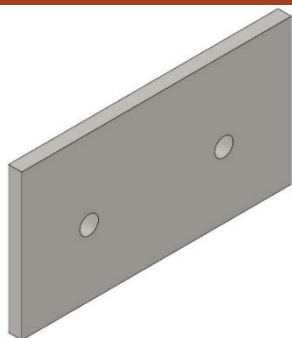
Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/kg]	1,8	Massa [kg]	0,21
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte, furação	0,25	15	3,75
Custo do componente [€]	0,38	Custo total [€]	4,13

Tabela 60 - Custo do componente do suporte do robô: 0310.

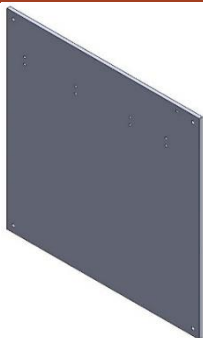
Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/kg]	1,81	Massa [kg]	28,04
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte, furação	1	15	15
Custo do componente [€]	50,75	Custo total [€]	75,75

Tabela 61 - Custo do componente do suporte do robô: 0311.

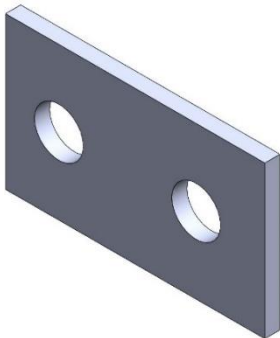
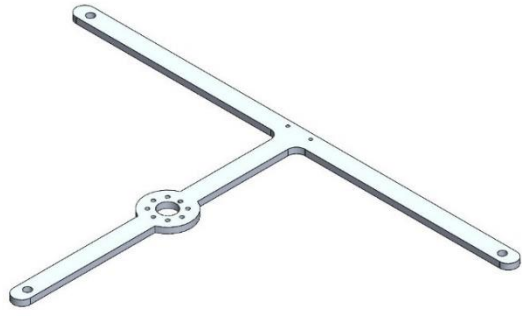
Componente			
	Material	Aço S235	Perfil
Custo matéria-prima [€/kg]	1,8	Massa [kg]	0,15
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte, furação	0,25	15	3,75
Custo do componente [€]	0,27	Custo total [€]	4,02

Tabela 62 - Custo da mão-presa do robô colaborativo: 0401

Componente			
Material	Aluminio AW5083	Perfil	Chapa de 10 mm
Operações	Tempo de operação [h]	Custo [€/h] / [€/operação]	Custo operação [€]
Corte laser	1	25	25
Furação	1	15	15
Custo do componente [€]	58,46	Custo total [€]	98,46

Relativamente ao custo do material para o fabrico dos componentes 0108 e 0211 foi pedido um orçamento à empresa Ferpinta. Através de via e-mail foi indicado o orçamento para os seguintes perfis:

- Tubo oco circular 21,3×3 mm² tem um custo de 2,35 €/m;
- Perfil em L 120×120×15 mm³ tem um custo de 1,015 €/kg.

Também através de via e-mail foi pedido um orçamento à empresa Aços Ramada para um veio de 18 mm de diâmetro, em aço 18 MnCr 5, com um comprimento de 75 mm, no qual o custo é de 23,49€.

No Anexo F está presente o orçamento efetuado pela Poly Lanema do material necessário para o projeto. De salientar que, o material foi pedido para o projeto total visto que, este sistema é implementado em duas máquinas de injeção. Assim, para saber o custo de cada peça, é necessário conhecer o tamanho de cada uma e dividir o preço pela quantidade necessária de material. Posto isto, foi considerado:

- Para uma folha de 1,5 mm (Componente 0217): Custo total de 57,33€;
- Para uma placa de 10 mm (Componente 0210): Metade do custo, cerca de 14,62€;
- Para uma placa de 10 mm (Componente 0208): Quarto do custo, cerca de 7,31€;
- Para uma placa de 10 mm (Componente 0401): Dobro do custo, cerca de 58,46€;
- Para uma placa de 12 mm (Componente 0215): Custo total de 83,49€;
- Para uma placa de 20 mm (Componente 0209): Custo total de 6,60

No Anexo G estão presentes os respectivos desenhos técnicos de cada componente, assim como conjuntos de soldadura e montagem. Posto isto, os componentes do projeto que necessitam de ser fabricados estão devidamente orçamentados. Na Tabela 63 estão orçamentadas todas as peças fabricadas.

Tabela 63 - Orçamento de todas as peças fabricadas.

Componente	Qtd. [uni.]	Custo [€]	Componente	Qtd. [uni.]	Custo [€]
0101	8	55,48	0210	2	51,74
0102	2	26,42	0211	8	124,08
0103	4	141,84	0212	8	28
0104	8	37,92	0213	2	126,98
0105	2	71,60	0214	2	81,84
0106	2	74,84	0215	2	234,48
0107	4	110,40	0216	2	32,32
0108	16	167,04	0217	2	144,66
0109	16	70,72	0301	2	98,64
0110	8	71,92	0302	2	22,68
0111	16	18,72	0303	8	24
0112	16	18,40	0304	2	118,22
0201	2	172,28	0305	4	19,8
0202	2	13,1	0306	2	9,24
0203	2	13,28	0307	2	9,1
0204	8	18,72	0308	4	17,16
0205	2	3,46	0309	2	8,26
0206	2	3,22	0310	2	151,5
0207	10	29,30	0311	4	16,08
0208	4	74,24	0401	2	186,92
0209	4	51,40			
				Total [€]	2.760,00

Os componentes normalizados e que necessitam de ser comprados às empresas estão orçamentados na Tabela 64, como por exemplo, o robô colaborativo, tubos de ar, electroválvulas, sensores, etc. De salientar, que o preço atribuído de alguns produtos foi tendo em conta o seu valor no mercado e outros componentes foram ditos pela empresa, tratando-se de apenas uma estimativa. O valor para os parafusos, anilhas, porcas e pinos, como se trata de material consumível, foi considerado o valor na compra de 100 unidades de cada parafuso, segundo (Fabory, 2021). O valor para o pinhão e cremalheira é dado, segundo (Norelem, 2021). Todos os produtos pneumáticos e elétricos foram orçamentados segundo (CNC, 2021) (TME, 2021) (Norelem, 2021).

Tabela 64 - Orçamento para todos os componentes de compra.

Designação	Qtd.	Custo total [€]
Robô colaborativo Kassow	2	60.000,00
Sistema de vigilância Datalogic SLS-M5-E-1708-E	2	9.159,98
Cremalheira com REF.: 22420-015170X500	4	100,28
Engrenagem com REF.: 22400-0215170070	2	79,36
Syntesi-SY1 Filter Regulator FR SY 1/4" 20 012 RA	2	162,26
Syntesi-SY1 Pressure Switch NO/NC 2m cable	2	140,12
Syntesi-SY1 V3V ELPN SHUT-OFF Valve 3/2	2	191,94
Bomba de vácuo c/ electroválvula AR REF. CVSKN1-S-220-AQ	2	1.437,50
Interruptor de pressão ISE30A-01-F-G	2	228,00
Coil Connector with LED 24V	2	15,00
Coil 22 230VAC 50/60hz 3.5VA	2	15,20
MW Sound damper SE-1/4	2	5,60
Monostable valve 3/2 1/4"	2	119,98
10 Way Pneumatic Distributor 2x1/2"+6x1/4"	2	49,98
PU-Polyeth. AirHose Blue Ø8x5,5	5 m	9,00
PU-Polyeth. AirHose Blue Ø6x4	5 m	7,00
PU-Polyeth. AirHose Blue Ø4x2.5	5 m	5,00

KIT coletor de três posições CSA-18-03	2	40,24
Solenoid valve VUVG-L14-P53E-T-G18-1P3	2	210,94
Sensor IFM Proximity Switch Mini IL5022	8	516,72
Restantes acessórios pneumáticos (estimativa)	-	300,00
Caixa básica AX em chapa de aço REF.: 1060.000	2	125,35
Acti9 iC40N-disjuntor - 1P+N - 16A - Curva C - 6000A/10kA	4	118,64
Interruptor diferencial 2P - 40A - 300mA - AC	2	151,08
Fonte de alimentação WEIDMÜLLER REF.: 146980000	2	110,11
Relé de interface WEIDMÜLLER REF.: 1122770000	54	419,04
Bourne de três níveis: Phoenix PT 3210509	80	303,20
GUARD MASTER 440R-EM4R2D	2	430,50
Ficha harting macho 09200162612	6	111,42
Ficha harting fêmea	6	111,42
Caixa para Ficha Harting 16 Pinos	6	218,82
Ficha schuko macho 250VAC 16A preta	2	3,64
Tomada para placa de distribuição A9A15310	4	29,04
LED Buzzer EM Contin. tone 24VDC	2	230,32
Rolo de fio unifilar	50 m	58,94
Restantes acessórios elétricos (estimativa)	-	400,00
WHEEL CKMA-PG 50S	8	15,52
4" Poly Hi-Tech Swivel Caster with Brake	8	316,16
Rolamento SKF 7202 BEP	4	81,36
Anel elástico DIN 471 - 15	4	0,68
Parafusos ISO 4017 (M5x16, M6x12, M6x16, M8x16 e M12x25), ISO 4762 (M5x10 e M6x65) e ISO 10642 (M6x25, M6x45 e M6x60)	-	69,10
Porcas ISO 7417 (M8 e M12)	-	12,20

Anilhas ISO 7093 (M5, M6, M8 e M12)	-	31,90
Pino cilíndrico ISO 8734 – 5x16-A	-	7,40
Ancoragem perno - ThruMaxx Aço Zincado 16X125	-	149,64
	TOTAL [€]	76.069,26

Tendo em consideração o tempo e custo de mão-de-obra para a montagem do conjunto da estrutura para paletização, do sistema de rotação e do suporte do robô, isto é, processo de soldadura e aparafusamento, na Tabela 65 está presente o orçamento relativamente a mão-de-obra necessária. O valor de mão-de-obra é igual ao custo da operação trabalho de bancada, sendo de 15 €/h.

Tabela 65 -Orçamento para a montagem da estrutura de paletização, sistema de rotação e suporte do robô.

	Mão-de-obra [h]	Custo [€]
Estrutura de paletização	12	60
Sistema de rotação	12	60
Suporte do robô	6	30
Montagem do processo no local de trabalho	16	240
	Total [€]	390

Na “Montagem do processo no local” estão consideradas todas as tarefas necessárias para colocar o processo em condições de trabalho, isto é, para:

- Estrutura de paletização: deslocação da estrutura para o posto de trabalho;
- Sistema de rotação: montagem das peças pneumáticas (electroválvula e cilindros) e elétricas (sensores); ligação do sistema ao quadro elétrico;
- Suporte do robô: deslocação do suporte para o posto de trabalho; montagem dos componentes pneumáticos e quadro elétrico; ligação ao robô SEPRO;
- Robô colaborativo: montagem do robô no suporte do robô;

Assim, o custo total do projeto é dado pela soma do orçamento de fabricação dos componentes, do orçamento dos componentes de compra e da mão-de-obra necessária para a montagem dos componentes (Tabela 66).

Tabela 66 - Orçamento final.

Orçamento	Custo [€]
Fabricação componentes	2.760,00
Compra de peças	76.069,26
Mão-de-obra	390,00
Total [€]	79.219,26

Com este novo processo produtivo é possível retirar um colaborador por turno de trabalho, sendo que o processo de produção de painéis trabalha durante 24h dividido em três turnos de trabalho, portanto retira-se três colaboradores. Assim, pode-se estimar quanto é que se irá poupar por mês e por ano ao reduzir mão-de-obra humana.

Tendo em conta o procedimento descrito em (Marques, 2020), na Tabela 67 está presente uma estimativa de quanto custa à empresa um colaborador. De salientar que o ordenado base é de 750€ e foi tido em consideração os subsídios de férias e de Natal.

Tabela 67 – Estimativa do gasto com um colaborador à empresa.

Colaborador	Custo por mês [€]	Custo por ano [€]
Ordenado base	875,00	10.500,00
Encargos sobre remunerações (23,75%)	207,81	2.493,75
Subsídio de alimentação (6,5€/dia) sendo 22 dias uteis	143,00	1.716,00
Seguro de acidentes de trabalho (1%)	8,75	105,00
Custo total à empresa por ano por colaborador [€]		14.814,75
Número de colaboradores [uni.]		3
Custo total à empresa por ano [€]		44.444,25

Conclui-se que, com a remoção de três colaboradores no novo processo produtivo, a empresa poupa cerca de 44.444,25€ por ano. Assim, é possível calcular o número de anos necessários para reaver o investimento feito.

$$N^{\circ} \text{ anos} = \frac{\text{Total investido}}{\text{Total ganho}} = \frac{79.219,26}{44.444,25} = 1,78 \approx 1 \text{ ano e } 10 \text{ meses}$$

Assim conclui-se que este investimento é sem dúvida compensatório, visto que no espaço de um ano e dez meses, todo o investimento é recuperado. Este período de tempo é muito reduzido sendo um bom investimento.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

As empresas industriais cada vez mais pretendem aumentar a sua produtividade, através da redução dos tempos de ciclo e dos períodos de paragem de produção. Este aumento de produtividade aumenta a capacidade de resposta para com os clientes e reduz custos associados de produção.

Assim, o principal objetivo deste trabalho recai sobre a melhoria através da automatização/robotização do processo produtivo, pretendendo um aumento da produtividade em partes por colaborador, uma redução da mão-de-obra humana e, acima de tudo, que o projeto seja fiável a nível financeiro.

Inicialmente, foi estudado o processo produtivo anterior, concluindo-se que o processo era demasiado lento no ponto de vista do colaborador, sendo que o colaborador a maior parte do tempo de produção encontrava-se parado. De seguida, foram analisadas as várias soluções ao problema e foram realizados esboços dos diferentes mecanismos ou estruturas. Depois de uma análise dos vários esboços, foi realizado o esboço final para cada estrutura ou mecanismo. Foi também feita uma análise de MEF para destacar os pontos críticos da estrutura metálica para paletização dos painéis de porta e para o suporte do robô colaborativo. Posto isto, foram escolhidos os materiais para fabrico e respetivos processos de fabrico para cada estrutura. Foi abordado de forma superficial o sistema pneumático e o sistema elétrico, assim como o sistema de segurança do robô colaborativo. Por fim, foi realizada uma análise financeira do projeto com o intuito de verificar se o projeto é fiável, no que toca a custos de produção e redução de mão-de-obra humana.

A análise ao cumprimento dos objetivos apresentados inicialmente encontra-se na Tabela 68.

Tabela 68 - Análise do cumprimento dos objetivos inicialmente propostos.

Objetivo	Ações tomadas	Avaliação
Otimização através da automatização/robotização	Implementação de um robô colaborativo na paletização dos painéis de porta. Utilização de um sistema de rotação em que o controlo é feito através a automação.	Objetivo cumprido
Aumento da produtividade em partes por colaborador	Neste processo o colaborador passa a trabalhar em duas máquinas de injeção, o que não acontecia no processo anterior, passando para o dobro da produtividade em partes por colaborador.	Objetivo cumprido
Redução de mão-de-obra humana	A implementação deste sistema, robô e estrutura metálica, foi possível diminuir um colaborador por turno de trabalho, dando um total de três colaboradores num dia, resultando em menos três salários.	Objetivo cumprido
Fiabilidade do projeto	No espaço de um ano e dez meses todo o investimento é recuperado sendo bastante apelativo e compensatório.	Objetivo cumprido

No anterior processo produtivo dos painéis de porta, depois de uma análise de tempos de ciclo do colaborador, concluiu-se que o colaborador metade do tempo está parado à espera de peça. Este tempo de espera resulta numa produtividade do colaborador de 50%.

Com este novo processo produtivo foi possível aumentar o dobro da produtividade em partes por colaborador, passando para 100%. Esta produtividade significa que o colaborador está sempre a trabalhar visto que, neste processo, o colaborador está responsável por duas máquinas de injeção e, não apenas uma como no anterior processo.

Relativamente à fiabilidade do projeto, este é bastante agradável a nível financeiro visto que, em apenas um ano e dez meses todo o investimento é recuperado. Como o retorno do investimento é garantido num curto espaço de tempo, este projeto é apelativo a ser aplicado noutros processos produtivos existentes na empresa.

Analisando o trabalho realizado, conclui-se que este foi desenvolvido com sucesso. Os objetivos propostos pela empresa foram concretizados, e instalou-se no Grupo Simoldes um novo conceito de robotização, sendo o primeiro processo produtivo a utilizar robôs colaborativos. Assim, a empresa aumentará os seus lucros devido à redução de mão-de-obra humana, mantendo ou possivelmente aumentando a produtividade.

Para o mestrando este estágio foi muito positivo, pois serviu para aumentar o seu conhecimento técnico sobre várias áreas, como por exemplo eletricidade e pneumática, e contribuiu para o crescimento pessoal, sendo desenvolvidos vários aspetos, tais como: análise crítica; criatividade e capacidade de resolução de problemas; trabalho em equipa; e, capacidade de adaptação a diversas áreas.

4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Após a realização da presente dissertação, verifica-se que ainda existem vários aspetos a abordar para melhorar este projeto, impossibilitando a sua realização devido ao prazo definido para o estágio:

- Definição do esquema elétrico do projeto;
- Definição do esquema pneumático do projeto;
- Análise em MEF do sistema de rotação;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (MIR), M. I. R. (2020). *Infinitus enhances automation with advanced intralogistics solutions from MiR*. <https://www.mobile-industrial-robots.com/es/insights/case-studies/mobile-industrial-robots-mir-enhances-automation-for-infinitus-through-advanced-intralogistics-solutions/>
- Abdou, G., & Lee, E. (1992). Contribution to the development of robotic palletization of multiple box sizes. *Journal of Manufacturing Systems*, 11(3), 160–166. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(92\)90002-W](https://doi.org/10.1016/0278-6125(92)90002-W)
- AGME. (2020). *Linha de montagem automática de guias de assento*. <http://www.agme.net/pt/maquinas-personalizadas/componentes-para-industria-automovel/guias-de-assento/linha-de-montagem-0>
- AGVE. (2020). *AGV Systems*. <https://www.mobile-industrial-robots.com/es/insights/case-studies/mobile-industrial-robots-mir-enhances-automation-for-infinitus-through-advanced-intralogistics-solutions/>
- AICEP. (2016). Indústria automóvel e componentes. *Portugalglobal*, 87, 66.
- Araújo, L. M. B., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., & Matos, J. A. (2017). A novel dynamic holding system for thin metal plate shearing machines. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 44(November 2015), 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.06.006>
- Araújo, W. F. S., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., & Matos, J. A. (2017). Manufacturing cushions and suspension mats for vehicle seats: a novel cell concept. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(5–8), 1539–1545. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9475-6>
- Ascensão, P. (2017). *Indústria automóvel - forte dinâmica empresarial alavancada pelo COMPETE 2020*. https://www.compete2020.gov.pt/pesquisa/detalhe/NL_Inovacao_automovel
- Aveiro, I. (2016, October 27). Simoldes investe 55 milhões em fábrica em Marrocos. *Jornal de Negócios*. <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/industria/detalhe/simoldes-investe-55-milhoes-em-fabrica-em-marrocos>
- Bayer, F. M., Machado, R., & Eckhardt, M. (2011). *Automação de Sistemas*. Universidade Federal de Santa Maria.
- Bélangier-Barrete, M. (2014). *Top 5 robotic applications in the automotive industry*.

- <https://blog.robotiq.com/bid/69722/Top-5-Robotic-Applications-in-the-Automotive-Industry>
- Campilho, R. D. S. G. (2012). *Método de Elementos Finitos - Ferramentas para Análise Estrutural*. Publindústria.
- Chryssolouris, G., Papakostas, N., & Mavrikios, D. (2008). A perspective on manufacturing strategy: Produce more with less. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(1), 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.06.008>
- CIM Automação. (2018). *O que são robôs colaborativos?* <https://blog.cimautomacao.com.br/o-que-sao-robos-colaborativos/>
- CNC, damen. (2021). *Orçamentação material pneumático*. <https://www.damencnc.com/en>
- Costa, M. J. R., Gouveia, R. M., Silva, F. J. G., & Campilho, R. D. S. G. (2018). How to solve quality problems by advanced fully-automated manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), 3041–3063. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0158-8>
- Costa, R. J. S., Silva, F. J. G., & Campilho, R. D. S. G. (2017). A novel concept of agile assembly machine for sets applied in the automotive industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9–12), 4043–4054. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0109-4>
- Datalogic. (2021). *Enhanced Laser Sentinel*. <https://www.datalogic.com/prt/fabricação/segurança/enhanced-laser-sentinel-pd-829.html>
- Dencker, K., Fath, Å., Stahre, J., Mårtensson, L., Lundholm, T., & Akillioglu, H. (2009). Proactive assembly systems-realising the potential of human collaboration with automation. *Annual Reviews in Control*, 33(2), 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2009.05.004>
- DIVMAC. (2020a). *Células de Montagem*. <https://divmac.pt/pt-pt/produtos/automovel/>
- DIVMAC. (2020b). *Sistemas de Soldadura por Ultrasons*. <https://divmac.pt/pt-pt/produtos/automovel/>
- Djuric, A. M., Urbanic, R. J., & Rickli, J. L. (2016). A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 9(2), 457–464. <http://www.jstor.org/stable/26267460>
- Fabory. (2021). *Catálogo*. <https://www.fabory.com/pt>
- Franklin, C. S., Dominguez, E. G., Fryman, J. D., & Lewandowski, M. L. (2020). Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace. *Journal of Safety Research*, 74, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.06.013>

- Freitas, M. (2018). *SIMOLDES Plásticos*.
https://www.compete2020.gov.pt/noticias/detalhe/NL_SIMOLDES_Plásticos
- French, S. (2009). Action research for practising managers. *Journal of Management Development*, 28(3), 187–204. <https://doi.org/10.1108/02621710910939596>
- Georgantzia, E., Gkantou, M., & Kamaris, G. S. (2021). Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Engineering Structures*, 227, 111372. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>
- Gopinath, V., Ore, F., & Johansen, K. (2017). Safe Assembly Cell Layout through Risk Assessment - An Application with Hand Guided Industrial Robot. *Procedia CIRP*, 63, 430–435. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.160>
- Groover, M. P. (2002). *Automation, Production Systems, and Computer-integrated Manufacturing* (2nd ed.). Assembly Automation.
- Gupta, A. K., Arora, S. K., & Westcott, J. R. (2007). *Industrial Automation and Robotics*. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=Y7rgCP7iC18C&oi=fnd&pg=PA1&dq=industrial+automation+and+robotics+gupta&ots=e5DX1AoX89&sig=rQoSCfYTTKKQTTHcsDyN9IHJ4FM&redir_esc=y#v=onepage&q=industrial+automation+and+robotics+gupta&f=false
- International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA). (2020). *Production Statistics*. <https://www.oica.net/production-statistics/>
- Kempfer, L. (2006). *The welded vs. bolted debate*. Material Handling & Logistics. <https://www.mhlnews.com/facilities-management/article/22040676/the-welded-vs-bolted-debate>
- Kiran, D. R. (2019). Chapter 34 - Industry 4.0. *Production Planning and Control A Comprehensive Approach*, 1698, 481–494. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818364-9.00034-2>
- Koshy, V. (2005). Action research for improving practice. In *A SAGE Publication Company* (Vol. 36, Issue 6).
- Krüger, J., Lien, T. K., & Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), 628–646. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.009>
- Lupatec. (2020). *Sistemas de alimentação*. <https://www.lupatec.pt/galeria/>
- Machado, C., & Editors, J. P. D. (2020). *Methodology in Management and Industrial*. Springer.
- Magalhães, A. J. A., Silva, F. J. G., & Campilho, R. D. S. G. (2019). A novel concept of bent wires sorting operation between workstations in the production of automotive parts. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1522-9>

- Marques, D. (2020). *qual o custo de um trabalhador para a empresa*. <https://euseguros.pt/qual-o-custo-de-um-trabalhador-para-a-empresa/>
- Master Tecnologia Industrial. (2021). *Como calcular a força de um pistão pneumático*. <https://www.youtube.com/watch?v=9lZdYutexl0>
- MatWeb. (2021). *Ficha técnica aço EN 235JR*. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8786de42779b49a29a7d9633222a5003>
- MetalWork. (2021). *Ficha técnica cilindro pneumático*. <https://media.metalwork.it/browse/catalogue-eng#page/26>
- Monteiro, C., Ferreira, L. P., Fernandes, N. O., Sá, J. C., Ribeiro, M. T., & Silva, F. J. G. (2019). Improving the machining process of the metalworking industry using the lean tool SMED. *Procedia Manufacturing*, 41, 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.043>
- Morioka, M., & Sakakibara, S. (2010). A new cell production assembly system with human-robot cooperation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.044>
- Mourato, J., Pinto Ferreira, L., Sá, J. C., Silva, F. J. G., Dieguez, T., & Tjahjono, B. (2020). Improving internal logistics of a bus manufacturing using the lean techniques. *International Journal of Productivity and Performance Management*. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2020-0327>
- Nof, S. Y. (2009). Automation : What it means to us around the world. In *Handbook of Automation* (pp. 13–52). Springer.
- Norelem. (2021). *Produtos*. <https://www.norelem.com/pt/pt/Home.html>
- Np En 1993-1-8. (2010). Norma Portuguesa - Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço. *Instituto Português Da Qualidade*, 146.
- Nunes, P. M. S., & Silva, F. J. G. (2013). Increasing flexibility and productivity in small assembly operations: A case study. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 7, 329–340. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00557-7_27
- Ollero, A., Boverie, S., Goodall, R., Sasiadek, J., Erbe, H., & Zuehlke, D. (2006). Mechatronics, robotics and components for automation and control. IFAC milestone report. *Annual Reviews in Control*, 30(1), 41–54. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2006.02.002>
- Online, R. M. (2015). *Volkswagen desenvolve solução inovadora para limpar o ar das cabines de pintura na fábrica em Taubaté (SP)*. <http://mecanicaonline.com.br/wordpress/2015/11/24/volkswagen-desenvolve-solucao-inovadora-para-limpar-o-ar-das-cabines-de-pintura-na-fabrica-em-taubate-sp/>
- Plastic Corp, U. S. (2021). *PTFE Rod*.

- <https://www.usplastic.com/catalog/item.aspx?itemid=22699&clickid=related-slider>
- Plásticos, S. (2017). *Simoldes Plásticos*. <http://www.simoldes.com/plastics/sp.html>
- Poly Lanema. (2021a). *Ficha técnica alumínio AW5005*. <https://www.polylanema.pt/pt/aluminios-tecnicos/folhas/aw-5005/>
- Poly Lanema. (2021b). *Ficha técnica alumínio AW5083*. <https://www.polylanema.pt/pt/aluminios-tecnicos/placas/aw-5083/>
- Poly Lanema. (2021c). *PTFE*. <https://www.polylanema.pt/pt/plasticos-de-engenharia/uso-geral/ptfe/>
- Profelectro. (n.d.). *Automação*. Retrieved December 15, 2020, from <http://www.profelectro.info/robotica-apontamentos-parte-1-ficha-de-trabalho-1-com-questionario/>
- Ribeiro, P., Sá, J. C., Ferreira, L. P., Silva, F. J. G., Pereira, M. T., & Santos, G. (2019). The impact of the application of lean tools for improvement of process in a plastic company: A case study. *Procedia Manufacturing*, 38(2019), 765–775. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.104>
- Robots, K. (2020). *Robô KR1805*. <https://www.kassowrobots.com/products/kr1805/>
- Santos, A. F. dos. (1977). *Estruturas metálicas projetos e detalhes para fabricação* (K. E. Grassmuck (ed.)). McGraw-Hill.
- Santos, G. (2017). *O que é Automação Industrial?* 2017. <https://www.automacaoindustrial.info/o-que-e-automacao-industrial/>
- Savira, F., & Suharsono, Y. (2013). Process Selection from Design to Manufacture. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 01(01), 1689–1699.
- SILVEIRA, L., & LIMA, W. Q. (2003). Um breve histórico conceitual da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial. *UFRN-PPgEE*, 3.
- SKF. (2017). *Rolamentos*. 1382. <http://www.skf.com/br/products/product-tables/index.html>
- SMART Automação e Robotica. (2013). *Robot Motoman*. <http://www.smart.ind.br/tecnologia.html>
- Steel Grades. (2021). *Ficha técnica aço 18MnCr5*. <https://www.steelgrades.com/metals/85/218968/---18MnCr5-3.html>
- Susman, G. I., & Evered, R. D. (1978). An Assessment of the Scientific Merits of Action Research. *Administrative Science Quarterly*, 23(4), 582–603. <https://doi.org/10.2307/2392581>
- TME. (2021). *Orçamentação material elétrico*. <https://www.tme.eu/pt/>

Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 - A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>

Vilaça, A. (2010). *Engrenagens*.

Vilaça, A. (2018). *Sebenta Mecânica dos materiais*.

Vysocky, A., & Novak, P. (2016). Human - Robot collaboration in industry. *MM Science Journal*, 2016-June, 903–906. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_06_201611

ANEXOS

6.1 TABELAS DE ANTROPOMETRIA APLICADA

6.2 TENSÃO LIMITE DE FLEXÃO

6.3 TENSÃO LIMITE DE HERTZ

6.4 CUSTO DE MATERIAL PARA FABRICO DE COMPONENTES EM AÇO

6.5 CUSTO DO MATERIAL EM AÇO DA EMPRESA FERPINTA

6.6 PEDIDO DE ORÇAMENTO À EMPRESA POLYLANEMA DO MATERIAL PARA FABRICO DE COMPONENTES EM ALUMINIO

6.7 DESENHOS DE DEFINIÇÃO

6 ANEXOS

6.1 Anexo A

Tabelas de antropometria aplicada

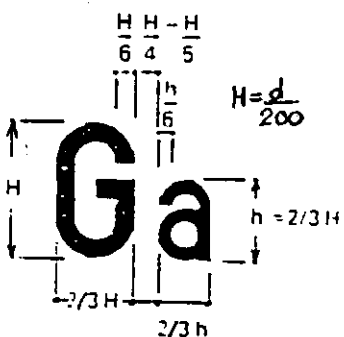
Quadro 4.1

Dimensões:	Percentis-> 5º	Homens				Mulheres			
		50º	95º	s	5º	50º	95º	s	
1. Altura de pé	1625	1740	1855	70	1505	1610	1710	62	
2. Altura dos olhos	1515	1630	1745	69	1405	1505	1610	61	
3. Altura do ombro	1315	1425	1535	66	1215	1310	1405	58	
4. Altura do cotovelo	1005	1090	1180	52	930	1005	1085	46	
5. Altura da anca	840	920	1000	50	740	810	885	43	
6. Altura do punho	690	755	825	41	660	720	780	36	
7. Altura mínima da mão	590	655	720	38	560	625	685	38	
8. Altura sentado	850	910	965	36	795	850	910	35	
9. Dist. olhos-assento	735	790	845	35	685	740	795	33	
10. Dist. ombro-assento	540	595	645	32	505	555	610	31	
11. Dist. cotov.-assento	195	245	295	31	185	235	280	29	
12. Espessura da coxa	135	160	185	15	125	155	180	17	
13. Compr. máx. da coxa	540	595	645	31	520	570	620	30	
14. Compr. coxa-popliteu	440	495	550	32	435	480	530	30	
15. Altura do joelho	490	545	595	32	455	500	540	27	
16. Altura do popliteu	395	440	490	29	355	400	445	27	
17. Largura dos ombros (bideltóide)	420	465	510	28	355	395	435	24	
18. Largura dos ombros (biacromial)	365	400	430	20	325	355	385	18	
19. Largura das ancas	310	360	405	29	310	370	435	38	
20. Espessura do peito (busto)	215	250	285	22	210	250	295	27	
21. Espessura abdominal	220	270	325	32	205	255	305	30	
22. Distância ombro- -cotovelo	330	365	395	20	300	330	360	17	
23. Distância cotovelo- -extremidade da mão	440	475	510	21	400	430	460	19	
24. Comprimento máx. do membro superior	720	780	840	36	655	705	760	32	
25. Dist. ombro-punho	610	665	715	32	555	600	650	29	
26. Compr. da cabeça	180	195	205	8	165	180	190	7	
27. Largura da cabeça	145	155	165	6	135	145	150	6	
28. Comprimento da mão	175	190	205	10	160	175	190	9	
29. Largura da mão	80	85	95	5	70	75	85	4	
30. Comprimento do pé	240	265	285	14	215	235	255	12	
31. Largura do pé	85	95	110	6	80	90	100	6	
32. Enverg. dos braços	1655	1790	1925	83	1490	1605	1725	71	
33. Enverg. cotovelos	865	945	1020	47	780	850	920	43	
34. Alcance funcional vertical (de pé)	1925	2060	2190	80	1790	1905	2020	71	
35. Alcance funcional vertical (sentado)	1145	1245	1340	60	1060	1150	1235	53	
36. Alcance func. anter.	720	780	835	34	650	705	755	31	
37. Altura lombar (sent.)	195	240	285	26	195	230	265	22	
38. Peso	55,3	74,5	93,7	12	44,1	62,5	80,9	11	

Valores de p e z da distribuição normal

p	z	p	z	p	z	p	z
1	-2,33	26	-0,64	51	0,03	76	0,71
2	-2,05	27	-0,61	52	0,05	77	0,74
3	-1,88	28	-0,58	53	0,08	78	0,77
4	-1,75	29	-0,55	54	0,10	79	0,81
5	-1,64	30	-0,52	55	0,13	80	0,84
6	-1,55	31	-0,50	56	0,15	81	0,88
7	-1,48	32	-0,47	57	0,18	82	0,92
8	-1,41	33	-0,44	58	0,20	83	0,95
9	-1,34	34	-0,41	59	0,23	84	0,99
10	-1,28	35	-0,39	60	0,25	85	1,04
11	-1,23	36	-0,36	61	0,28	86	1,08
12	-1,18	37	-0,33	62	0,31	87	1,13
13	-1,13	38	-0,31	63	0,33	88	1,18
14	-1,08	39	-0,28	64	0,36	89	1,23
15	-1,04	40	-0,25	65	0,39	90	1,28
16	-0,99	41	-0,23	66	0,41	91	1,34
17	-0,95	42	-0,20	67	0,44	92	1,41
18	-0,92	43	-0,18	68	0,47	93	1,48
19	-0,88	44	-0,15	69	0,50	94	1,55
20	-0,84	45	-0,13	70	0,52	95	1,64
21	-0,81	46	-0,10	71	0,55	96	1,75
22	-0,77	47	-0,08	72	0,58	97	1,88
23	-0,74	48	-0,05	73	0,61	98	2,05
24	-0,71	49	-0,03	74	0,64	99	2,33
25	-0,67	50	0	75	0,67		

p	z	p	z
2,5	-1,96	97,5	1,96
0,5	-2,58	99,5	2,58
0,1	-3,09	99,9	3,09
0,01	-3,72	99,99	3,72
0,001	-4,26	99,999	4,26



Quadro 1.2. Dimensões das marcações da escala em função da distância de visão, d (em mm) (Segundo Grandjean, 1981).

Altura das graduações principais.....	d / 90
Altura das graduações intermédias.....	d / 125
Altura das graduações menores.....	d / 200
Espessura das graduações.....	d / 5000
Distância entre as graduações menores.....	d / 600
Distância entre duas graduações principais....	d / 50

6.2 Anexo B

Tensão limite de Flexão

Table 17-7 Carburized Gears

Material	Arrows indicate the ranges	Core Hardness		$\sigma_{F\text{lim}}$ kgf/mm ²
		HB	HV	
Structural Carbon Steel	S15C S15CK	140	147	18.2
		150	157	19.6
		160	167	21
		170	178	22
		180	189	23
		190	200	24
Structural Alloy Steel		220	231	34
		230	242	36
		240	252	38
		250	263	39
		260	273	41
		270	284	42.5
		280	295	44
		290	305	45
		300	316	46
		310	327	47
		320	337	48
		330	347	49
		340	358	50
		350	369	51
		360	380	51.5
370	390	52		

6.3 Anexo C

Tensão limite de Hertz

Table 17-14 Carburized Gears – Allowable Hertz Stress

Material		Effective Carburized Depth	Surface Hardness HV (Quenched)	$\sigma_{H \text{ lim}}$ kgf/mm ²	
Structural Carbon Steel	S15C S15CK	Relatively Shallow (See Table 17-14A , row A)	580	115	
			600	117	
			620	118	
			640	119	
			660	120	
			680	120	
			700	120	
			720	119	
			740	118	
			760	117	
			780	115	
			800	113	
Structural Alloy Steel	SCM415 SCM420	Relatively Shallow (See Table 17-14A , row A)	580	131	
			600	134	
			620	137	
			640	138	
			660	138	
			680	138	
			700	138	
			720	137	
			740	136	
			760	134	
				780	132
				800	130
	SNC420 SNC815 SNCM420	Relatively Thick (See Table 17-14A , row B)	580	156	
			600	160	
			620	164	
			640	166	
			660	166	
			680	166	
			700	164	
			720	161	
740			158		
760			154		
			780	150	
			800	146	

- NOTES:**
- Gears with thin effective carburized depth have "A" row values in the **Table 17-14A** on the following page. For thicker depths, use "B" values. The effective carburized depth is defined as the depth which has the hardness greater than HV 513 or HRC 50.
 - The effective carburizing depth of ground gears is defined as the residual layer depth after grinding to final dimensions.

6.4 Anexo D

Custo de material para fabrico de componentes em aço

CHAPA LAMINADA A QUENTE (PRETA)

Espessura (mm)	Preço (€/kg)		
	2000X1000 mm ²	2500X1250 mm ²	3000X1500 mm ²
1,50	1,930	1,930	1,930
2,00	1,820	1,820	1,820
2,50	1,820	1,820	1,820
3,00	1,800	1,800	1,800
4,00	1,800	1,800	1,800
5,00	1,800	1,800	1,800
6,00	1,800	1,800	1,800
8,00	1,800	1,800	1,800
10,00	1,810	1,810	1,810
12,00	1,820	1,820	1,820
15,00	1,920	1,920	1,920
16,00	1,920	1,920	1,920
20,00	1,930	1,930	1,930

CHAPA LAMINADA A FRIO (POLIDA)

Espessura (mm)	Preço (€/kg)		
	2000X1000 mm ²	2500X1250 mm ²	3000X1500 mm ²
0,50	2,515	-	-
0,60	2,490	2,490	2,490
0,80	2,420	2,420	2,420
1,00	2,420	2,420	2,420
1,25	2,420	2,420	2,420
1,50	2,410	2,410	2,410
2,00	2,410	2,410	2,410
2,50	2,410	2,410	2,410
3,00	2,410	2,410	2,410

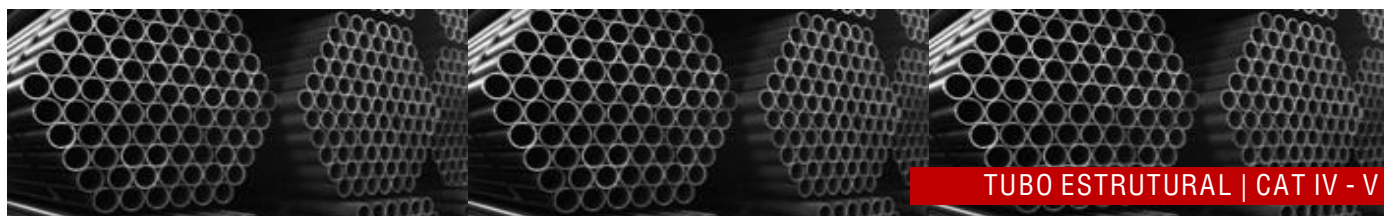
QUADRADO									
Secção	Preço (€/m)								
(mm)	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	10 mm	12 mm	12,5 mm
30 x 30	4,988	---	---	---	---	---	---	---	---
35 x 35	6,000	7,500	---	---	---	---	---	---	---
38 x 38	6,600	---	---	---	---	---	---	---	---
40 x 40	6,425	8,188	10,150	---	---	---	---	---	---
45 x 45	7,975	10,225	12,025	---	---	---	---	---	---
50 x 50	8,275	10,613	13,325	15,988	---	---	---	---	---
60 x 60	10,100	13,063	16,075	19,463	---	25,700	---	---	---
70 x 70	11,950	15,513	19,700	23,275	---	33,863	---	---	---
80 x 80	13,775	17,938	22,938	26,825	---	37,888	---	---	---
90 x 90	16,038	21,038	25,675	31,213	---	44,875	---	---	---
100 x 100	17,450	22,775	29,250	34,625	---	47,350	59,738	---	70,825
110 x 110	20,625	27,200	33,513	40,288	---	---	---	---	---
120 x 120	21,850	28,475	35,550	42,563	---	59,650	73,500	84,513	86,663
125 x 125	24,200	31,913	40,238	47,700	---	62,413	79,763	---	100,338
130 x 130	---	---	---	---	---	---	---	---	---
140 x 140	26,500	34,188	42,188	50,675	---	70,688	89,200	103,625	106,163
150 x 150	25,575	37,350	45,450	53,875	---	76,313	95,788	111,175	115,450
160 x 160	31,275	40,550	49,675	59,763	---	82,463	103,713	120,150	125,675
175 x 175	---	---	---	---	---	---	---	---	---
180 x 180	36,250	46,713	56,425	67,438	---	93,650	116,625	138,563	144,625
200 x 200	---	52,050	63,900	76,688	---	105,630	131,738	162,100	164,788
220 x 220	---	60,513	---	---	---	121,250	150,975	175,650	---
250 x 250	---	---	85,550	101,775	---	136,275	163,650	190,913	219,613
260 x 260	---	---	92,175	109,900	---	148,938	183,588	222,450	231,625

“Preços sujeitos a I.V.A. à taxa legal”

RECTANGULAR									
Secção (mm)	Preço (€/m)								
	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	10 mm	12 mm	12,5 mm
30 x 20	3,800	---	---	---	---	---	---	---	---
40 x 20	4,925	---	---	---	---	---	---	---	---
40 x 25	5,425	---	---	---	---	---	---	---	---
40 x 27	5,613	---	---	---	---	---	---	---	---
40 x 30	5,663	---	---	---	---	---	---	---	---
45 x 25	5,663	---	---	---	---	---	---	---	---
45 x 30	6,163	---	---	---	---	---	---	---	---
45 x 35	0,613	8,450	---	---	---	---	---	---	---
50 x 20	5,763	---	---	---	---	---	---	---	---
50 x 25	6,238	---	---	---	---	---	---	---	---
50 x 30	6,613	8,600	---	---	---	---	---	---	---
50 x 35	7,400	---	---	---	---	---	---	---	---
50 x 40	7,863	10,075	---	---	---	---	---	---	---
60 x 20	6,900	---	---	---	---	---	---	---	---
60 x 25	7,400	---	---	---	---	---	---	---	---
60 x 30	7,550	9,675	---	---	---	---	---	---	---
60 x 40	8,525	10,925	13,375	11,770	---	---	---	---	---
60 x 50	9,863	12,688	---	---	---	---	---	---	---
70 x 30	8,525	10,925	---	---	---	---	---	---	---
70 x 40	9,638	12,588	15,350	---	---	---	---	---	---
70 x 50	10,388	13,438	16,975	18,738	---	---	---	---	---
80 x 20	8,875	---	---	---	---	---	---	---	---
80 x 25	9,350	---	---	---	---	---	---	---	---
80 x 30	10,350	13,375	---	---	---	---	---	---	---
80 x 40	10,388	13,438	16,588	20,138	---	---	---	---	---
80 x 45	11,313	14,663	---	---	---	---	---	---	---
80 x 50	11,425	18,400	18,400	22,875	---	---	---	---	---
80 x 60	12,313	16,238	20,088	24,650	---	33,863	---	---	---
90 x 30	11,163	14,775	---	---	---	---	---	---	---
90 x 40	11,813	15,325	19,350	---	---	---	---	---	---
90 x 50	12,275	15,975	20,238	24,850	---	---	---	---	---
100 x 20	10,825	---	---	---	---	---	---	---	---
100 x 30	12,288	15,925	---	---	---	---	---	---	---
100 x 40	12,275	15,975	20,238	24,850	---	---	---	---	---
100 x 50	13,413	17,463	21,913	26,413	---	36,963	---	---	---
100 x 60	14,375	18,738	23,588	28,418	---	39,200	---	---	---
100 x 80	16,275	21,313	26,725	31,213	---	45,213	---	---	---
110 x 70	---	---	---	---	---	---	---	---	---
120 x 30	13,413	---	---	---	---	---	---	---	---
120 x 40	15,563	20,263	25,563	29,563	---	---	---	---	---
120 x 50	15,113	19,725	25,250	---	---	---	---	---	---
120 x 60	16,275	21,338	26,375	31,513	---	44,675	---	---	---
120 x 80	18,213	23,788	29,663	34,800	---	49,688	63,363	---	---
120 x 100	21,175	27,138	33,513	39,963	---	57,850	70,963	---	---
140 x 50	---	---	---	---	---	---	---	---	---
140 x 60	18,688	24,413	30,063	36,175	---	51,100	63,225	---	---
140 x 70	20,200	26,438	32,488	39,000	---	56,950	---	---	---
140 x 80	21,175	26,925	33,138	39,900	---	56,738	69,313	---	---
150 x 50	18,463	24,100	30,063	36,175	---	51,388	62,175	---	---
150 x 70	21,500	28,213	36,075	42,613	---	---	---	---	---

6.5 Anexo E

Custo do material em aço da empresa Ferpinta



TUBO ESTRUTURAL | CAT IV - V

RECTANGULAR

DIMENSÕES	ESPESSURA						
	5,00	6,00	7,00	8,00	10,00	12,00	12,50
120 x 80	-	-	-	-	3.225,60	-	-
120 x 100	-	-	-	-	3.612,10	-	-
140 x 60	-	-	-	-	3.218,29	-	-
140 x 70	-	-	-	-	-	-	-
140 x 80	-	-	-	-	3.526,00	-	-
150 x 50	-	-	-	-	3.163,43	-	-
150 x 70	-	-	-	-	3.669,50	-	-
150 x 100	-	-	-	-	3.922,11	4.534,77	5.113,06
160 x 80	-	-	-	-	3.825,09	4.705,14	4.849,80
160 x 90	-	-	-	-	4.127,29	-	-
160 x 120	-	-	-	-	-	6.111,43	-
180 x 80	-	-	-	-	4.375,00	5.148,00	5.726,00
180 x 100	-	-	-	-	4.653,64	5.425,00	5.888,56
180 x 120	-	-	-	-	5.074,00	6.123,00	6.470,14
200 x 80	-	-	-	-	-	-	-
200 x 100	-	-	-	-	4.961,90	5.719,29	5.983,14
200 x 120	-	-	-	-	5.340,69	6.289,79	6.988,29
200 x 150	-	-	-	-	5.906,03	6.994,14	7.605,00
200 x 160	-	-	-	-	6.156,43	6.936,56	8.211,06
220 x 120	-	-	-	-	5.937,50	-	-
250 x 100	-	-	-	-	5.997,21	6.994,14	7.688,57
250 x 150	-	-	-	-	6.962,14	8.202,86	9.269,68
250 x 200	-	-	-	-	8.072,23	9.618,89	10.599,73
260 x 140	-	-	-	-	7.100,57	-	9.464,43
260 x 180	-	-	-	-	7.872,91	-	10.342,65
300 x 100	-	-	-	-	7.198,29	8.580,00	9.269,68
300 x 150	-	-	-	-	8.192,57	9.802,00	10.599,73
300 x 200	-	-	-	-	9.232,90	11.145,14	11.943,36
300 x 220	4.684,07	-	6.903,86	7.656,00	9.691,57	11.644,57	12.866,00

6.6 Anexo F

Pedido de orçamento à empresa PolyLanema do material para fabrico de componentes em alumínio

Cliente N°	NIF	Técnico	Pagamento
12507	501540709	Ricardo Teixeira	60 dias da Factura

Data
2021-06-29

Sr. André Correia
ISEP - Instituto Superior Engenharia Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, n° 431
Porto
4200-072 PORTO

Origem da Consulta : WEB Transporte (€) :

Descrição	Quant.	Uni	€ Uni	Prazo Previsto	TOTAL
V/ CONSULTA VIA WEBSITE					
ALUMINIO AW5005-H24 SHEET 1,5 MM 800X3000 AQ	1	uni	57,333	IMEDIATO S/ VENDA	57,333 €
Lote : 2020000624					
ALUMINIO AW5083-H111 PLATE 10 MM 400X400	1	uni	29,231	IMEDIATO S/ VENDA	29,231 €
ALUMINIO AW5083-H111 PLATE 12 MM 800X480	1	uni	83,490	IMEDIATO S/ VENDA	83,490 €
ALUMINIO AW5083-H111 PLATE 20 MM 150X20	1	uni	6,600	IMEDIATO S/ VENDA	6,600 €
PORTES	1,00	uni	24,000		24,000 €

Prestamos Serviço de Corte por Jato de Água
Visite-nos em : www.polylanema.pt

A Transportar (€) :

EM CASO DE ADJUDICAÇÃO, INDICAR SEMPRE O NÚMERO DA PROPOSTA.

Os preços apresentados são para a globalidade da proposta, podendo estar sujeitos a retificação no caso de adjudicações com entregas parciais.

Materiais sujeitos á variação de peso consoante a disponibilidade de Lotes, podendo existir ligeiras diferenças de peso, não sendo passível a reclamações.

Software PHC - KHh2-Processado por programa certificado nº 0006/AT (20201202)-Este documento não serve de fatura

Taxa	Base	Valor do IVA	Total das Mercadorias	200,65
0 %				
6 %				
13 %				
23 %	200,65	46,150	Total IVA	46,15
POLY LANEMA, LDA. - Capital Social 1.000.000,00 Euros Sociedade por quotas / Matriculada na Conservatória do Registo Comercial de Ovar N.º 509 581 315 Contribuinte N.º : PT 509581315 Zona Industrial de Ovar, Rua do Brasil, N.º 143 3880-108 OVAR			TOTAL A COBRAR	246,80 €

Observações :

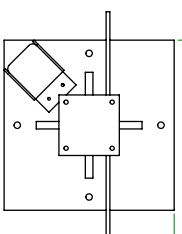
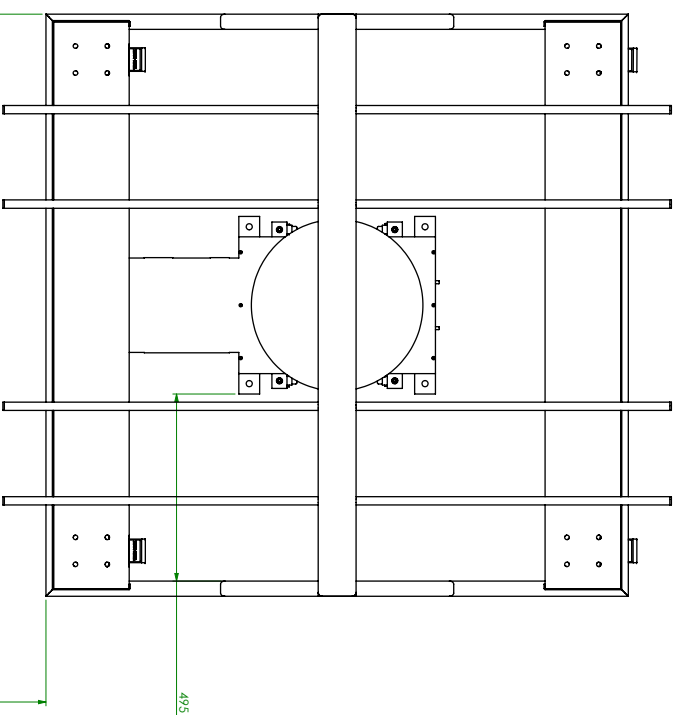
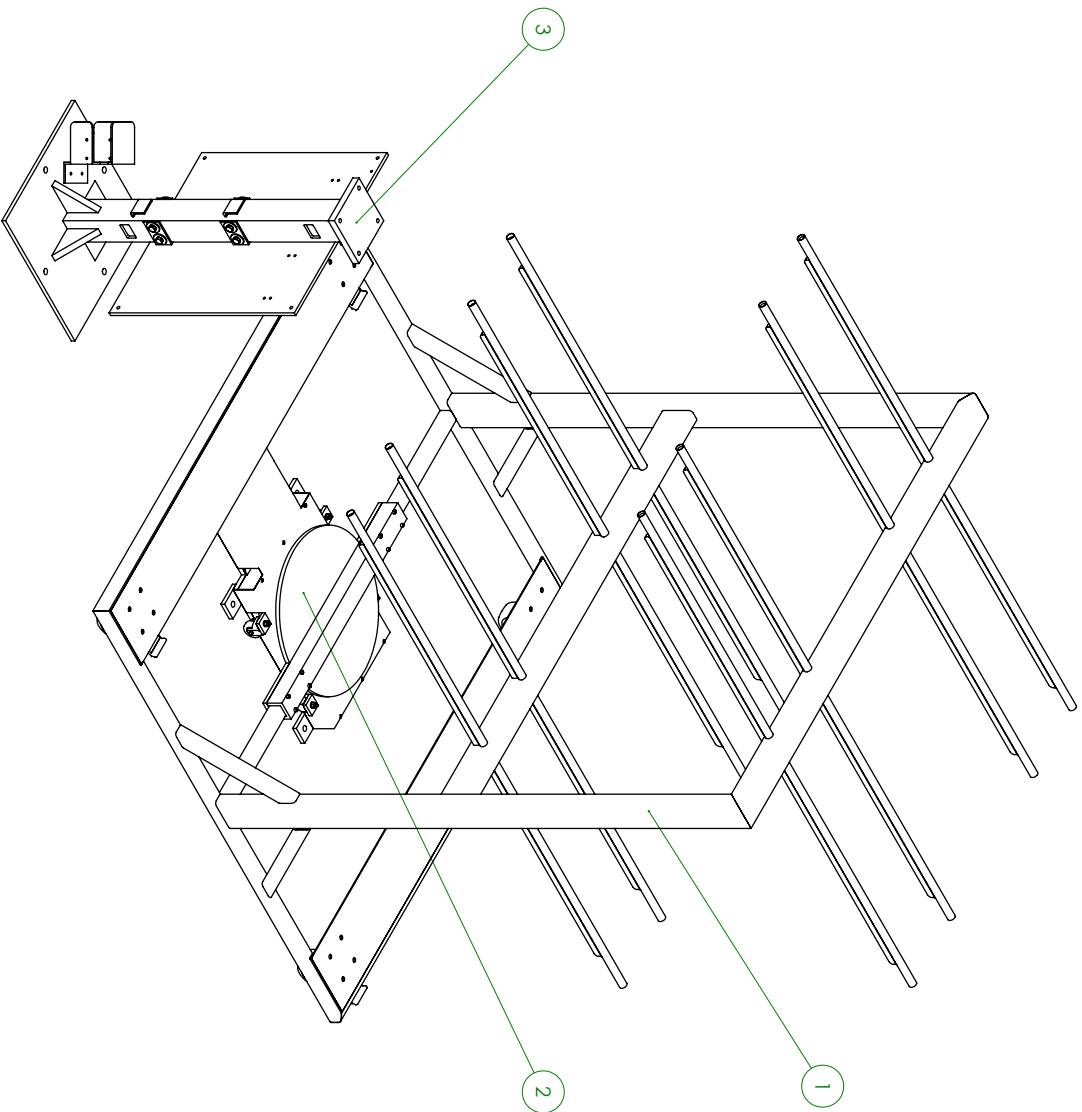
Fim de Impressão

Esta proposta e seu conteúdo são propriedade da Poly Lanema, Lda, protegida nos termos do Decreto-Lei N° 63/85, de 14 de Março. A divulgação, transcrição ou reprodução desta proposta não é permitida sem prévia autorização, por escrito da Poly Lanema, Lda.

A Proposta é confidencial e de circulação restrita, a quem a mesma se destina, que terá o direito de a utilizar apenas para os fins acordados com a Poly Lanema, Lda.

6.7 Anexo G

Desenhos de definição

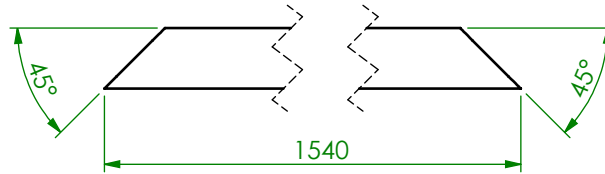


QTD	DESIGNAÇÃO	NORMA	MATERIAL	PRODUTO SEMI ACABADO	PESO	OBSERVAÇÕES
1	CONJUNTO SUPORTE DO ROLO			3		
1	CONJUNTO SISTEMA ROTACÃO			2		
1	CONJUNTO ESTRUTURA METALICA			1		

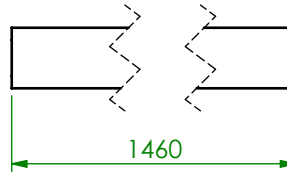
PROFESSOR		André Correia	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA
DESEMNHO		1151430	Fac. DE Engenharia de Minas, Q1
CONVUL			42052727 FCM
VERIFICAÇÃO			WWW.FEELAB.PP.FE
ESCALA			

1-10	CONJUNTO GERAL DA ESTRUTURA METALICA, SISTEMA DE ROTACÃO E SUPORTE DO ROLO	DES. Nº 0001
TOLERANÇAS		

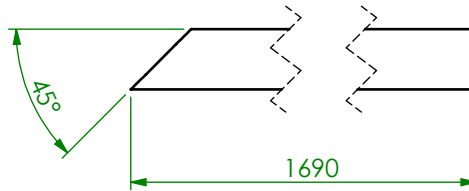
TUBO 0101



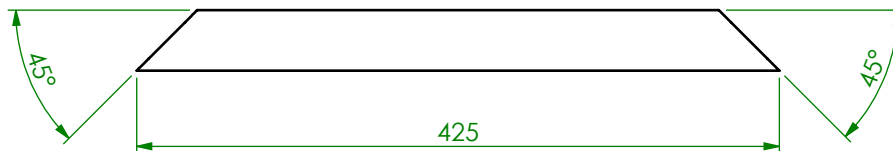
TUBO 0102



TUBO 0103



TUBO 0104

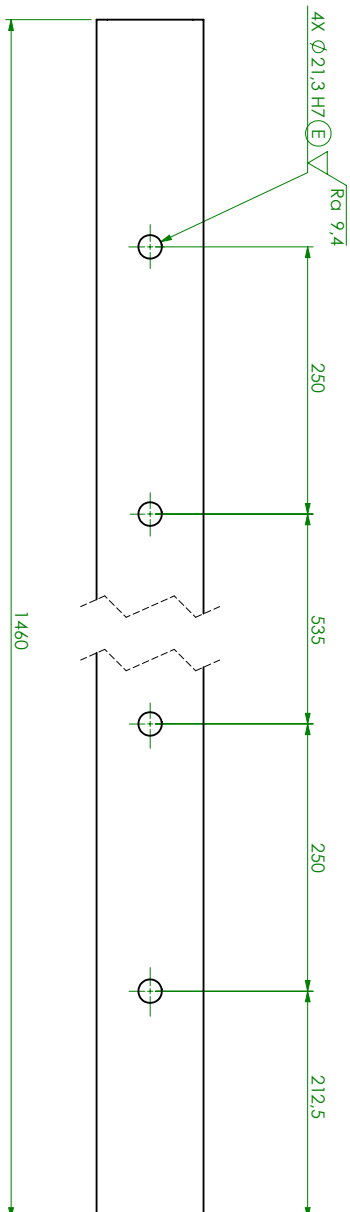


ISO 2768 - mK

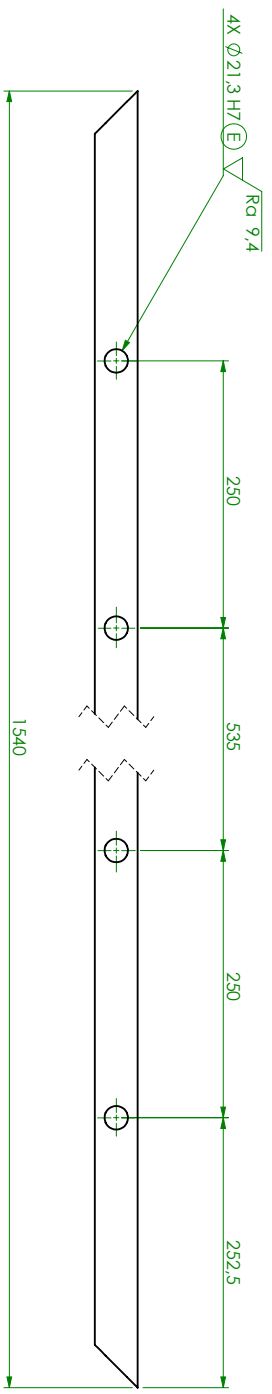


PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT			
DESENHOU						
COPIOU						
VERIFICOU						
ESCALA	1:5	COMPONENTES ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO 0101 / 0102 / 0103 / 0104	DES. Nº 0101 / 0102 0103 / 0104			
TOLER.						
			SUBSTITUI			
			SUBSTITUIDO			

TUBO 0105



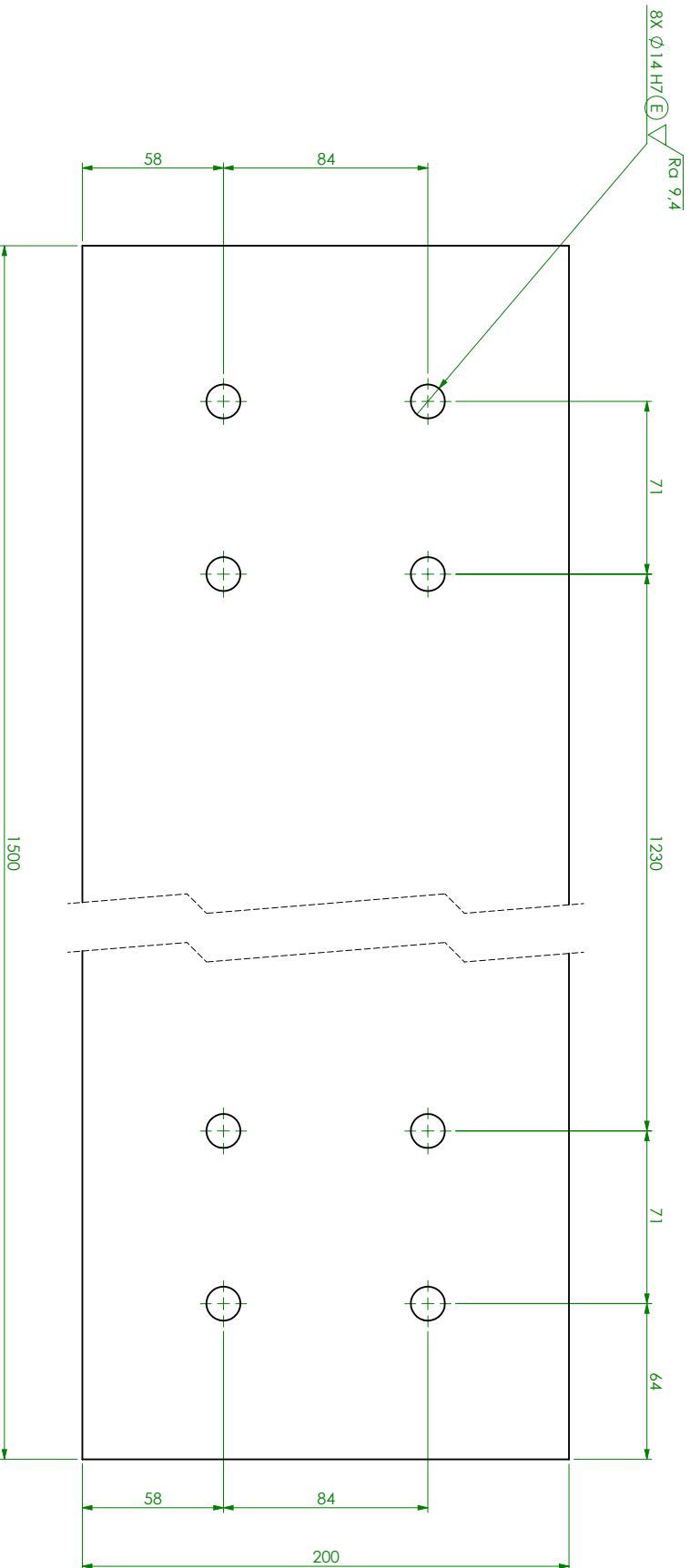
TUBO 0106



TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK



PROJETO				
DESENHO				
COPROJ				
VERIFICOU				
ESCALA	1:5			
COMPONENTES ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO 0105 / 0106		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua do Padre Bernardo de Almeida, 431 4200-372 Porto WWW.DE.ME.AESEBPP.PT	
TOLER			DES. Nº 0105 / 0106	SUBSTITUI SUBSTITUIDO



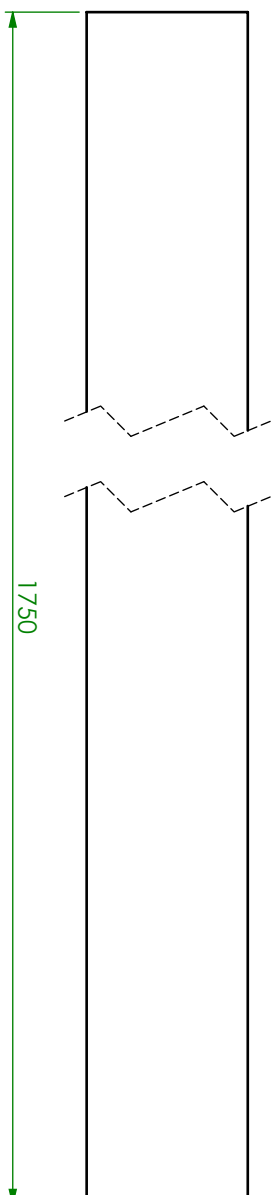
TOLER: ISO 8015
ISO 2768 - mK

CHAPA DE ESPESURA 3 mm

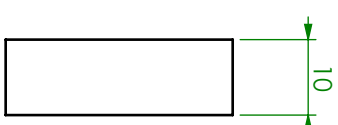
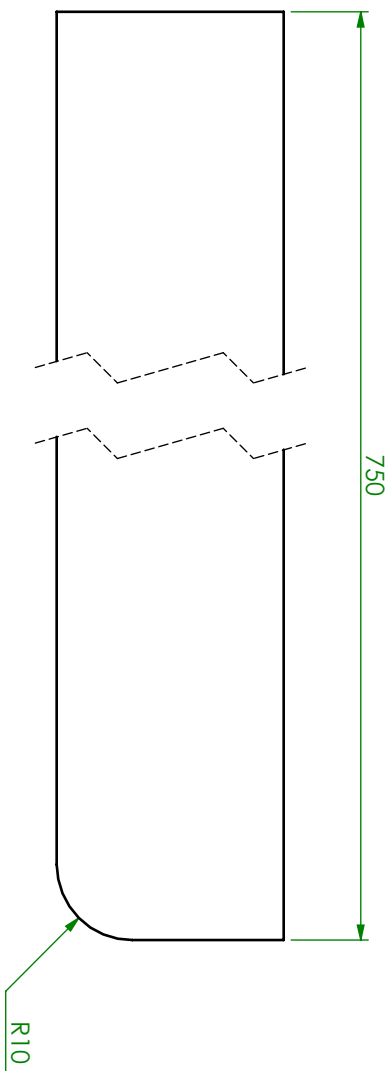
Ra 3,2 (Ra 9,4)

PROJECOU			
DESENHOU			
COPROU			
VERIFICOU			
ESCALA	1:2		
TOLER			
COMONENTE ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO 0107		André Correia	1151430
DES. Nº 0107		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua do Campo das Máquinas, 131 4200-372 Porto WWW.DEAM.SEPI.PP.PT	
SUBSTITUI			
SUBSTITUIDO			

TUBO 0108



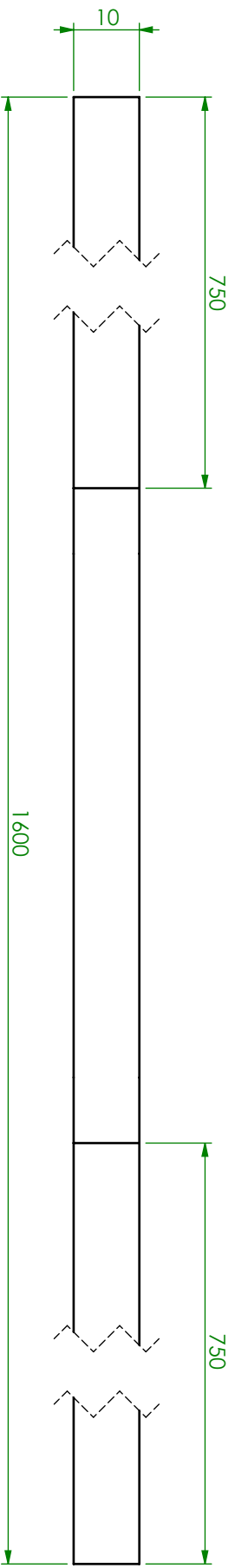
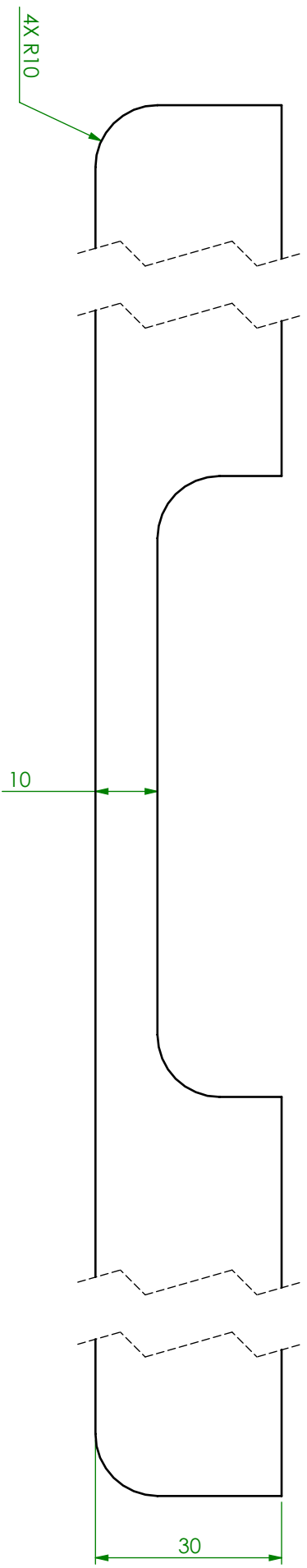
COMPONENTE 0109



ISO 2768 - mK

\sqrt{Ra} 1,6

PROJECTOU			
DESENHOU			
COPIOU			
VERIFICOU			
ESCALA	1:1		
TOLER.			
<p>André Correia 1151430</p>		<p>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto www.dem.isep.ipp.pt</p>	
<p>COMPONENTES ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO 0108 / 0109</p>		<p>DES. Nº 0108 / 0109</p>	
SUBSTITUI			
SUBSTITUIDO			

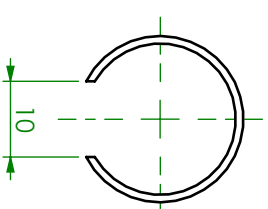
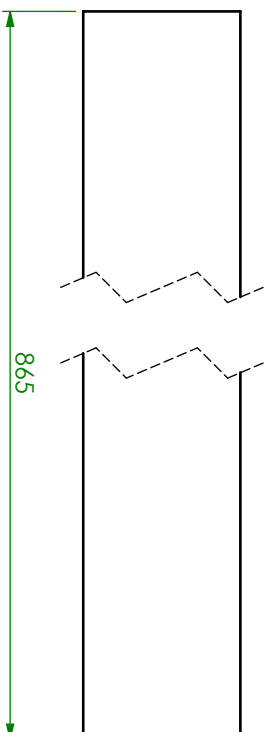


ISO 2768 - mK

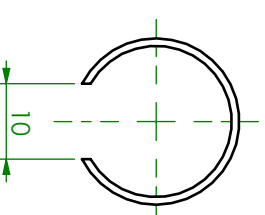
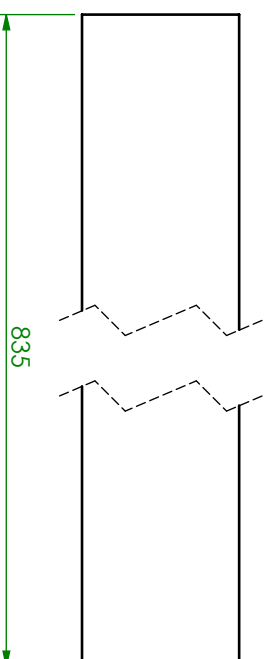
Ra 1,6

PROJECION																			
DESENHO																			
COPION																			
VERIFICOU																			
ESCALA	1:1																		
<p style="text-align: center;">COMPONENTES ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO 0110</p>		<p style="text-align: center;">André Correia 1151430</p>	<p>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto www.dem.isep.ipp.pt</p>																
TOLER.		<p style="text-align: center;">DES. Nº 0110</p>	<table border="1"> <tr> <td>SUBSTITUI</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>SUBSTITUIDO</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	SUBSTITUI								SUBSTITUIDO							
SUBSTITUI																			
SUBSTITUIDO																			

TUBO 0111



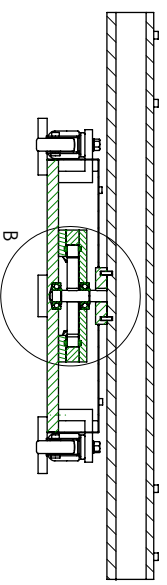
TUBO 0112



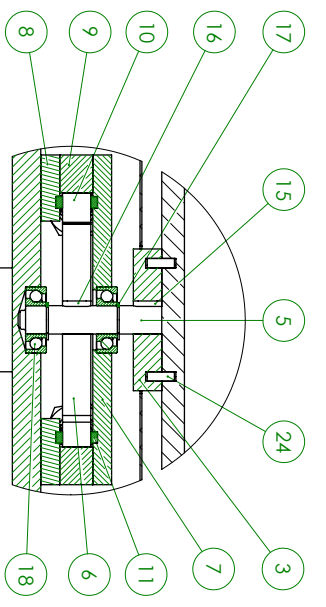
ISO 2768 - mK

 Ra 3,2

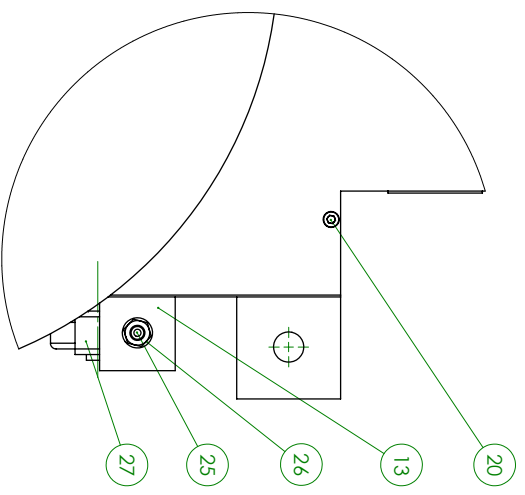
PROJECION			
DESENHO			
COPION			
VERIFICOU			
ESCALA	1:1		
TOLER.			
<p>André Correia 1151430</p>		<p>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto www.dem.isep.ipp.pt</p>	
<p>COMPONENTES ESTRUTURA DE PALETIZAÇÃO 0111 / 0112</p>		<p>DES. Nº 0111 / 0112</p>	
<p>SUBSTITUI</p>		<p>SUBSTITUÍDO</p>	



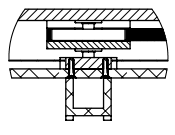
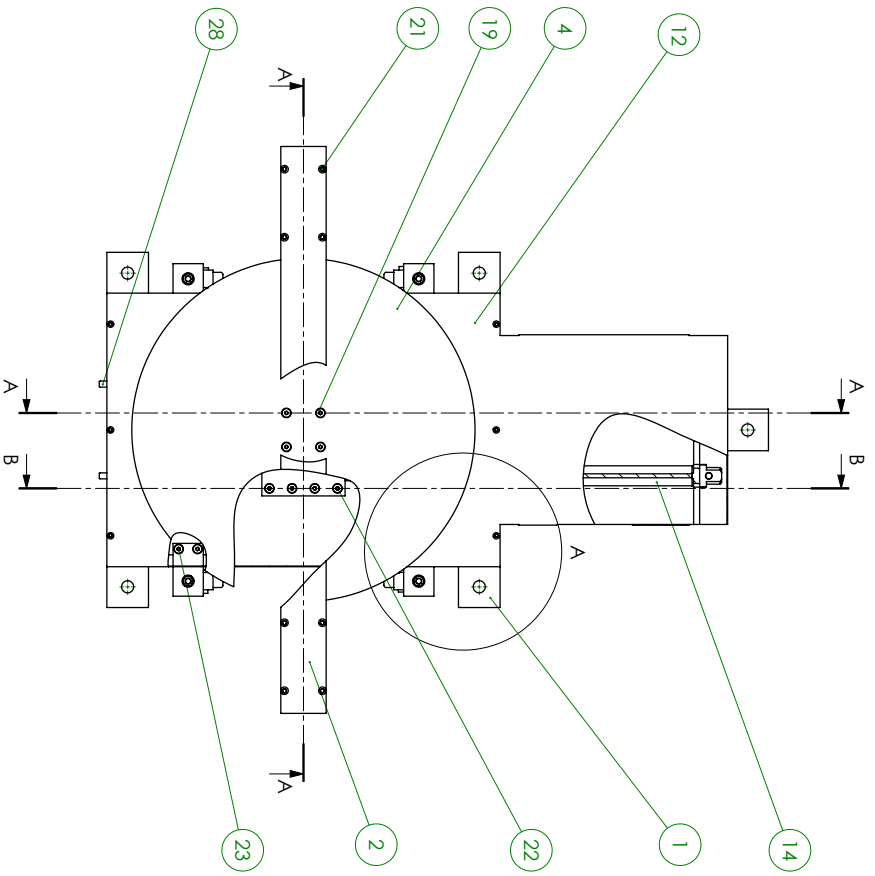
CORTE A-A



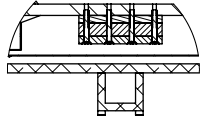
DETALHE B
ESCALA 1:2



DETALHE A
ESCALA 1:2



CORTE A-A



CORTE B-B

QTD	DESIGNAÇÃO	NORMA	MATERIAL	PRODUTO SEMIACABADO	PESO	OBSERVAÇÕES
2	BATERIE					
4	RODA					
4	ANELHA PLANA - M8	ISO 7091				
4	FORÇA HEXAGONAL - M8	ISO 4034				
4	PINO CILINDRICO - 5mmx16 - S1	ISO 9734				
8	PARAFUSO FHC - M6x60	ISO 10642				
8	PARAFUSO FHC - M6x45	ISO 10642				
4	PARAFUSO CHC - M6x60	ISO 4762				
4	PARAFUSO CHC - M5x10	ISO 4762				
6	PARAFUSO FHC - M6x25	ISO 10642				
2	ROLAMENTO - 7202 BEP					
2	ANEL ELASTICO - 15x1 - S1	DIN 471				
1	CHAVETA PARALELA A - S5015 - S1	ISO/R 773				
1	CHAVETA PARALELA C - S5015 - S1	ISO/R 773				
2	CILINDRO FREIANTICO - D723	ISO 6492				
4	COMPONENTE 0211		ALUMINIO			
4	COMPONENTE 0212		ALUMINIO			
2	CREMALHEIRA		ESTRILVA			
2	COMPONENTE 0209		ALUMINIO			
2	COMPONENTE 0208		ALUMINIO			
1	COMPONENTE 0210		ALUMINIO			
1	BRINHAO		ACO			
1	COMPONENTE 0213		ACO			
1	COMPONENTE 0215		ALUMINIO			
1	COMPONENTE 0214		ACO			
1	COMPONENTE 0216		ALUMINIO			
1	CONJUNTO DA BASE		ACO			

PRODUTOR: ANDRÉ CORREIA

ESCALA: 1:15

TITULO: CONJUNTO DO SISTEMA DE ROTAÇÃO

DES. Nº 0200_1

REVISÃO: 01

DATA: 15/04/2015

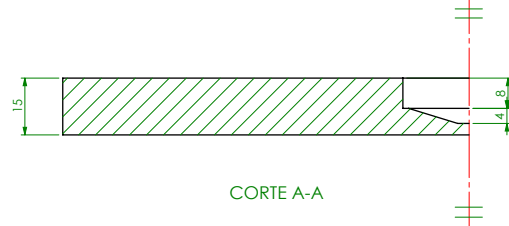
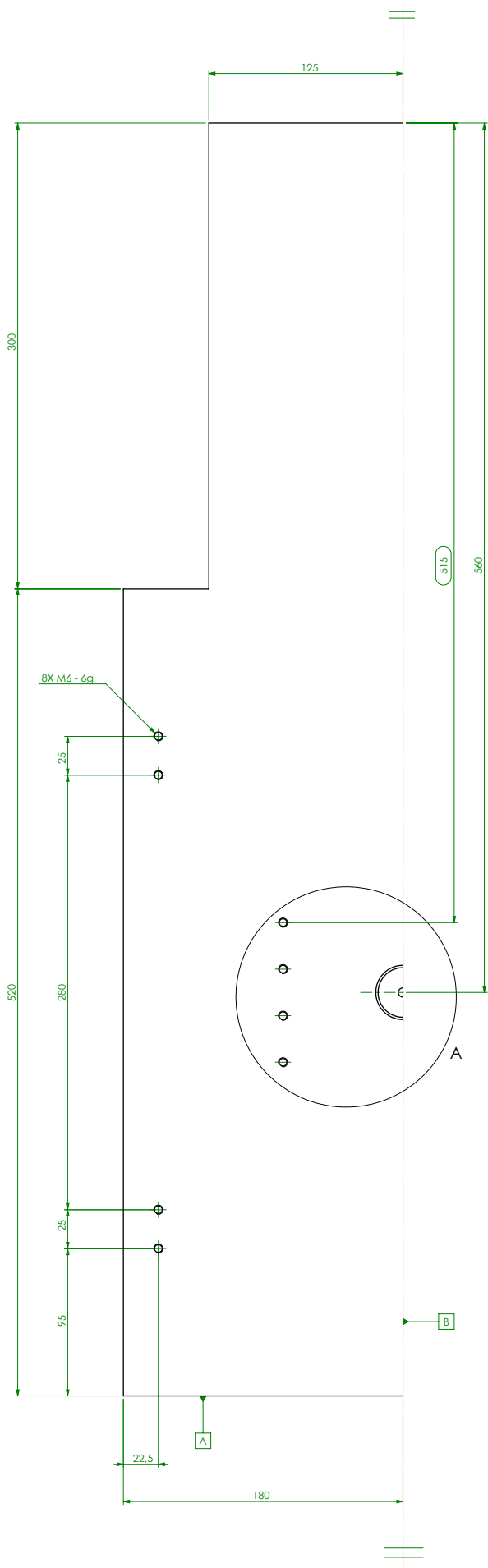
WWW.ZENITH-PP.PT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

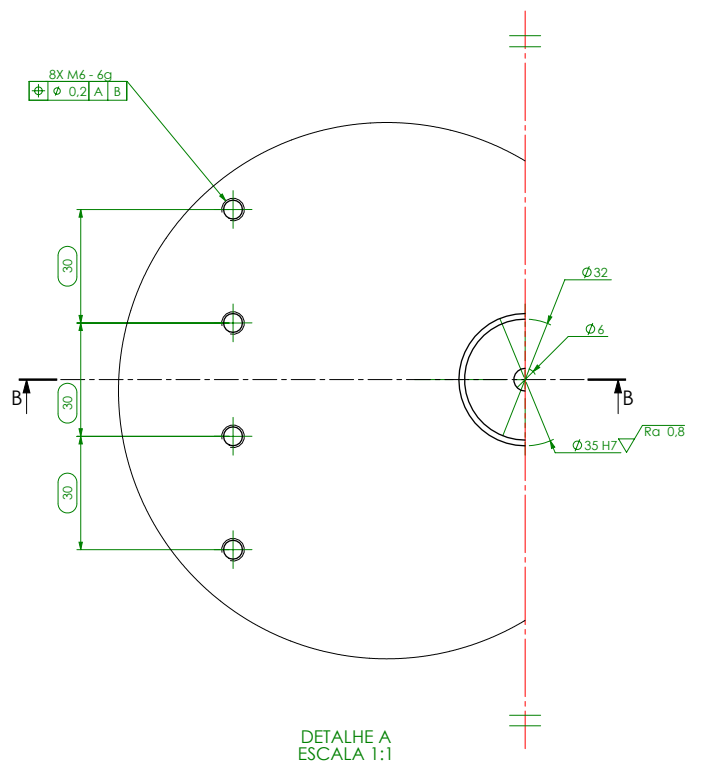
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431

4200-771 FUS

SISTEMA DE ROTAÇÃO



CORTE A-A

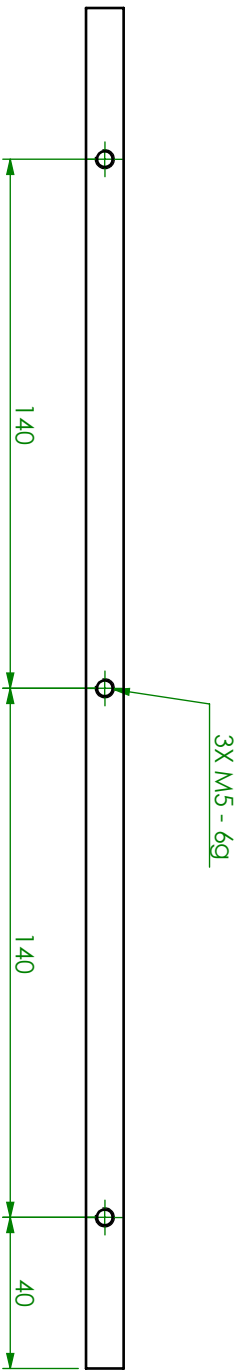
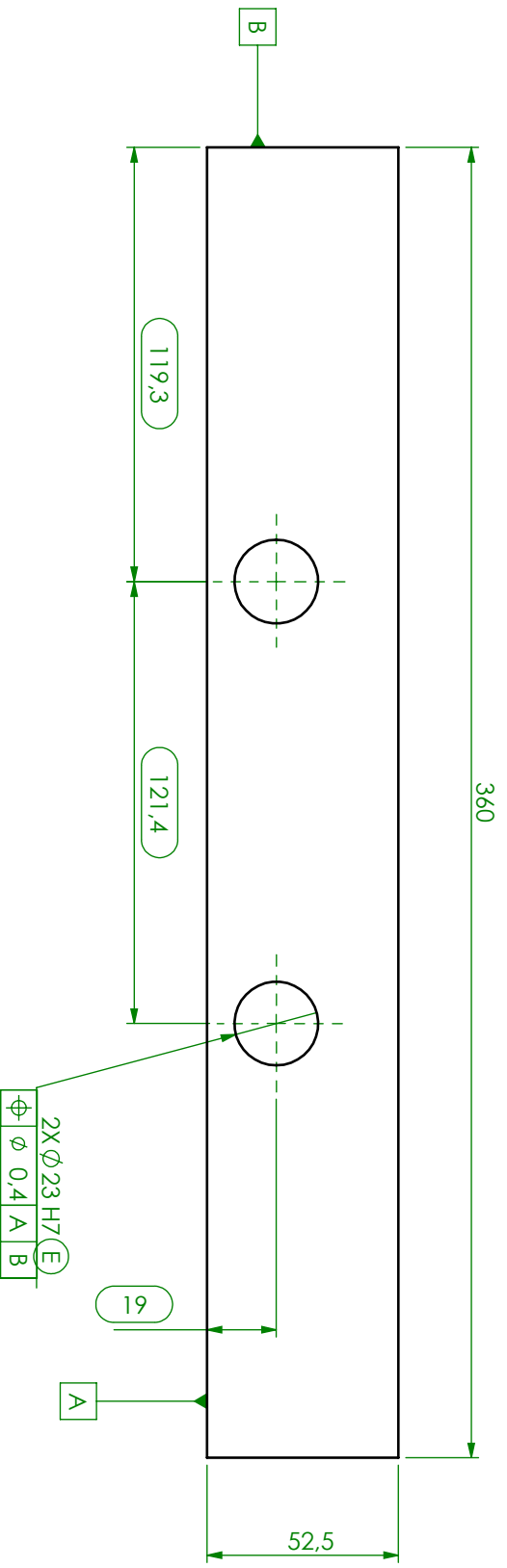


DETALHE A
ESCALA 1:1

TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

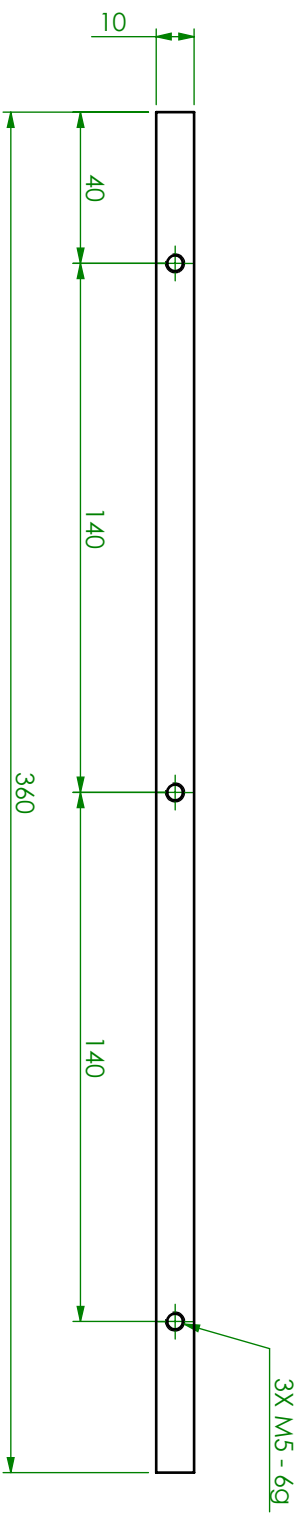
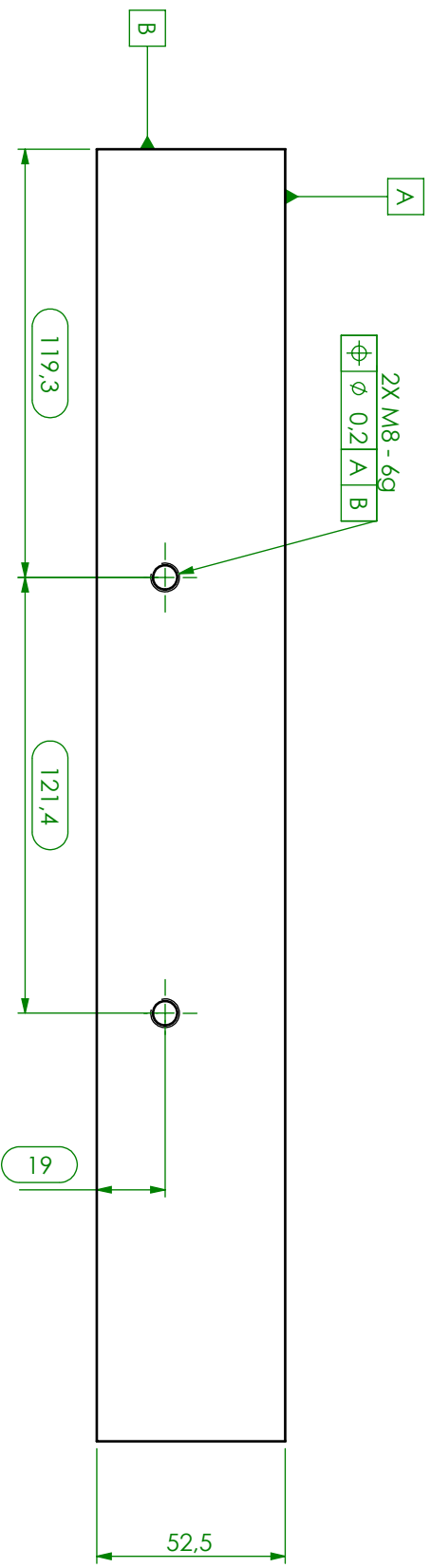
$\sqrt{Ra\ 3,2}$ ($\sqrt{Ra\ 0,8}$)

PROJETO		André Correia	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DESENHO		1151430	INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
COPROJ			Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431
REVISÃO			4200-072 Porto
			WWW.DEM.ISEP-IPP.PT
ESCALA	1:2	COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0201	DES. Nº 0201
TOLER.			
			SUBSTITUI
			SUBSTITUÍDO



TOLER: ISO 8015
 ISO 2768 - mK
 Ra 3,2

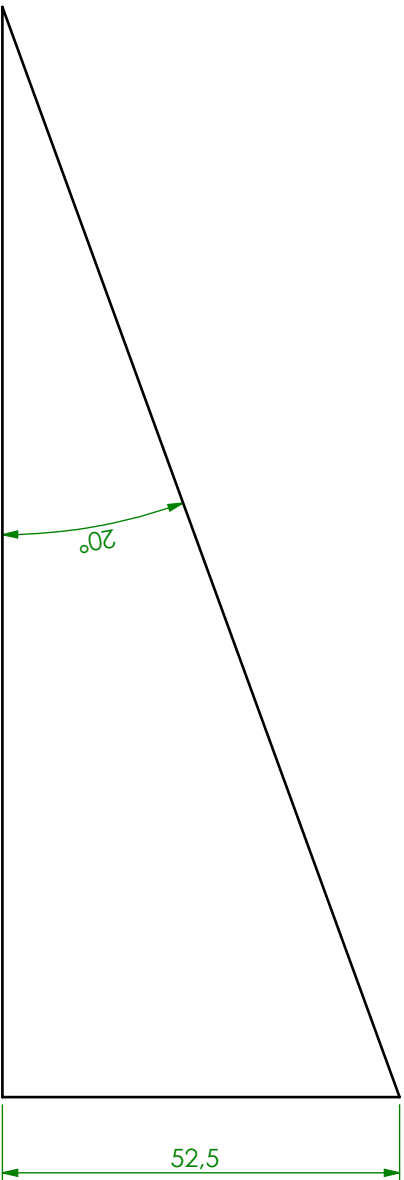
PROLECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto www.dem.isep.ipp.pt
DESENHOU			
COPIOU			
VERIFICOU			
ESCALA	1:2	COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0202	DES. Nº 0202
TOLER.			
SUBSTITUI			
SUBSTITUIDO			



TOLER. ISO 8015
 ISO 2768 - mK

\sqrt{Ra} 3,2

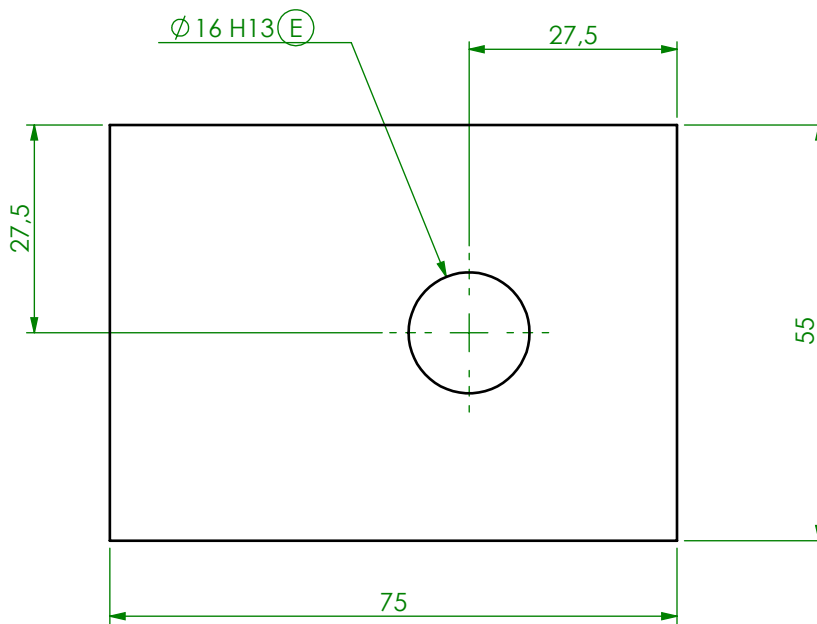
PROJECTOU				
DESENHOU				
COPIOU				
VERIFICOU				
ESCALA	1:2	André Correia 1151430		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto www.dem.isep.ipp.pt
TOLER.	COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0203			DES. Nº 0203



ISO 2768 - mK

 Ra 3,2

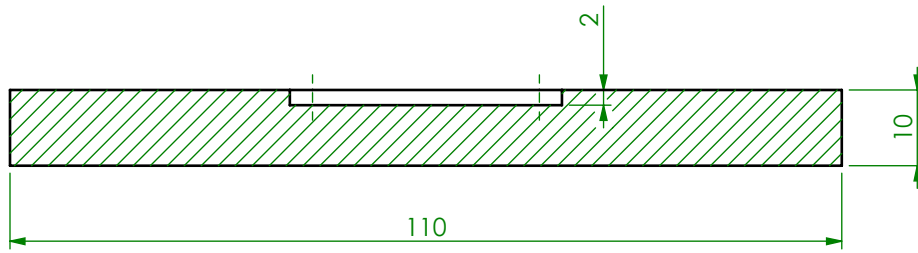
PROJECTOU																	
DESENHOU																	
COPIOU																	
VERIFICOU																	
ESCALA	1:1	<p style="text-align: center;">André Correia 1151430</p>			<p>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto www.dem.isep.ipp.pt</p>												
TOLER.					<p style="text-align: center;">COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0204</p>			<p>DES. Nº 0204</p>									
								<table border="1"> <tr> <td>SUBSTITUI</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>SUBSTITUIDO</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	SUBSTITUI						SUBSTITUIDO		
SUBSTITUI																	
SUBSTITUIDO																	



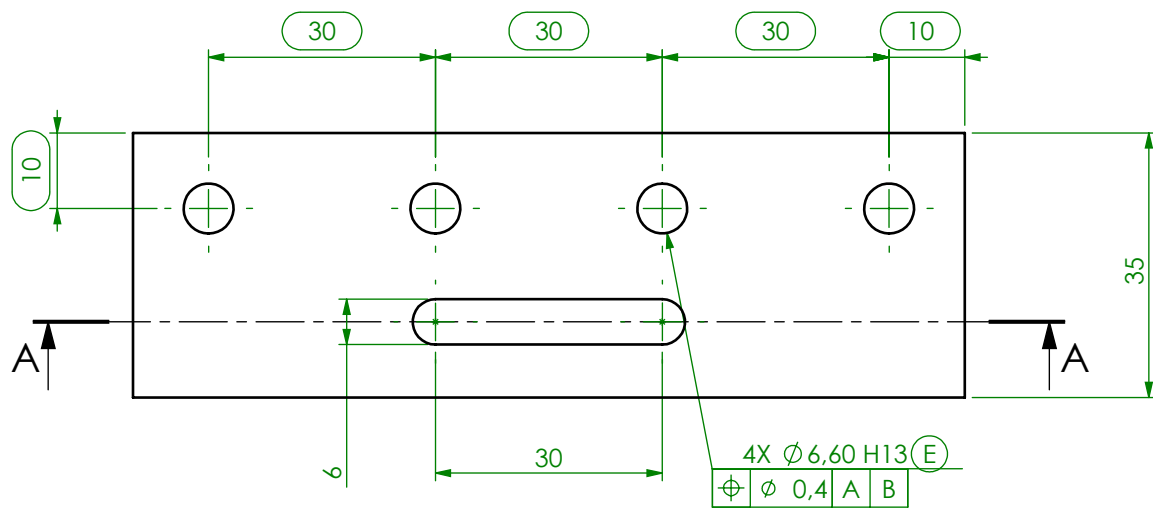
TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

$\sqrt{Ra 3,2}$

PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT			
DESENHOU						
COPIOU						
VERIFICOU						
ESCALA	1:1	COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0207	DES. Nº 0207			
TOLER.						
			SUBSTITUI			
			SUBSTITUIDO			



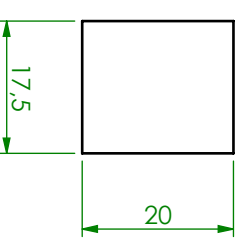
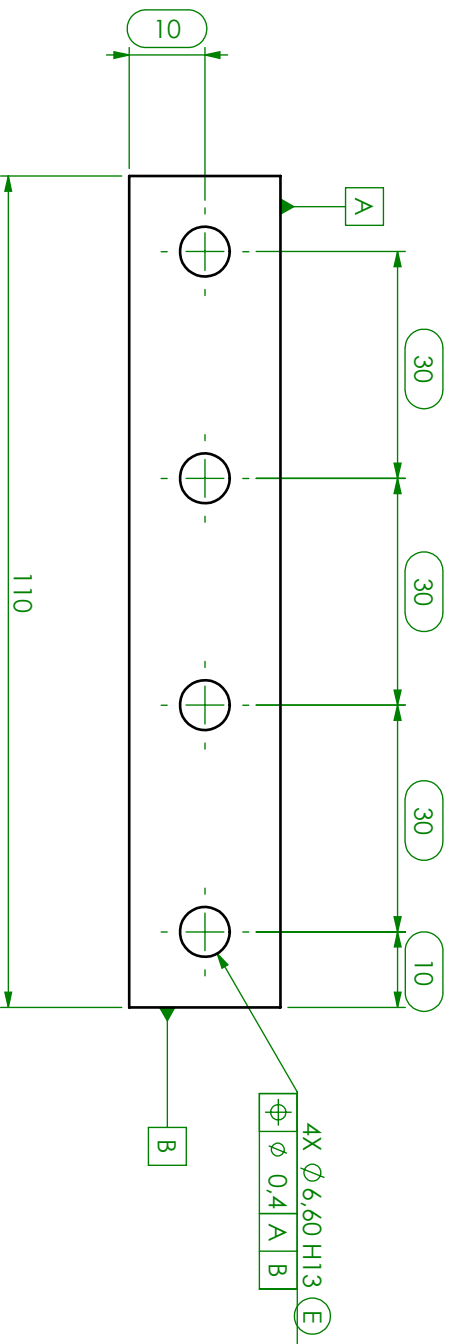
CORTE A-A



TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK



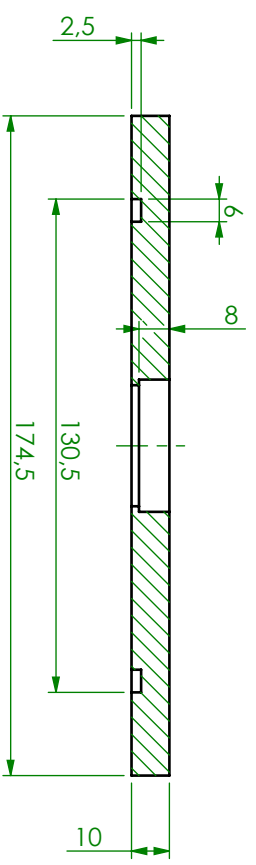
PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT			
DESENHOU						
COPIOU						
VERIFICOU						
ESCALA	1:1	COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0208	DES. Nº 0208			
TOLER.						
			SUBSTITUI			
			SUBSTITUIDO			



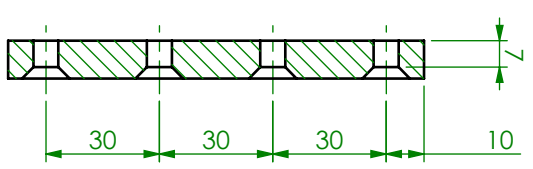
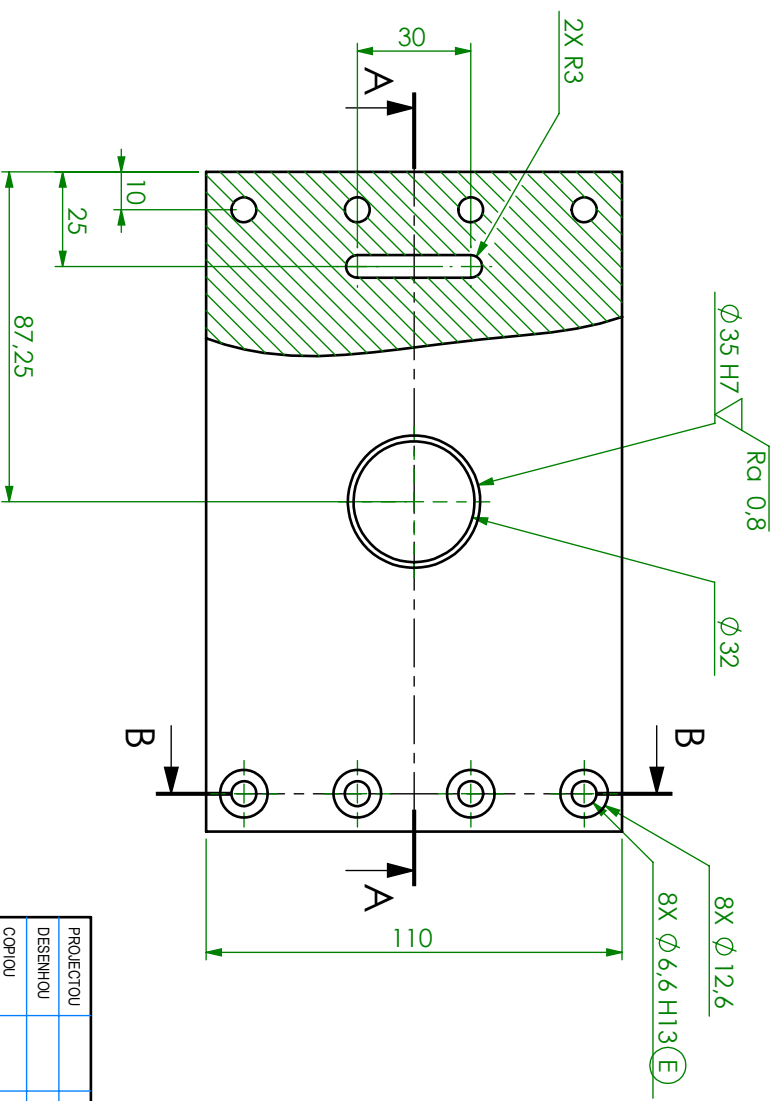
TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

Ra 3,2

PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto www.dem.isep.ipp.pt
DESENHOU			
COPIOU			
VERIFICOU			
ESCALA	1:1	COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0209	DES. Nº 0209
TOLER.			
			SUBSTITUI SUBSTITUIDO



CORTE A-A

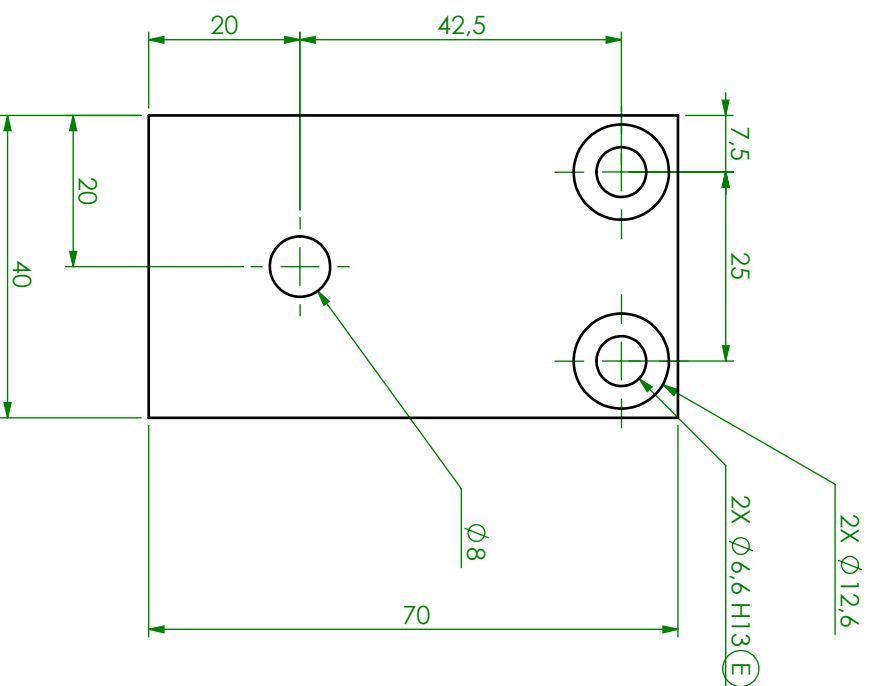
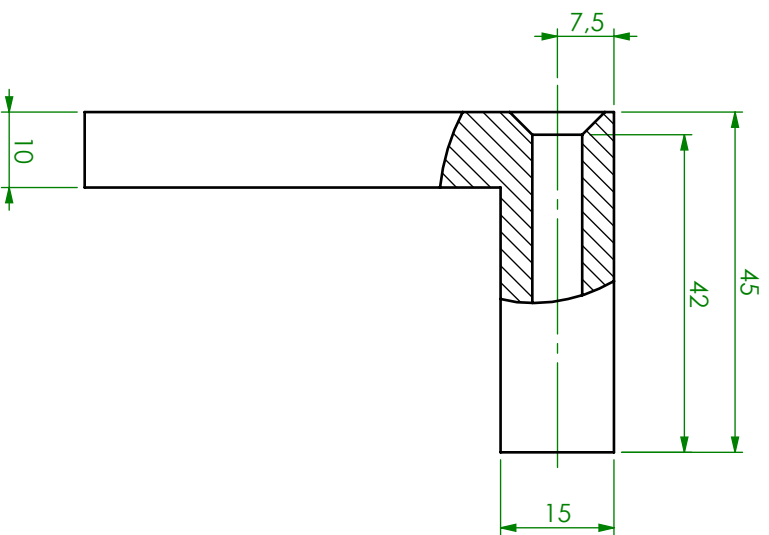


CORTE B-B

√ Ra 3,2 (√ Ra 0,8)

TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

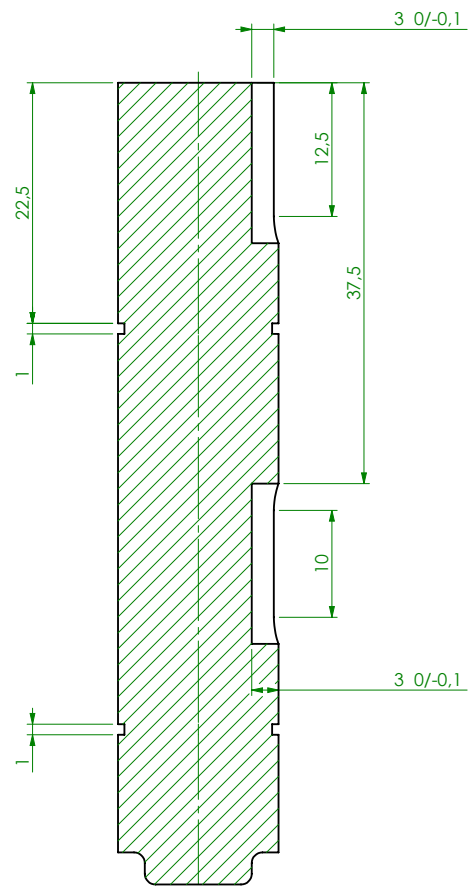
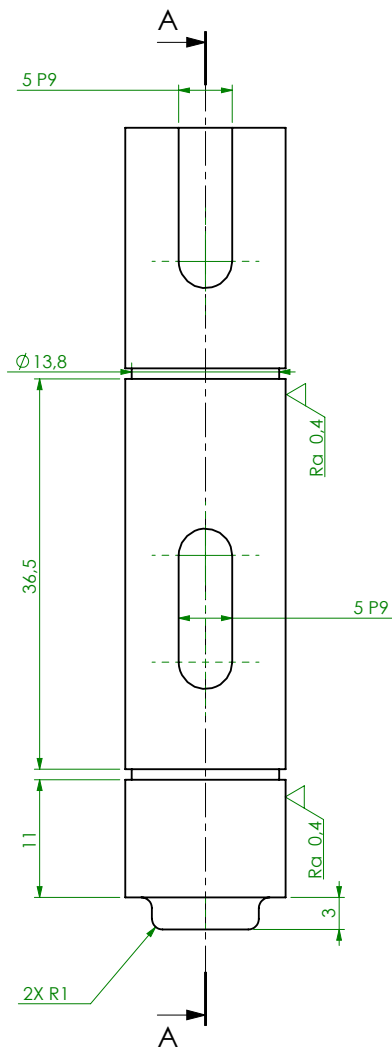
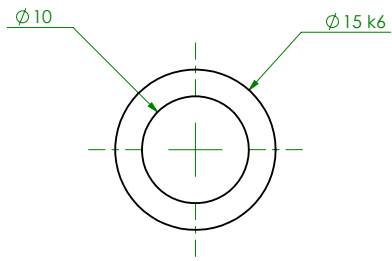
PROJECTOU		<p>André Correia 1151430</p>	<p>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto www.dem.isep.ipp.pt</p>
DESENHOU			
COPIOU			
VERIFICOU			
ESCALA	1:2		
<p>COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0210</p>		DES. Nº 0210	
TOLER.			
SUBSTITUI			
SUBSTITUIDO			



TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

$\sqrt{Ra\ 3,2}$

PROJECTOU		André Correia	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DESENHOU		1151430	INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
COPIOU			Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431
VERIFICOU			4200-072 Porto
ESCALA	1:1		WWW.DEMISEP.IPP.PT
TOLER.		<p>COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0211</p> <p>DES. Nº0211</p>	

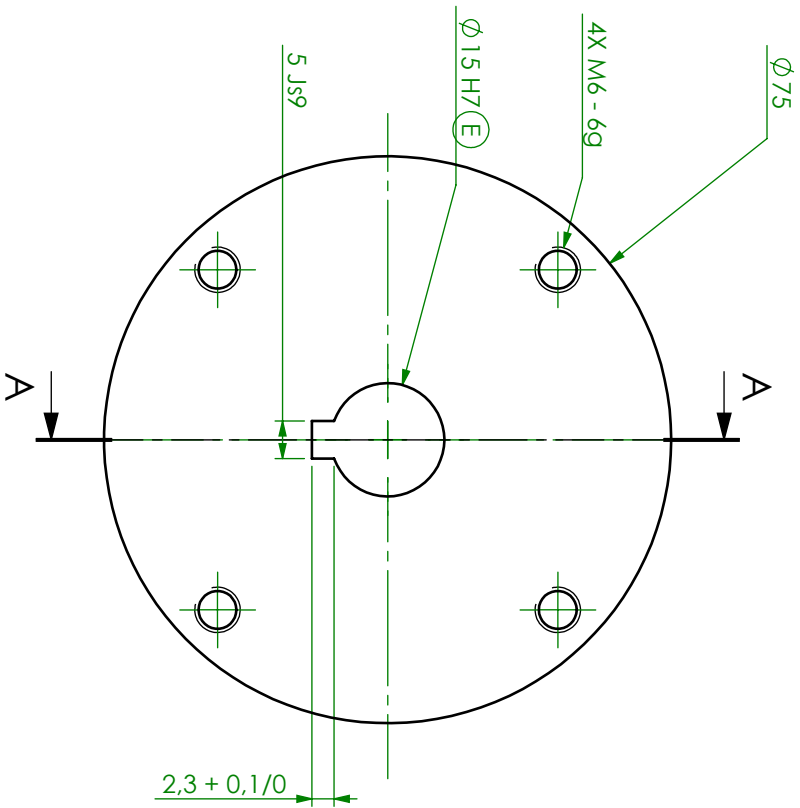


CORTE A-A

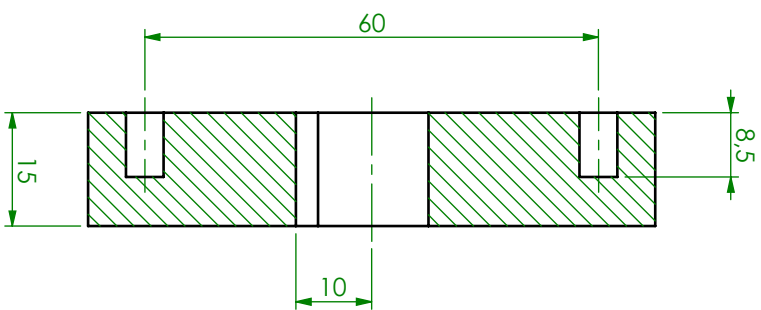
TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

$\sqrt{Ra\ 3,2}$ ($\sqrt{Ra\ 0,4}$)

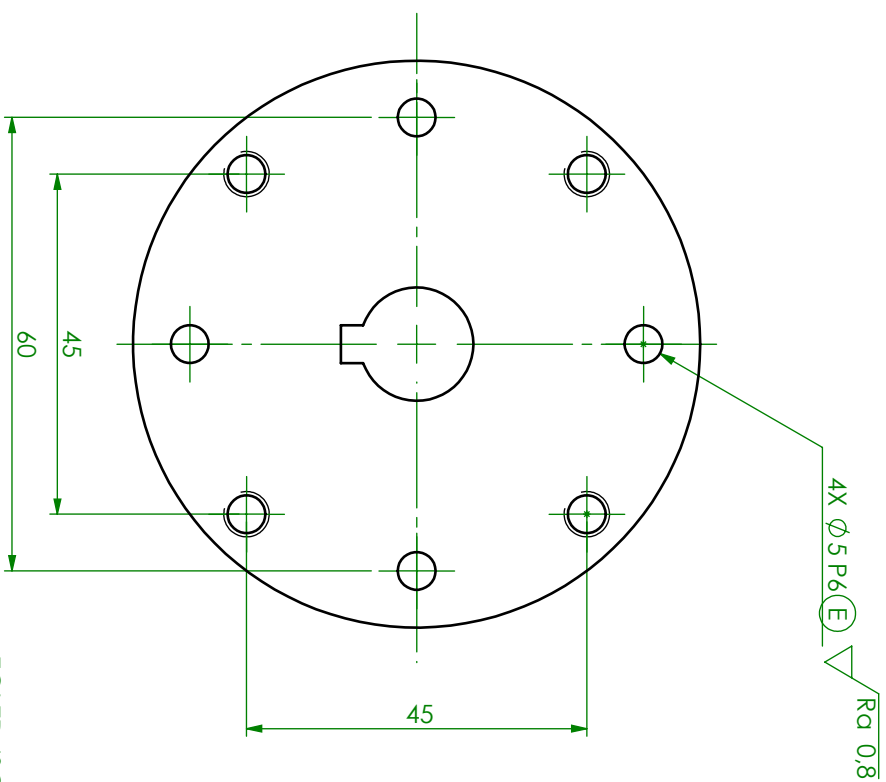
PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT			
DESENHOU						
COPIOU						
VERIFICOU						
ESCALA	2:1	COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0213	DES. Nº 0213			
TOLER.						
			SUBSTITUI			
			SUBSTITUÍDO			



$2,3 + 0,1/0$



CORTE A-A

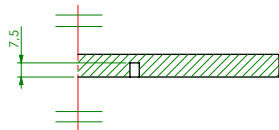
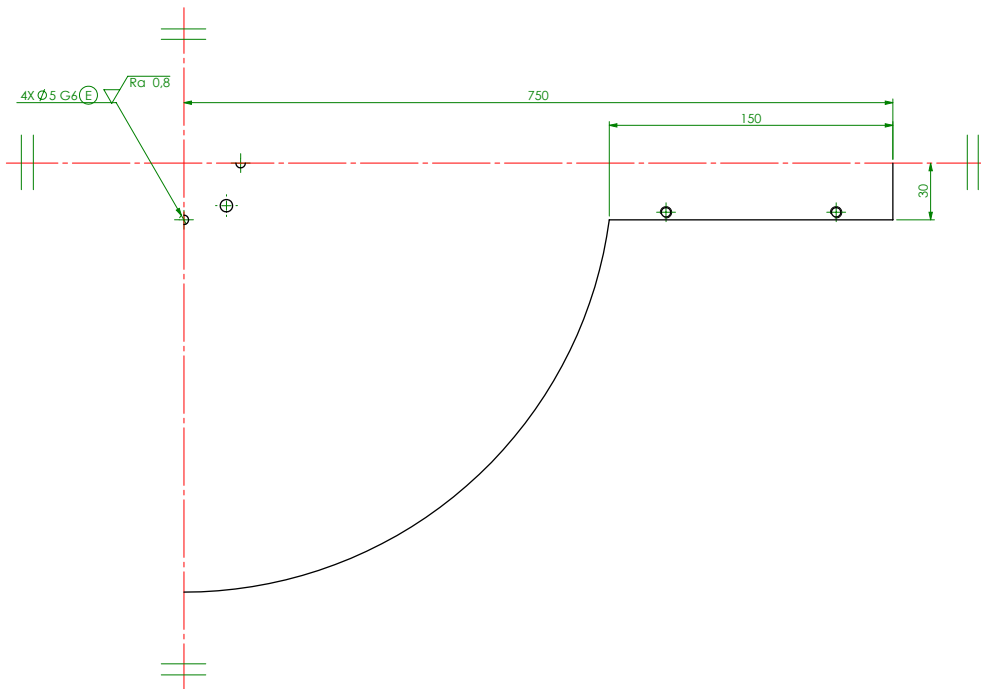


TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

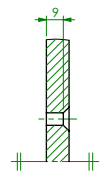
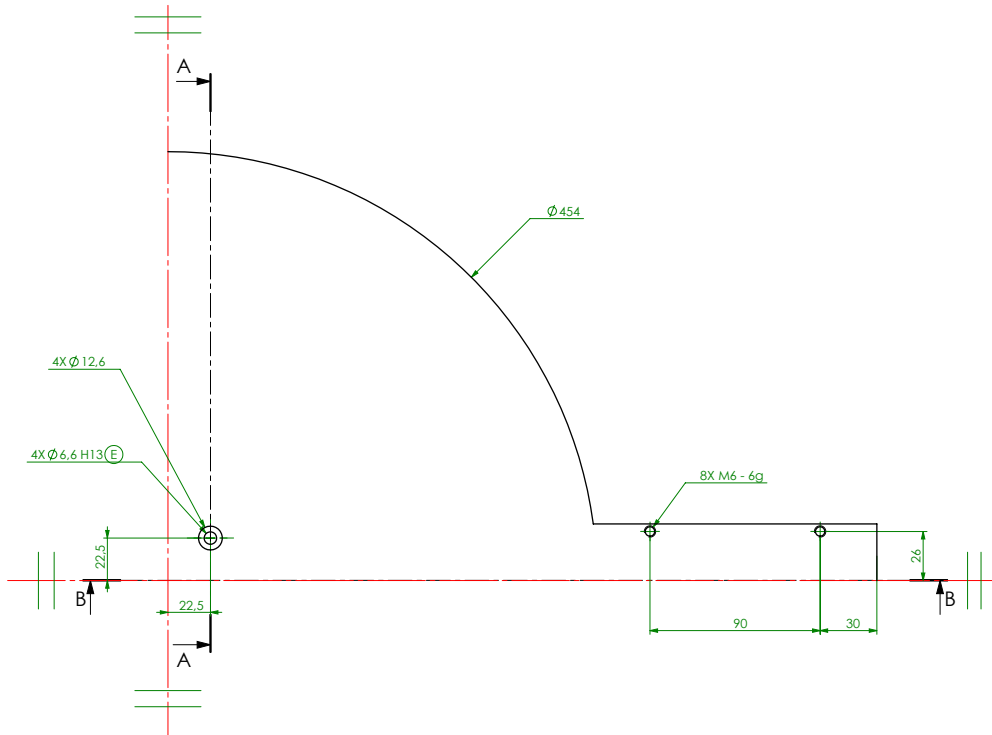
PROJECOU		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA
DESENHOU		INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
COPIOU		Rua Dr. Antonio Bernardino de Almeida, 431
VERIFICOU		4200-072 Porto
ESCALA	1:1	WWW.DEMISEP.IPP.PT
TOLER.		
COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0214		DES. Nº 0214
		SUBSTITUI SUBSTITUIDO

André Correia
1151430

DES. Nº 0214



CORTE B-B

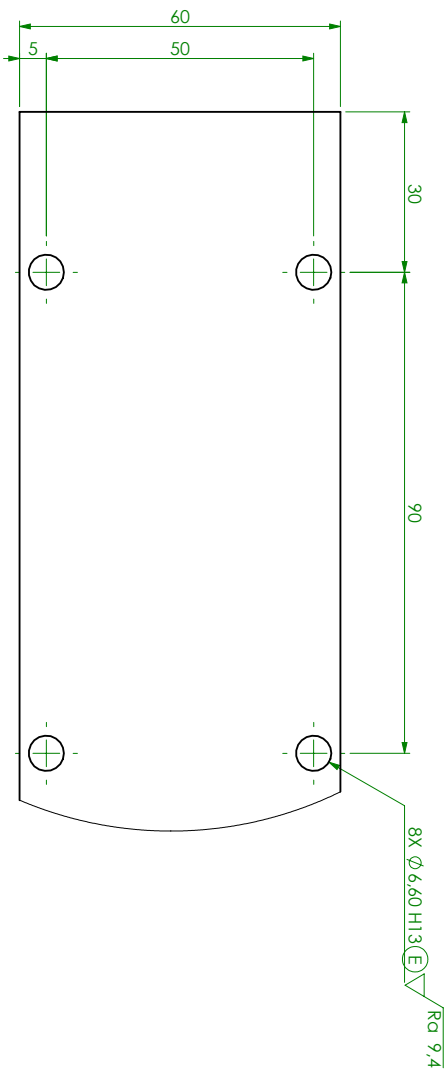
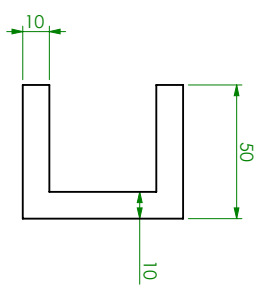
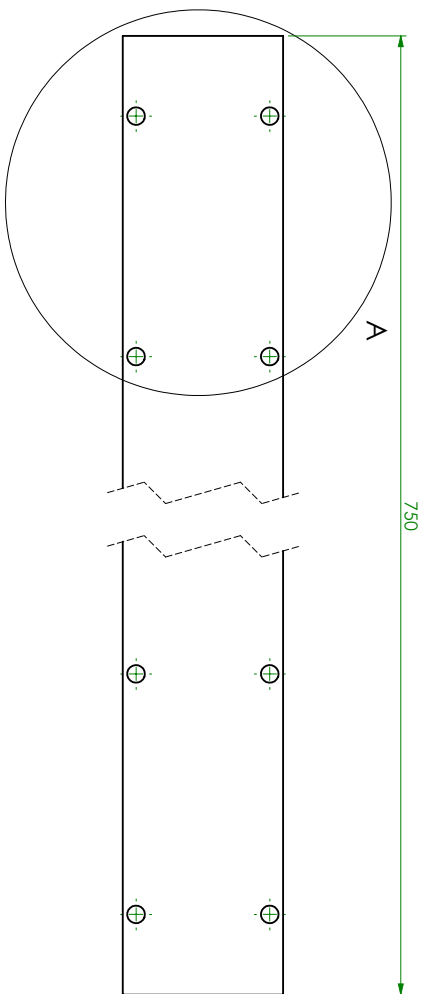


CORTE A-A

TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

$\sqrt{Ra\ 1,6}$ ($\sqrt{Ra\ 0,8}$)

PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.PP.PT
DESENHOU			
COPION			
VERIFICOU			
ESCALA	1:2	COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0215	DES. Nº 0215
TOLER.			
			SUBSTITUIU
			SUBSTITUIU

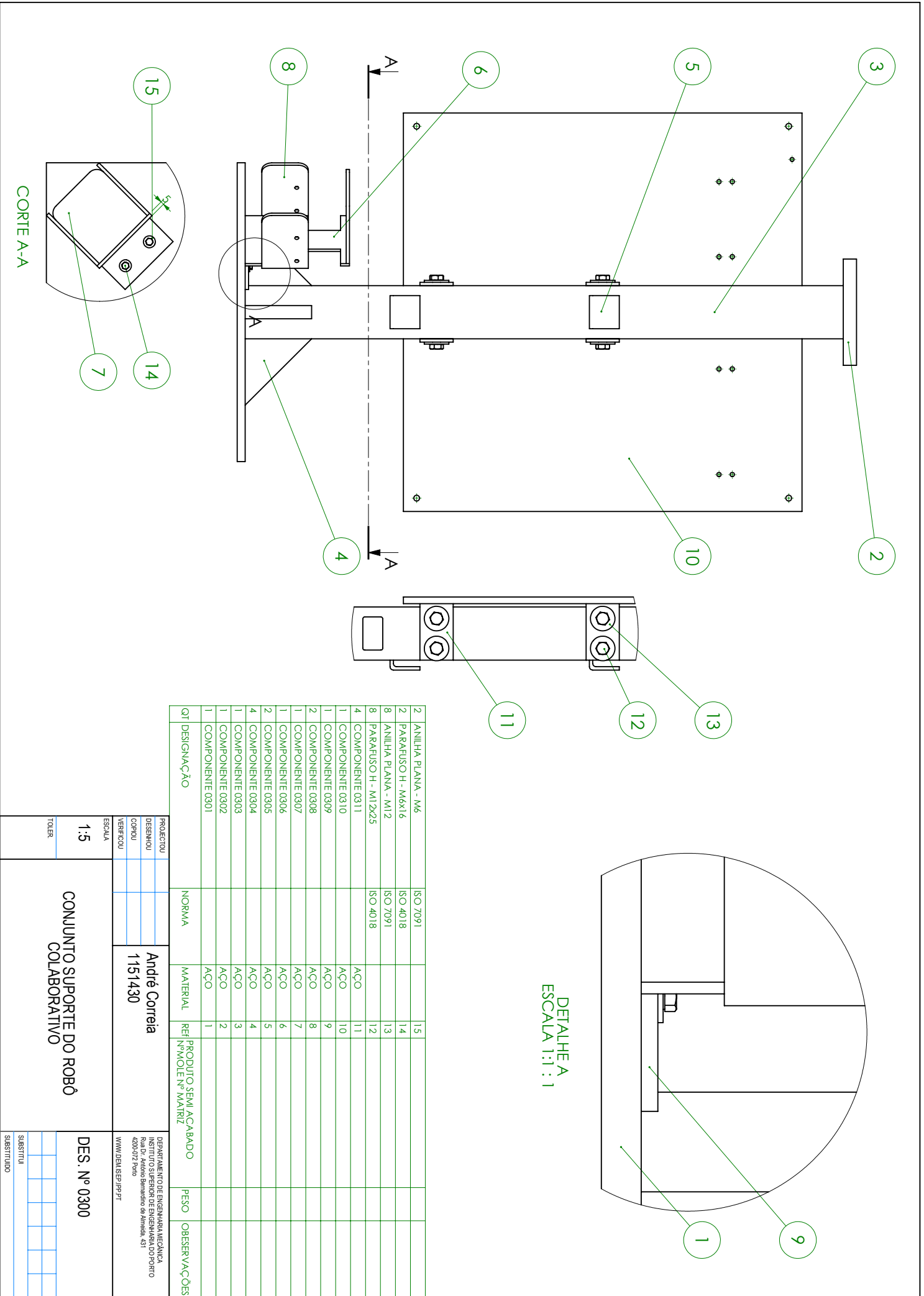


DETALHE A
ESCALA 1:1

$\sqrt{Ra\ 1,6}$ ($\sqrt{Ra\ 9,4}$)

TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

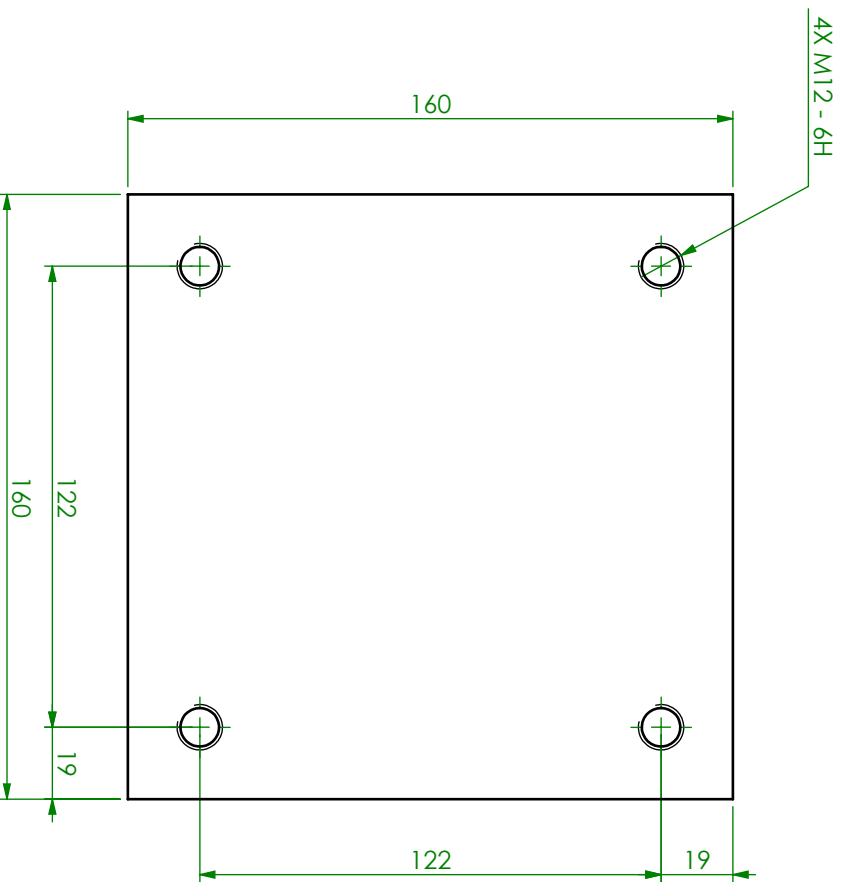
PROJETOU		André Correia	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA
DESENHOU		1151430	INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
COPROU			Rua do Campo das Abelhas, 431
VERIFICOU			4200-372 Porto
ESCALA	1:2		WWW.DEA.ISEP.PT
TOLER	COMPONENTE SISTEMA DE ROTAÇÃO 0216		DES. Nº 0216
			SUBSTITUI
			SUBSTITUIDO



QTD	DESIGNAÇÃO	NORMA	MATERIAL	REF. N°MOLE	PRODUTO SEMI ACABADO	PESO	OBSERVAÇÕES
2	ANILHA PLANA - M6	ISO 7091		15			
2	PARAFUSO H - M6x16	ISO 4018		14			
8	ANILHA PLANA - M12	ISO 7091		13			
8	PARAFUSO H - M12x25	ISO 4018		12			
4	COMPONENTE 0311		AÇO	11			
1	COMPONENTE 0310		AÇO	10			
1	COMPONENTE 0309		AÇO	9			
2	COMPONENTE 0308		AÇO	8			
1	COMPONENTE 0307		AÇO	7			
1	COMPONENTE 0306		AÇO	6			
2	COMPONENTE 0305		AÇO	5			
4	COMPONENTE 0304		AÇO	4			
1	COMPONENTE 0303		AÇO	3			
1	COMPONENTE 0302		AÇO	2			
1	COMPONENTE 0301		AÇO	1			

PROJECOU		ANDRÉ CORREIA	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA
DESENHOU			INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
COPROU		1151430	Rua do Padre Bernardino de Almeida, 431
VERIFICOU			4030-512 Porto
ESCALA			WWW.DEAISEP.PT

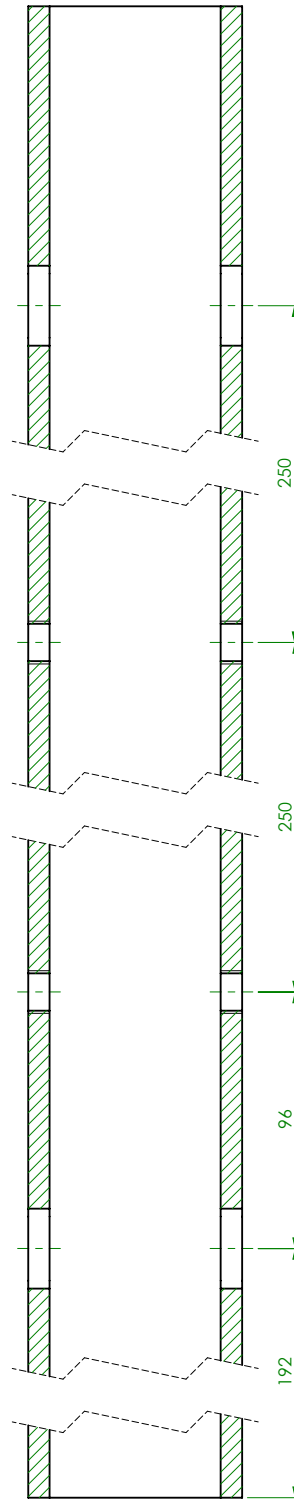
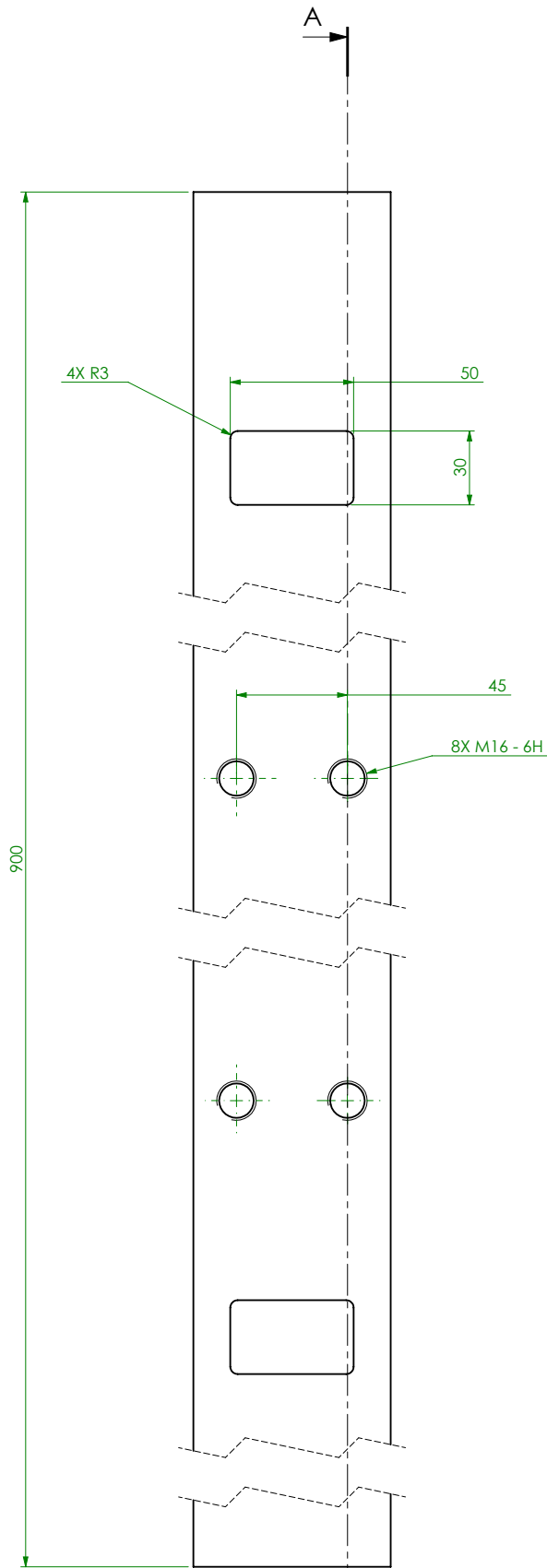
ESCALA	1:5	CONJUNTO SUPORTE DO ROBÓ COLABORATIVO	DES. Nº 0300
TOLER			SUBSTITUI
			SUBSTITUIDO



TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

\sqrt{Ra} 3,2

PROJECTOU				
DESENHOU				
COPIOU				
VERIFICOU				
ESCALA	1:2	André Correia 1151430		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto www.dem.isep.ipp.pt
TOLER.	COMPONENTE SUPORTE DO ROBÔ 0302		DES. Nº. 0302	SUBSTITUI SUBSTITUÍDO



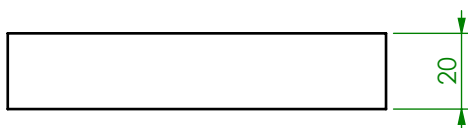
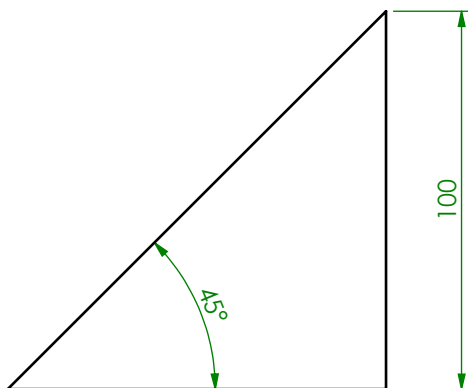
CORTE A-A

TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

$\sqrt{Ra\ 3,2}$

PERFIL QUADRADO 80 x 8

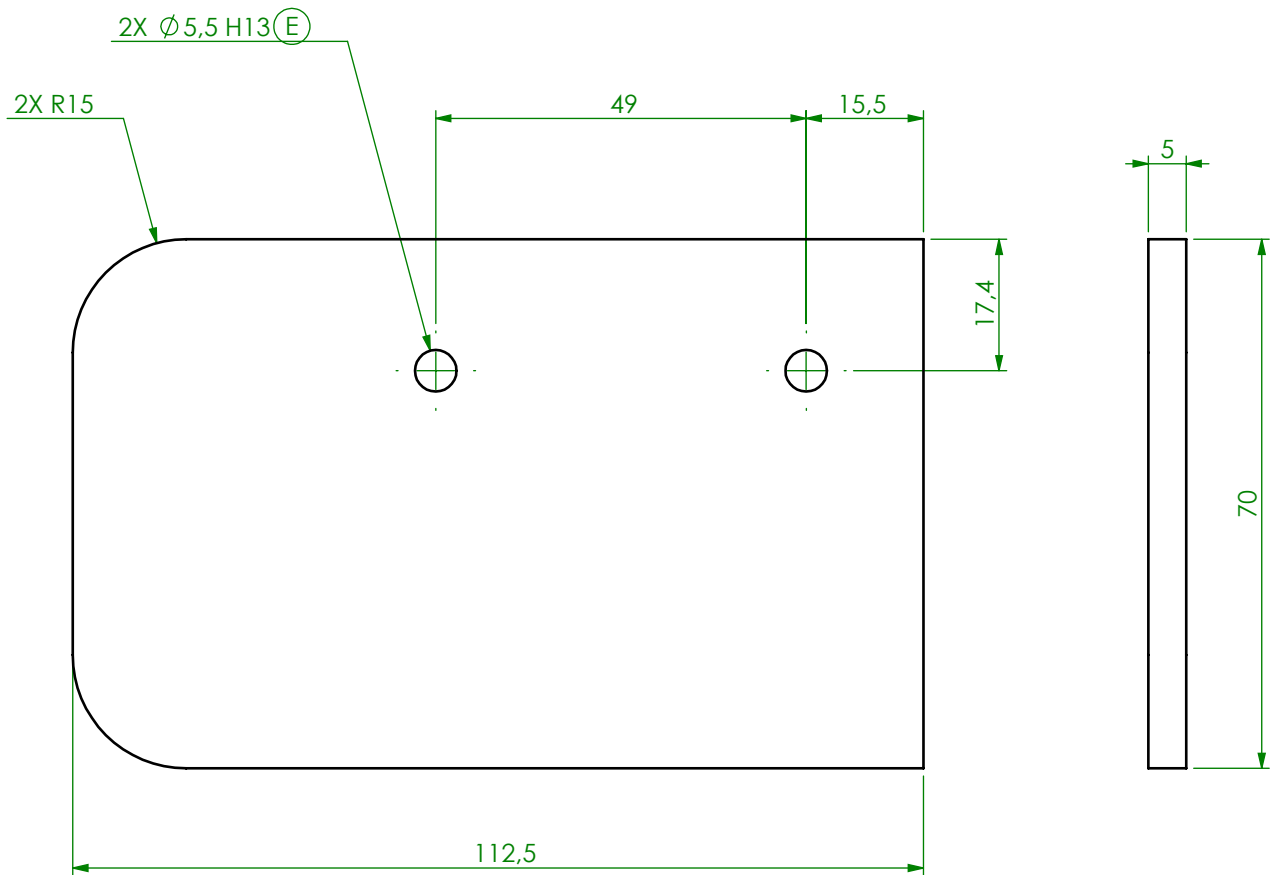
PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT																					
DESENHOU																								
COPIOU																								
VERIFICOU																								
ESCALA	1:2	COMPONENTE SUPORTE DO ROBÔ 0303	DES. Nº 0303																					
TOLER.			<table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td colspan="6">SUBSTITUI</td> </tr> <tr> <td colspan="6">SUBSTITUIDO</td> </tr> </table>										SUBSTITUI						SUBSTITUIDO					
SUBSTITUI																								
SUBSTITUIDO																								



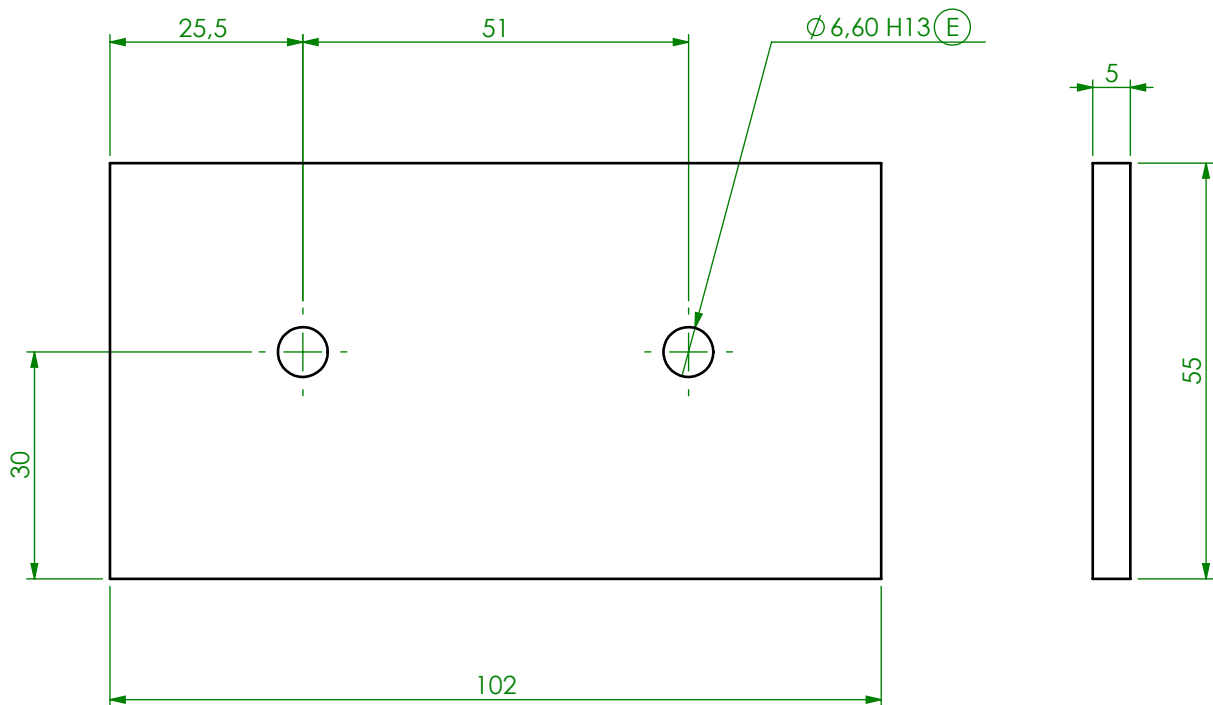
ISO 2768 - mK



PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT			
DESENHOU						
COPIOU						
VERIFICOU						
ESCALA	1:2	COMPONENTE SUPORTE DO ROBÔ 0304	DES. N° 0304			
TOLER.						
			SUBSTITUI			
			SUBSTITUIDO			



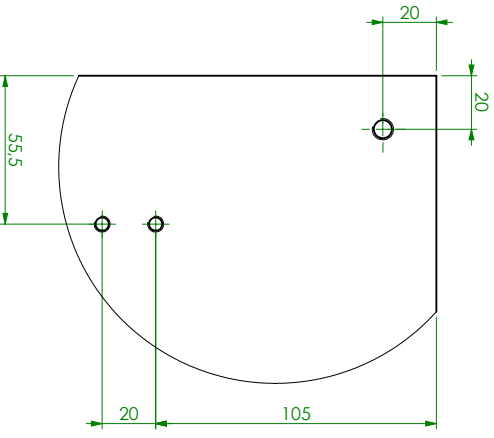
PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT			
DESENHOU						
COPIOU						
VERIFICOU						
ESCALA	1:1	COMPONENTE SUPORTE DO ROBÔ 0308	DES. Nº 0308			
TOLER.						
			SUBSTITUI			
			SUBSTITUIDO			



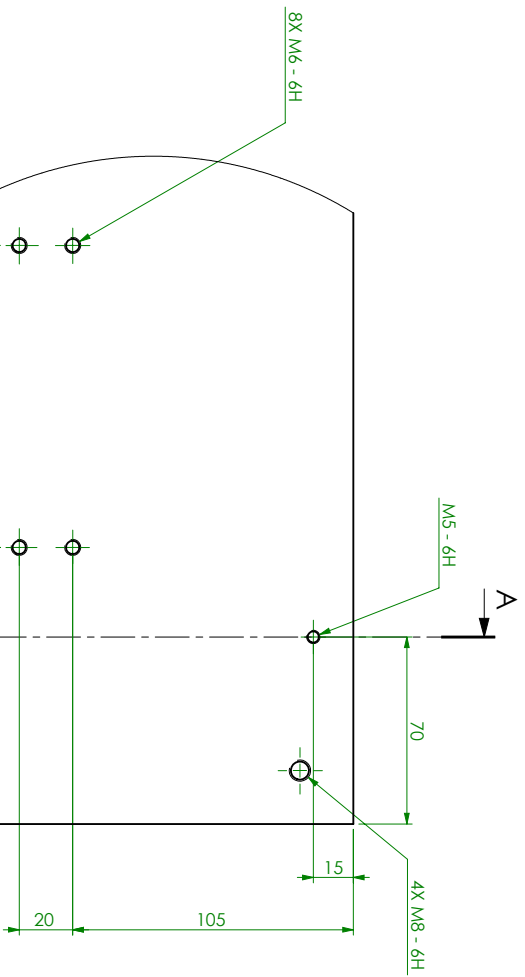
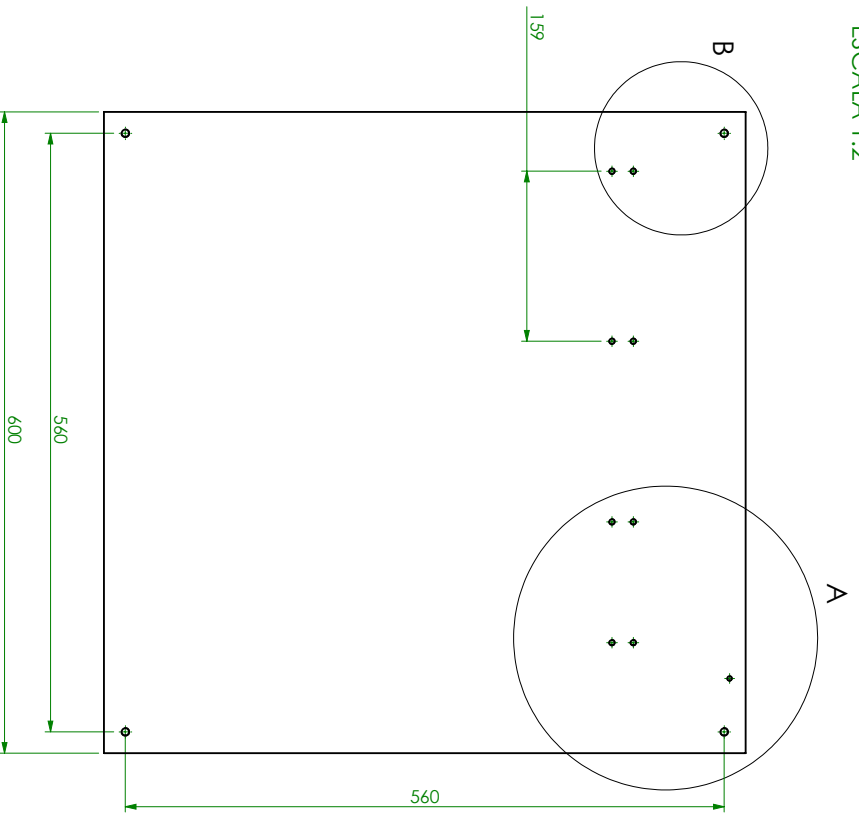
TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

$\sqrt{Ra\ 3,2}$

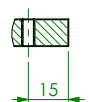
PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT			
DESENHOU						
COPIOU						
VERIFICOU						
ESCALA	1:1	COMPONENTE SUPORTE DO ROBÔ 0309	DES. Nº 0309			
TOLER.						
			SUBSTITUI			
			SUBSTITUIDO			



DETAILHE B
ESCALA 1:2



CORTE A-A



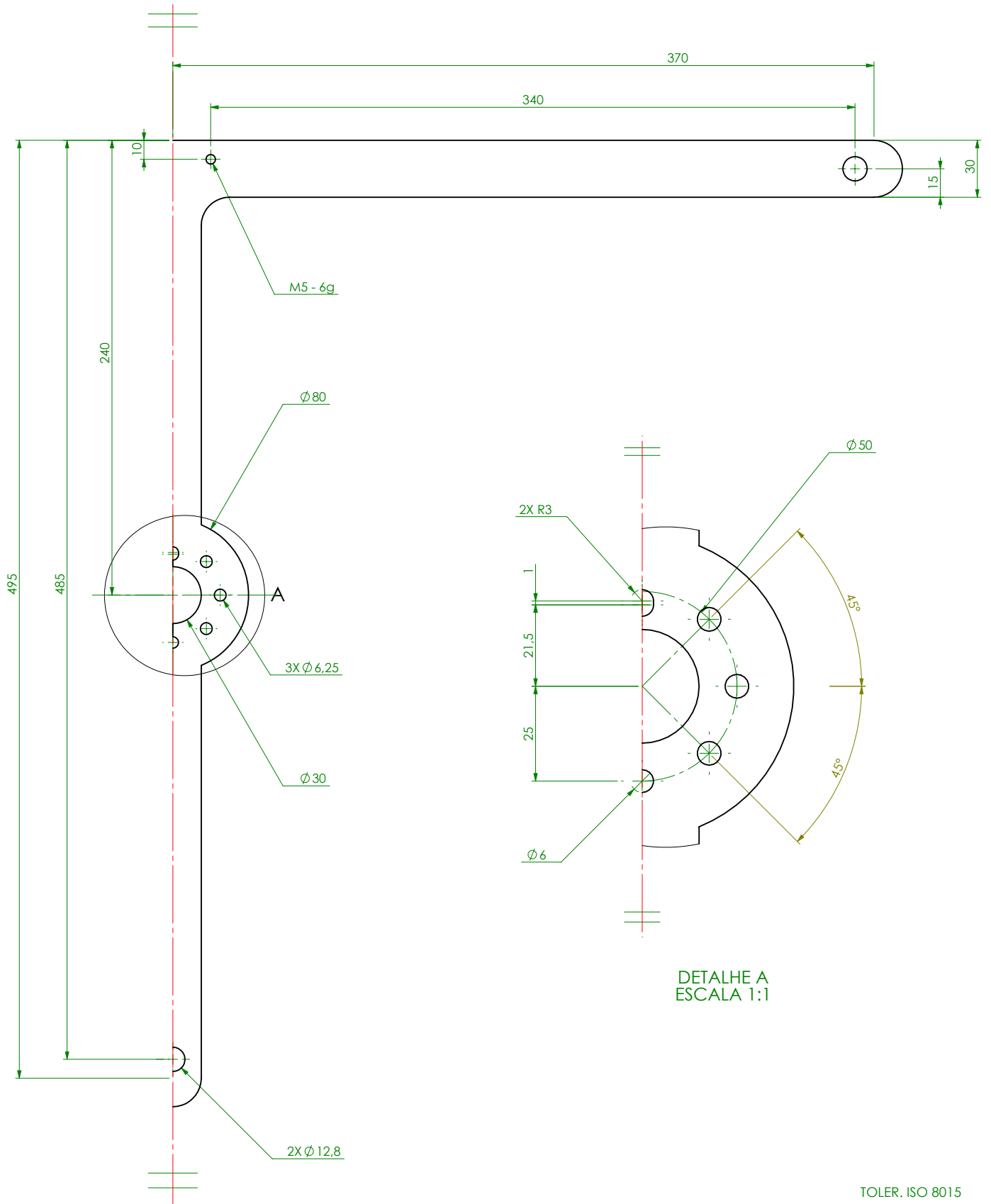
DETAILHE A
ESCALA 1:2

TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK
Ra 3,2

PROJETO			
DESENHO			
COPROJ			
VERIFICOU			
ESCALA	1:5		
COMPONENTE SUPORTE DO ROBÔ 0310		DES. Nº 0310	
SUBSTITUI			
SUBSTITUIDO			

André Correia
1151430

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
Rua do Campo das Máquinas, 137
4200-372 Porto
WWW.DEA.ISEP.PP.PT



DETALHE A
ESCALA 1:1

TOLER. ISO 8015
ISO 2768 - mK

$\sqrt{\text{Ra } 3,2}$

PROJECTOU		André Correia 1151430	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT			
DESENHOU						
COPIOU						
VERIFICOU						
ESCALA	1:2	COMPONENTE MÃO-PRESA 0401	DES. Nº 0401			
TOLER.						
			SUBSTITUI			
			SUBSTITUIDO			