

Desenvolvimento de um equipamento industrial de preparação de amostras para caracterização morfológica de elementos soldados

JOSÉ PEDRO FLORES RIBEIRO FREITAS
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadores:

Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão
Doutor Rui Manuel Ferreira Leal

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Vogais:

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes
Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão

Desenvolvimento de um equipamento industrial de preparação de amostras para caracterização morfológica de elementos soldados

JOSÉ PEDRO FLORES RIBEIRO FREITAS
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadores:

Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão, ISEL/IPL
Doutor Rui Manuel Ferreira Leal, IPLeiria

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes, ISEL/IPL

Vogais:

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes, ISEL/IPL
Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão, ISEL/IPL

Agradecimentos

O desenvolvimento do presente trabalho contou com uma alargada base de apoio e oportunidades facultadas por parte de pessoas e entidades sem as quais nunca teria sido possível a sua consecução. Por isto, pretendo particularizar cada um dos envolvidos de modo a perpetuar a gratidão que sinto.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Doutor Ivan Galvão, do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, e ao Professor Doutor Rui Leal, do Instituto Politécnico de Leiria, por toda a orientação e contribuições que facultaram durante a execução deste Trabalho Final de Mestrado.

Em segundo lugar, agradeço a toda a MCG pelo acolhimento do estágio curricular que levou a cabo a elaboração deste trabalho, por todas as condições e ferramentas disponibilizadas para tal, e ainda por todo ambiente acolhedor que recebi desde o primeiro dia. Gostaria de individualizar:

Paulo Sousa, Engenheiro de Industrialização (MCG *Automotive*), por ter sido o meu tutor no seio da empresa e por me ter acompanhado continuamente ao longo deste período.

Vitor Pereira, Diretor de Industrialização (MCG *Automotive*), Sofia Lino, Recursos Humanos (MCG), e Carlos Saraiva, *General Manager* (MCG *Automotive*), por toda a abertura que tiveram em acolher e organizar a minha estadia na empresa.

Daniel Bento, Supervisor de Laboratórios de Metrologia e Ensaios (MCG *Automotive*), bem como Filipe Simões e Luis Silva, Técnicos Qualidade Fornecedores, SQA, Laboratório Metrologia e Ensaios (MCG *Automotive*), por toda a disponibilidade que tiveram no fornecimento de informação e esclarecimento de dúvidas referentes ao processo em estudo.

Agradecer ainda a Daniel Augusto, Supervisor de Manutenção de Equipamentos (MCG *Automotive*), Pedro Silva, Manutenção de Equipamentos (MCG *Automotive*), Luis Pereira, *Supply Chain* (MCG), e Joaquim Boavida, Supervisão de Montagem de Ferramentas (MCG *Automotive*) por todos os contributos significativos que ofereceram à realização deste projeto.

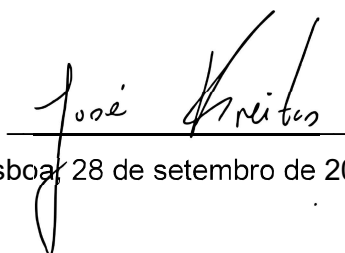
A toda a minha família e amigos.

E, por último, um especial obrigado aos meus pais e ao meu irmão.

Declaração de integridade

Declaro que este relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

A handwritten signature in black ink, reading "José Brito", is written over a horizontal line. The signature is fluid and cursive.

Lisboa, 28 de setembro de 2024

Desenvolvimento de um equipamento industrial de preparação de amostras para caracterização morfológica de elementos soldados

Resumo

A empresa MCG *Automotive* enfrentava dificuldades num processo de corte destinado à preparação de amostras metalográficas, tanto no que concerne à qualidade dos cortes bem como ao tempo despendido para tal. Fruto da ausência de soluções comerciais que atendessem de forma adequada e economicamente viável às suas necessidades, a decisão assentou por uma abordagem de desenvolvimento interno de um equipamento customizado ao processo. Posto isto, o presente trabalho aborda o desenvolvimento de um equipamento automatizado de corte destinado à preparação de amostras metalográficas do processo em causa.

O principal objetivo do presente trabalho foi projetar um automatismo de corte para preparação de amostras para caracterização morfológica de componentes soldados, mais concretamente, de um Braço de Controlo de Suspensão. O equipamento deveria ser o mais customizado possível de modo a atender ao processo em causa, integrando elementos obtidos externamente numa lógica chave-na-mão enquanto, paralelamente, se faça uso do máximo de recursos internos (mão de obra, tecnologias de fabrico, etc.), visando alcançar uma solução que cumprisse com os requisitos definidos, satisfazendo as necessidades e capacidades da MCG.

O projeto teve suporte da ferramenta CAD *Siemens NX* para modelação tridimensional dos componentes e montagem de sistemas, enquanto o *SolidWorks* foi empregue para simulações CAE em situações específicas. Este trabalho concentra-se na apresentação de uma solução construtiva robusta que suprima os principais entraves sentidos no processo executado à data, deixando a fase de automação e eletrificação para um estágio subsequente.

Os resultados presumem que a solução desenvolvida pode, efetivamente, melhorar a eficiência e a precisão do processo de preparação de amostras, proporcionando uma base sólida para futuras otimizações e integrações tecnológicas. A implementação deste equipamento prevê uma redução do tempo de operação de 86,5% bem como prevê uma redução de 33,5% nos custos operacionais.

Palavras-chave: Metalografia; Amostras; Corte; Projeto; Automatismo

Development of an industrial equipment for sample preparation for morphological characterization of welded elements

Abstract

MCG Automotive faced challenges in a cutting process intended for the preparation of metallographic samples, concerning both the quality of cuts and the time spent on this task. Due to the lack of commercial solutions that adequately and economically met their needs, the decision was made to pursue an internal development approach for a customized piece of equipment. Accordingly, this work addresses the development of automated cutting equipment designed for the preparation of metallographic samples relevant to the process in question.

The main objective of this work was to design a cutting automation system for the preparation of samples for the morphological characterization of welded components, specifically for a Suspension Control Arm. The equipment was to be as customized as possible to meet the specific process requirements, integrating externally sourced components in a turnkey solution while maximizing the use of internal resources (labor, manufacturing technologies, etc.) to achieve a solution that satisfied the defined requirements and the capabilities of MCG.

The project utilized Siemens NX CAD software for the three-dimensional modeling of components and system assembly, while SolidWorks was employed for CAE simulations in specific situations. This work focuses on presenting a robust constructive solution that addresses the main obstacles currently faced in the process, deferring the automation and electrification phase to a subsequent stage.

Results indicate that the developed solution can effectively improve the efficiency and precision of the sample preparation process, providing a solid foundation for future optimizations and technological integrations. The implementation of this equipment is expected to result in an 86.5% reduction in operation time and a 33.5% reduction in operational costs.

Keywords: Metallography, Samples, Cut, Design; Automatism

Lista de Símbolos e de siglas

Alfabeto romano

b	Braço de momento de força
C	Capacidade da carga dinâmica
c	Distância da linha neutra da secção transversal à fibra mais distante
c.s.	Coefficiente de segurança
C_0	Capacidade de carga estática
$C_{cilindro}$	Curso do cilindro
E	Módulo de elasticidade longitudinal
F	Carga dinâmica
F_0	Força equivalente estática
F_{aperto}	Força de aperto
$F_{ascendente}$	Força mínima do cilindro no movimento ascendente
$F_{cilindro}$	Força do cilindro hidráulico
$F_{descendente}$	Força do cilindro mínima no movimento descendente
F_g	Força gravítica
f_l	Fator de esforços dinâmicos
f_n	Fator de rotação
F_r	Força radial
f_t	Fator de temperatura
F_t	Força tangencial
g	Aceleração gravítica
G	Módulo de rigidez ao corte
H_m	Altura manométrica
h_l	Perdas de carga
I	Momento de inércia da secção transversal
i	Relação de transmissão
$I_{carga,n}$	Momento de inércia de massa da carga aplicada
I_m	Momento de inércia de massa
$I_{parafuso}$	Momento de inércia de massa do parafuso
$I_{servomotor}$	Momento de inércia do servomotor
$I_{sistema,n}$	Momento de inércia de massa do sistema de movimento linear
J_0	Momento polar de inércia
K	Constante de rosca
K_c	Pressão específica de corte

L	Distância
l_{corte}	Largura de corte
$L_{\text{mangueira}}$	Comprimento da mangueira
L_{veio}	Comprimento do veio
m	Massa
$M_{\text{flexão}}$	Momento de flexão da mesa rotativa
n	Velocidade de rotação
p	Passo de rosca
P	Pressão
P_{bomba}	Potência da bomba de refrigeração
P_c	Potência de corte
p_{corte}	Profundidade de corte
P_{motor}	Potência do motor
Q	Caudal
r	Raio
R_{disco}	Força de reação do disco
R_e	Número de Reynolds
R_m	Resistência à tração
T	Binário resultante no veio
t	Tempo de aceleração
T_{aperto}	Binário de aperto de parafuso
T_{disco}	Binário do disco de corte
T_{motor}	Binário do motor
T_{polia}	Binário da polia
$T_{\text{rot, corte}}$	Binário de rotação da mesa durante o corte
$T_{\text{rot, pos}}$	Binário de rotação da mesa durante o posicionamento
V_c	Velocidade de corte
V_f	Velocidade de avanço
V_{fluido}	Velocidade do fluido refrigerante

Alfabeto grego

α	Aceleração angular
β	Ângulo genérico
Δ	Diferencial
η	Eficiência
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Densidade
σ_{axial}	Tensão axial

$\sigma_{\text{flexão}}$	Tensão de flexão
σ_y	Tensão de cedência do material
σ_{VM}	Tensão equivalente de von Mises
$\sigma_{b, \text{resultante}}$	Tensão de flexão resultante
τ	Tensão de Corte
Φ	Diâmetro

Siglas

AWS	<i>American welding society</i>
CAD	<i>Computer aided design</i>
CAE	Computer aided engineering
CNC	Controlo numérico computadorizado
DCL	Diagrama de corpo livre
FEM	<i>Finite element method</i>
FEPA	<i>Fédération européenne des fabricants de produits abrasifs</i>
GDL	Graus de liberdade
MAG	<i>Metal active gas</i>
NOK	Not Ok
OEM	<i>Original equipment manufacturer</i>
PIB	Produto interno bruto
SAE	<i>Society of automotive engineering</i>
ZTA	Zona termicamente afetada

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	2
1.2	ENQUADRAMENTO	2
1.3	OBJETIVOS	2
1.4	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	3
2	APRESENTAÇÃO DO ESTÁGIO	5
2.1	MCG – MANUEL DA CONCEIÇÃO GRAÇA.....	5
2.2	DESCRIÇÃO DO ESTÁGIO.....	6
3	ESTADO DA ARTE.....	9
3.1	O QUE É METALOGRAFIA?.....	10
3.2	ANÁLISE EM SOLDADURAS	10
3.3	DEFEITOS EM SOLDADURAS	13
3.4	PRINCÍPIOS DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS METALOGRÁFICAS.....	15
3.4.1	<i>Corte</i>	15
3.4.2	<i>Inclusão em Resina</i>	19
3.4.3	<i>Lixamento</i>	20
3.4.4	<i>Polimento</i>	21
3.4.5	<i>Ataque Químico</i>	24
4	CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO ATUAL DE CORTE E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	27
4.1	BRAÇO DE CONTROLO DE SUSPENSÃO	27
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO CORTE	30
4.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS METALOGRÁFICAS	31
4.3.1	<i>Corte</i>	31
4.3.2	<i>Lixamento</i>	37
4.3.3	<i>Ataque Químico</i>	38
4.3.4	<i>Sumário do processo de preparação de amostras</i>	38
4.4	IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS.....	39
5	AUTOMATISMO DE CORTE: CONCEPÇÃO E DETALHES TÉCNICOS..	43
5.1	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	44
5.1.1	<i>Módulo de Corte</i>	45
5.1.2	<i>Sistema de Posicionamento e Fixação</i>	58
5.1.3	<i>Movimentos Lineares e Rotativo</i>	65
5.1.4	<i>Estrutura</i>	75

5.1.5	<i>Dimensionamento do Sistema de Refrigeração</i>	79
5.2	SUMÁRIO DO PROJETO DO AUTOMATISMO DE CORTE	81
6	DISCUSSÃO	83
6.1	TEMPO NA ETAPA DE CORTE.....	83
6.2	POSICIONAMENTO E FIXAÇÃO DO COMPONENTE	85
6.3	QUALIDADE DOS CORTES ALCANÇADA.....	85
6.4	ANÁLISE DE CUSTOS	86
6.5	HETEROGENEIDADE DAS SUPERFÍCIES DE CORTE	88
6.6	SEGURANÇA	88
6.7	DIMENSÃO E <i>LAYOUT</i>	88
6.8	DESGASTE.....	89
6.9	SUMÁRIO DA DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ESPERADOS	89
7	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	91
7.1	CONCLUSÕES	91
7.2	TRABALHO FUTURO.....	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	APÊNDICE A – ROLAMENTOS	103
	APÊNDICE B – SIMULAÇÕES FEM	107

Índice de figuras

FIGURA 2. 1 - NAVE INDUSTRIAL METAL 4, MCG AUTOMOTIVE.	5
FIGURA 2. 2 – A) PRENSA WEINGARTEN DE 3300 TON; B) ROBÔ DE SOLDADURA MIG/MAG.	6
FIGURA 3. 1 - TETRAEDRO DA ENGENHARIA DOS MATERIAIS	9
FIGURA 3. 2 - REPRESENTAÇÃO DAS PRINCIPAIS REGIÕES DE UMA SUPERFÍCIE SOLDADA	11
FIGURA 3. 3 - MICROGRAFIA NUMA REGIÃO SOLDADA EM INCONEL 625 (10X)	12
FIGURA 3. 4 - MACROGRAFIA DE UMA SOLDADURA.	12
FIGURA 3. 5 – MORDEDURA NUM CANTO DE SOLDADURA	13
FIGURA 3. 6 – POROSIDADE NUM CANTO DE SOLDADURA.....	14
FIGURA 3. 7 – INCLUSÕES NUMA REGIÃO SOLDADA.....	14
FIGURA 3. 8 - FISSURA EM UNIÃO SOLDADA.....	15
FIGURA 3. 9 - ETAPAS TÍPICAS DE PROCESSO DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS METALOGRÁFICAS.	15
FIGURA 3. 10 - DEFORMAÇÃO DE CORTE GERADA POR TRÊS MÉTODOS DIFERENTES	16
FIGURA 3. 11 - ESQUEMA DE AMOSTRA EM RESINA	19
FIGURA 3. 12 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS DISTORÇÕES GRANULARES OBTIDAS NO CORTE	20
FIGURA 3. 13 - IMPACTO DA GRANULOMETRIA DE UMA LIXA NUMA SUPERFÍCIE DE AMOSTRA.....	21
FIGURA 3. 14 - EXECUÇÃO DE UM POLIMENTO MECÂNICO	22
FIGURA 3. 15 - IMPACTO DA GRANULOMETRIA E NATUREZA DO ABRASIVO NO POLIMENTO DE SUPERFÍCIE METÁLICA.....	23
FIGURA 3. 16 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO DE POLIMENTO ELETRÓLÍTICO.....	23
FIGURA 3. 17 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA REFLECTIVIDADE EM SUPERFÍCIES DE AMOSTRAS METALOGRÁFICAS COM E SEM ATAQUE QUÍMICO	24
FIGURA 3. 18 SUPERFÍCIE DE AMOSTRA EM COBRE ANTES E DEPOIS ATAQUE QUÍMICO	25
FIGURA 4. 1 - ESQUEMA DE SUSPENSÃO MACPHERSON	28
FIGURA 4. 2 - BRAÇO DE CONTROLO DE SUSPENSÃO: A) VISTA FRONTAL; B) VISTA TRASEIRA. .	28
FIGURA 4. 3 - INTERPRETAÇÃO DA REFERÊNCIA DO MATERIAL BASE.	28
FIGURA 4. 4 - BRAÇO DE CONTROLO DE SUSPENSÃO: A) PEÇA ESQUERDA; B) PEÇA DIREITA. .	29
FIGURA 4. 5 - ESQUEMA DE CORTE.....	30
FIGURA 4. 6 – DIREÇÃO DAS ESTRIAS DE CORTE: A) INCORRETAS; B) CORRECTAS.....	31
FIGURA 4. 7 – ATUAL PROCESSO DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS METALOGRÁFICAS.	31
FIGURA 4. 8 - EINHELL TC-MC 355.....	32
FIGURA 4. 9 - CORTES EXECUTADOS NA ETAPA DE CORTE GROSSEIRO.....	33
FIGURA 4. 10 - MORFOLOGIA DE CORTE OBTIDA NA ETAPA DE CORTE GROSSEIRO.....	33
FIGURA 4. 11 – A) FAGULHAS PROJECTADAS; B) QUEIMADURAS NA AMOSTRA.....	34
FIGURA 4. 12 - SISTEMA DE APERTO DA EINHELL TC-MC 355.	34
FIGURA 4. 13 - CURVATURA DA ZONA DE APERTO NO CORTE A001-A003.....	35
FIGURA 4. 14 - A) CORTE A002A <i>BEGIN</i> - A004 <i>BEGIN</i> ; B) CORTE INDESEJADO NO <i>BUSHING</i> . .	35

FIGURA 4. 15 - ATA BRILLANT 250X.....	36
FIGURA 4. 16 - CORTES EXECUTADOS NA ETAPA DE CORTE FINO.....	36
FIGURA 4. 17 - MORFOLOGIA OBTIDA NA ETAPA DE CORTE FINO – CORTE B001-B002.	37
FIGURA 4. 18 - AMARRAS DE FIXAÇÃO DA ATA BRILLANT 250X	37
FIGURA 4. 19 - EQUIPAMENTO PARA LIXAMENTO.	38
FIGURA 4. 20 - SUPERFÍCIE PROVENIENTE DO CORTE A002A <i>MIDDLE</i> -A004 <i>MIDDLE</i> APÓS REVELAÇÃO.....	38
FIGURA 4. 21 – ACUMULAÇÃO DE PEÇAS EM ESPERA PARA ANÁLISE MACROGRÁFICA.	39
FIGURA 4. 22 – EINHELL TC-MC 355 EM ESTADO NOK (NOT OK).	40
FIGURA 5. 1 - AUTOMATISMO DE CORTE: A) VISTA FRONTAL; B) VISTA TRASEIRA.....	43
FIGURA 5. 2 – A) SISTEMAS DE MOVIMENTOS LINEARES E ROTATIVO; B) PRATO A NO AUTOMATISMO.....	44
FIGURA 5. 3 – ACESSOS LATERAIS DO AUTOMATISMO.....	44
FIGURA 5. 4 – MÓDULO DE CORTE.	45
FIGURA 5. 5 - DISCO BOSCH DANIFICADO.....	48
FIGURA 5. 6 - TYROLIT PREMIUM 779428.....	48
FIGURA 5. 7 - MOTOR SIEMENS 1LE1004-1BA22-1AA6.....	50
FIGURA 5. 8 - A) DCL DO VEIO MOTOR; B) DCL DO VEIO MOVIDO.	53
FIGURA 5. 9 - BRAÇO DE SUPORTE: A) VISTA FRONTAL; B) VISTA TRASEIRA.....	55
FIGURA 5. 10 - APLICAÇÃO DE CONSTRANGIMENTOS E ESFORÇOS NO BRAÇO DE SUPORTE. ...	56
FIGURA 5. 11- TENSÃO DE VON MISES NO BRAÇO DE SUPORTE.....	56
FIGURA 5. 12 - TESTE DE CONVERGÊNCIA DE MALHAS.	56
FIGURA 5. 13 - GRÁFICO P X RPM PARA SELEÇÃO DO PERFIL DE CORREIA	58
FIGURA 5. 14 – A) PRATO A; B) PRATO B; C) PRATO C.....	58
FIGURA 5. 15 - CALIBRES DA LOWER SHELL: A) SEM A PEÇA; B) COM A PEÇA.	60
FIGURA 5. 16 – PRATO A: A) NINHO DA PEÇA ESQUERDA; B) NINHO DA PEÇA DIREITA.	60
FIGURA 5. 17 – PRATO B: A) NINHOS PARA CORTES NO <i>BUSHING</i> ; B) NINHO PARA CORTE C001 <i>BEGIN</i> ; C) NINHOS PARA CORTE A006.	61
FIGURA 5. 18 - PRATO C: A) NINHOS PARA CORTES NO <i>BUSHING</i> ; B) NINHOS PARA CORTE D001 - D002.....	61
FIGURA 5. 19 - DCL GENÉRICO DA FIXAÇÃO DE PEÇAS.	63
FIGURA 5. 20 - RODAS NORELEM 95057 NO PRATO A.....	64
FIGURA 5. 21 – A) CARRINHO CONCEPTUAL PARA TROCA DE PRATOS; B) ESQUEMA CONCEPTUAL DA TROCA DO PRATO A.....	64
FIGURA 5. 22 - CILINDRO HIDRÁULICO REXROTH CD70K25/16-80Z1X/02HTKM2-3 ^a	65
FIGURA 5. 23 - AMPLITUDE DE ROTAÇÃO DO BRAÇO DE SUPORTE.....	66
FIGURA 5. 24 – A) DCL DO MOVIMENTO DESCENDENTE; B) DCL DO MOVIMENTO ASCENDENTE.	66
FIGURA 5. 25 - CURSO MÍNIMO DO CILINDRO.	67
FIGURA 5. 26 - MESA ROTATIVA HIWIN DMS74.....	68
FIGURA 5. 27 - DCL DO ESFORÇO AXIAL APLICADO À MESA ROTATIVA.	69

FIGURA 5. 28 - DCL DO MOMENTO DE FLEXÃO NA MESA ROTATIVA.....	69
FIGURA 5. 29 - DCL DO BINÁRIO NA MESA GERADO PELO DISCO DE CORTE.....	70
FIGURA 5. 30 - SISTEMA DE PARAFUSO X E Y EM <i>LAYOUT</i> CRUZADO.....	71
FIGURA 5. 31 - SISTEMA LINEAR DE PARAFUSO (EIXO Y).....	72
FIGURA 5. 32 – A) DIMENSÕES DAS GUIAS (EIXO Y) (MM); B) DIMENSÃO DO PARAFUSO (EIXO Y) (MM).....	73
FIGURA 5. 33 - SERVOMOTOR HIWIN EM1-C-M-10-2.....	73
FIGURA 5. 34 – SISTEMA LINEAR DE PARAFUSO (EIXO X).....	75
FIGURA 5. 35 - A) DIMENSÕES DAS GUIAS (EIXO X) (MM); B) DIMENSÃO DO PARAFUSO (EIXO X) (MM).....	75
FIGURA 5. 36 PERFIL DE ALUMÍNIO EXTRUDIDO 80X80L.....	76
FIGURA 5. 37 - ACESSÓRIOS DE LIGAÇÃO: A) REFORÇO DE CANTO 180X180; B) REFORÇO DE CANTO 30X30; C) PARAFUSO COM FLANGE COM PORCA <i>T-SLOT</i>	77
FIGURA 5. 38 –A) ESQUELETO DO AUTOMATISMO; B) ESTRUTURA PARA SIMULAÇÃO FEM.....	77
FIGURA 5. 39 – A) NÓS PRESENTES NA SIMULAÇÃO; B) APLICAÇÃO DOS CONSTRANGIMENTOS FIXOS.....	78
FIGURA 5. 40 - DEFORMADA MÁXIMA DA ESTRUTURA.....	79
FIGURA 5. 41 - MANGUEIRA FLEXÍVEL DE REFRIGERAÇÃO.....	79
FIGURA 6. 1 - COMPARAÇÃO DO TEMPO DA ETAPA DE CORTE COM E SEM A IMPLEMENTAÇÃO DO AUTOMATISMO.....	85

Índice de tabelas

TABELA 3. 1 - CARACTERÍSTICAS DE SUPERFÍCIES CORTADAS	16
TABELA 3. 2 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE DISCOS DE CORTE ABRASIVOS	17
TABELA 3. 3 - PRINCIPAIS PROBLEMAS GERADOS POR CORTE ABRASIVO COM DISCOS CONSUMÍVEIS	18
TABELA 3. 4 - PRINCIPAIS ENTRAVES GERADOS POR CORTE ABRASIVO NÃO CONSUMÍVEL	19
TABELA 4. 1 - PROPRIEDADES DO AÇO HR660Y760T-CP	29
TABELA 4. 2 - SEQUÊNCIA DA ETAPA DE CORTE GROSSEIRO.	32
TABELA 4. 3 - SEQUÊNCIA DA ETAPA DE CORTE FINO.	36
TABELA 4. 4 - PARÂMETROS TÉCNICOS DOS EQUIPAMENTOS DE CORTE.....	37
TABELA 4. 5 - SUMÁRIO DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS METALGRÁFICAS.....	39
TABELA 4. 6 - PROBLEMAS E CAUSAS IDENTIFICADOS.	41
TABELA 5. 1 - CARACTERÍSTICAS DOS DISCOS DE CORTE TESTADOS	46
TABELA 5. 2 - TIPO DE CORTE COM DISCOS TESTADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	47
TABELA 5. 3 - VELOCIDADE DE CORTE DOS DISCOS.	49
TABELA 5. 4 - POTÊNCIA DE CORTE DOS DISCOS.....	50
TABELA 5. 5 - FORÇAS E BINÁRIO DOS DISCOS.....	50
TABELA 5. 6 – PARÂMETROS TÉCNICOS DO SIEMENS 1LE1004-1BA22-1AA6	51
TABELA 5. 7 – PROPRIEDADES DO AÇO TEMPERADO 90MnCrV8 (EN 1.2842)	53
TABELA 5. 8 – TENSÃO DE CORTE DOS VEIOS.	54
TABELA 5. 9 – TENSÃO DE FLEXÃO RESULTANTE NO VEIO MOVIDO.....	54
TABELA 5. 10 - TENSÃO EQUIVALENTE DE VON MISES DOS VEIOS.	55
TABELA 5. 11 - CARGAS NOS ROLAMENTOS.	57
TABELA 5. 12 - IDENTIFICAÇÃO DE CORTES EM CADA PRATO.....	61
TABELA 5. 13 – ELEMENTOS DE FIXAÇÃO.....	62
TABELA 5. 14 – FORÇAS DE APERTO.	63
TABELA 5. 15 - BRAÇOS DE MOMENTO E MASSA DO BRAÇO DE SUPORTE.	66
TABELA 5. 16 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA HIWIN DMS74	68
TABELA 5. 17 – REQUISITOS Vs HIWIN DMS74.	71
TABELA 5. 18 - MOMENTO DE INÉRCIA DE MASSA DO SISTEMA Y.....	74
TABELA 5. 19 – BINÁRIO DO SERVOMOTOR NECESSÁRIO.	74
TABELA 5. 20 - FORÇA DE APERTO DOS PARAFUSOS DOS ELEMENTOS DE FIXAÇÃO.	76
TABELA 6. 1 - PROCESSO DE FUNCIONAMENTO DO AUTOMATISMO	84
TABELA 6. 2 - TEMPOS ESTIMADOS PARA A ETAPA DE CORTE.	84
TABELA 6. 3 – TEMPO DE OPERAÇÃO ANUAL DE CADA EQUIPAMENTO DE CORTE.....	86
TABELA 6. 4 - CUSTO ENERGÉTICO ANUAL DE CADA EQUIPAMENTO DE CORTE.....	87
TABELA 6. 5 - CUSTO ANUAL DE CADA EQUIPAMENTO DE CORTE E DE OPERADOR.....	87

TABELA 6. 6 - CUSTO POR PEÇA PARA PROCESSO SEM E COM AUTOMATISMO.	88
TABELA 6. 7 – IMPACTO DO AUTOMATISMO NOS PROBLEMAS IDENTIFICADOS NO PROCESSO	89

1 Introdução

O fabrico envolve a transformação mecânica, física ou química de materiais, substâncias ou componentes em novos produtos (US Bureau of Labor Statistics, 2024). A abrangência desta definição permite cobrir uma ampla gama de empresas e de diferentes processos produtivos. De entre os diversos subsectores do fabrico, o subsector da produção de maquinaria destaca-se pela sua relevância e impacto na economia global.

Nos Estados Unidos, até dezembro de 2022 havia 1 milhão e 123 mil trabalhadores no subsector de produção de maquinaria, representando cerca de 8,7% do total do sector do fabrico no país (US Census Bureau, 2024). Este expressivo número evidencia a relevância do subsector para a composição da força de trabalho industrial norte americana. Além disso, a receita deste sector alcançou aproximadamente 337,9 mil milhões de dólares nesse mesmo ano (Statista, 2022), evidenciando o contributo no crescimento económico para a sua economia.

A relevância deste subsector é igualmente destacada na União Europeia. Dados do Eurostat apontam que em 2004 existiam um total de 164300 empresas dedicadas a este ramo de negócio, que empregavam cerca de 3,7 milhões de trabalhadores gerando anualmente 171,1 mil milhões de euros (Eurostat, 2006). Estes números não só refletem a vitalidade, mas também como esta serve para alavancar a economia europeia, consolidando-se como um pilar fundamental para o desenvolvimento regional e a coesão entre os Estados-membros.

A contribuição do sector de produção de maquinaria para a economia ocidental e a sua importância para a criação de empregos e riqueza são inequívocas. A competitividade no sector de produção de maquinaria é crucial, não apenas para a manutenção e criação de postos de trabalho, mas também para a geração de riqueza e o avanço tecnológico. Para isto, a qualidade do projeto e respetivos processos de fabrico dos equipamentos são fatores determinantes para o sucesso (Europäische Kommission, 1997). Assim, o fortalecimento deste subsector é essencial para sustentar a sua contribuição significativa e assegurar um futuro promissor num mercado global de grande competitividade.

1.1 Motivação

A motivação para o desenvolvimento do presente trabalho assenta, fundamentalmente, na possibilidade de aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico, com formação de base em Engenharia Mecânica, à realidade vivida na Indústria, proporcionando uma simbiose entre os universos industrial e académico/científico.

Considerando o impacto global do setor de produção de equipamentos industriais, e tendo ainda em consideração que o setor automóvel representa 5,6% do PIB da economia portuguesa (Banco Portugal, 2019), espera-se que a elaboração de um trabalho nestes domínios tenha um contributo mais significativo para as necessidades num setor com importância no plano nacional, incentivando a aproximação das entidades de ensino superior e empresas portuguesas promovendo o desenvolvimento técnico-científico da Indústria portuguesa.

1.2 Enquadramento

O trabalho realizado surge de uma oportunidade de realizar um estágio curricular na empresa MCG (Manuel da Conceição Graça), mais concretamente no seu ramo diretamente ligado ao setor automóvel, *MCG Automotive* no período de setembro de 2023 a junho de 2024.

No contexto do controlo da condição de cordões de soldadura de um componente produzido nesta empresa, o seu departamento da Qualidade tinha a necessidade de preparar amostras para realizar análises metalográficas. A primeira etapa deste processo de preparação era o corte desta peça em regiões pré-determinadas, o que, devido aos entraves sentidos neste procedimento, foi identificada a necessidade em obter um equipamento automatizado de corte por disco de modo a suprimir dificuldades técnicas sentidas e agilizar todo o processo de preparação das amostras. Após procura no mercado em fabricantes especializados no desenvolvimento de equipamentos industriais, não foi identificada nenhuma solução suficientemente customizada ao processo pretendido e/ou financeiramente interessante. Deste modo, optou-se por desenvolver internamente um equipamento que permitisse resolver ao máximo os problemas sentidos.

1.3 Objetivos

O principal objetivo do presente trabalho é projetar um automatismo de corte para preparação de amostras para caracterização morfológica de componentes soldados, mais concretamente, de um Braço de Controlo de Suspensão. O equipamento deve ser o mais customizado possível de modo a atender ao processo em causa,

integrando elementos obtidos externamente numa lógica chave-na-mão enquanto, paralelamente, se faça uso do máximo de recursos internos (mão de obra, tecnologias de fabrico, etc.), visando alcançar uma solução que cumpra com os requisitos definidos, satisfazendo as necessidades e capacidades da MCG. No entanto, note-se que o trabalho desenvolvido tem como foco apenas a apresentação de uma solução construtiva ao processo, não se visando as questões referentes à automatização e eletrificação do equipamento, sendo esse um objetivo a cumprir numa fase posterior. Para tal, a ferramenta *Computer Aided Design* (CAD) disponibilizada para a execução do presente projeto foi o *software Siemens NX* onde se modelou tridimensionalmente todos os componentes a fabricar bem como se realizou as montagens dos diversos sistemas dimensionados. Em situações pontuais, recorreu-se às funcionalidades *Computer Aided Engineering* (CAE) existentes no *SolidWorks* com o intuito de simular alguns elementos.

1.4 Estrutura do documento

O presente documento está organizado em sete capítulos principais, cada um com uma função específica que contribui para a compreensão completa do trabalho realizado.

No primeiro capítulo, na Introdução, é feito um enquadramento geral do projeto. Este capítulo aborda a motivação por trás do desenvolvimento deste trabalho, os objetivos a serem alcançados e a importância do mesmo, tanto em termos académicos quanto industriais. Aqui, são apresentados os contextos económico e tecnológico nos quais a empresa MCG está inserida, destacando a relevância do setor de produção de maquinaria para a economia global e, especificamente, para a indústria automóvel em Portugal.

O segundo capítulo é dedicado à apresentação da empresa MCG, onde se destaca as suas áreas de atuação, estrutura organizacional, e o papel específico da MCG *Automotive* no seio da empresa. Este capítulo oferece uma visão abrangente da empresa, contextualizando o estágio e o projeto no ambiente corporativo, evidenciando as suas capacidades tecnológicas.

No terceiro capítulo, é apresentado o Estado da Arte, que envolve uma revisão teórica sobre metalografia e a preparação de amostras para análise metalográfica. Este capítulo discute as metodologias e técnicas existentes na área, fornecendo uma base teórica sólida que suporta as decisões tomadas ao longo do projeto. São abordados os princípios fundamentais da metalografia, incluindo análises de macro e micrografias, bem como os métodos de preparação de amostras, isto é, corte, inclusão em resina, lixamento, polimento e ataque químico.

O quarto capítulo trata da Caracterização do Processo Atual, onde se descreve o processo atual de preparação de amostras na MCG *Automotive* num componente denominado por Braço de Controlo de Suspensão. Este capítulo detalha as etapas atuais do processo, identificando problemas e limitações que motivaram o desenvolvimento de um novo equipamento. A análise crítica dos procedimentos existentes é feita com o objetivo de entender as necessidades específicas e os desafios enfrentados.

No quinto capítulo, intitulado Automatismo de Corte, é apresentado e descrito todo o processo de desenvolvimento do projeto do equipamento automatizado de corte. Este capítulo apresenta a solução construtiva desenvolvida, explicando as escolhas de projeto, os componentes utilizados e a lógica por trás da integração dos recursos internos e externos.

O sexto capítulo é dedicado à discussão dos resultados. É realizada uma análise crítica dos resultados, abordando aspetos como o tempo da etapa de corte, o posicionamento e fixação do componente, etc. Esta abordagem permite avaliar qualitativamente a eficácia do projeto e identificar áreas para melhorias futuras.

Por fim, no sétimo capítulo, são resumidas as principais conclusões do trabalho, destacando as contribuições significativas para a empresa e para a área de estudo, e propondo sugestões para trabalhos futuros que possam dar continuidade e aprimorar os resultados.

2 Apresentação do Estágio

2.1 MCG – Manuel da Conceição Graça

A 30 de Março de 1950, Manuel da Conceição da Graça fundou a MCG – Manuel da Conceição Graça, Lda. Localizada no concelho de Alenquer, mais concretamente na localidade do Carregado, esta empresa tem-se destacado ao longo da sua existência no mercado da metalomecânica, de onde se realça o fabrico de componentes para o setor automóvel.

Nos últimos anos, a MCG expandiu as suas áreas de negócio com o intuito de promover o progresso na organização e diversificar o seu leque de clientes, pelo que, atualmente, esta encontra-se estruturada em três áreas distintas, *MCG Transportation*, *MCG Industry* e *MCG Automotive*.



Figura 2. 1 - Nave industrial Metal 4, MCG Automotive.

A *MCG Transportation* baseia a sua atividade no desenvolvimento e produção de sistemas em compósitos para aplicações interiores em comboios e autocarros. Fazendo uso de processos como corte de perfis, maquinação router CNC (Controlo Numérico Computadorizado), colagem, etc., é capaz de fabricar produtos como paredes laterais, divisórias, tetos, pavimentos, entre outros.

A *MCG Industry* possui uma variedade de serviços focados em produtos chave-na-mão. Isso inclui desde o projeto até ao fabrico produtos em metal, montagem

eletrónica e ensaios. Utilizando tecnologias avançadas, como corte a laser, punção, quinagem e soldadura, a MCG *Industry* atende a uma ampla gama de indústrias, tendo um leque de clientes muito diversificado.

Por último, existe a MCG *Automotive*. Este setor da empresa dedica-se ao fornecimento de produtos para o setor automóvel. Tendo sido a que deu origem à sua fundação, é também a de maior dimensão. Com uma vasta experiência consolidada na indústria, estabeleceu e nutre diversas relações de longo prazo com as principais empresas *Original Equipment Manufacturer* (OEM) e *Tier 1* no atual mercado europeu. No prisma tecnológico, tem como principal especialização a estampagem, onde, para além da produção de componentes, abarca também o processo inicial de projeto e desenvolvimento das ferramentas. Com a aplicação de outras tecnologias como soldadura robotizada, maquinação em série, tratamentos de superfície, etc., a área do *Automotive* está habilitada ao fabrico de uma variedade de produtos (suspensões, *powertrains* e estruturas de assentos, por exemplo) para o setor automóvel com elevados padrões de Qualidade.

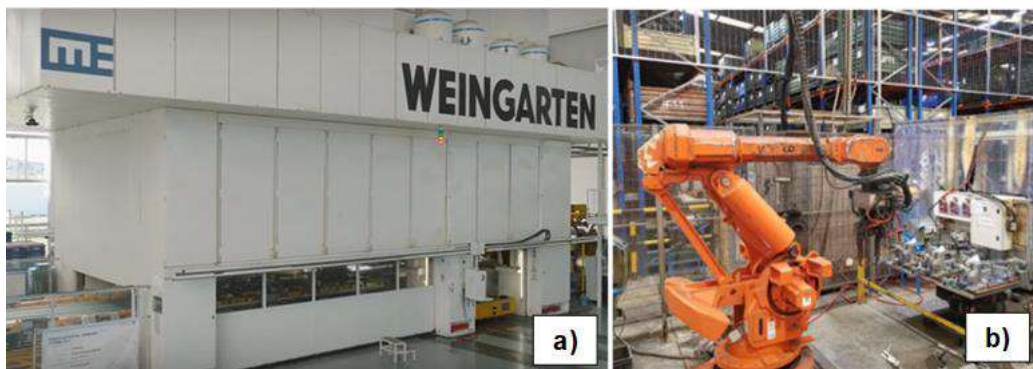


Figura 2. 2 – a) Prensa Weingarten de 3300 ton; b) Robô de soldadura MIG/MAG.

2.2 Descrição do estágio

O estágio realizado decorreu entre setembro de 2023 a junho de 2024 e esteve inserido na MCG *Automotive*, sendo que, o trabalho desenvolvido tinha como objetivo servir o departamento da Qualidade. No entanto, o acompanhamento contínuo foi dado pela equipa de Industrialização, o que possibilitou receber uma orientação mais abrangente estabelecendo uma interação de maior proximidade com os restantes departamentos, visto que foi necessário solicitar o seu auxílio ao longo do desenvolvimento de todo o trabalho, promovendo assim uma visão integrada e multidisciplinar do processo industrial.

A gestão do tempo de trabalho foi feita de forma autónoma desde o início, com uma rotina diária no período das 9h às 17h. Durante o estágio, diversas etapas foram fundamentais para o desenvolvimento do projeto. O processo começou com uma análise minuciosa de todos os procedimentos envolvidos, focando nos requisitos

específicos do departamento da Qualidade. Esta fase inicial teve como objetivo mapear detalhadamente o fluxo de trabalho existente, identificar os principais problemas e ineficiências, e compreender as necessidades específicas de melhoria. Com estes dados em mãos, procedeu-se a uma pesquisa de mercado aprofundada onde o objetivo era explorar as diferentes soluções disponíveis numa ótica de entender as características e funcionalidades dos equipamentos de corte metalográfico disponíveis pelos diversos fabricantes, incluindo os seus *designs*, modos de operação e tecnologias subjacentes. Ultrapassadas estas etapas, seguiu-se a fase de conceptualização do automatismo propriamente dito. Esta etapa envolveu a criação de um conceito que pudesse maximizar a produtividade, minimizando os entraves previamente mapeados, sendo que, logo após o seu término, foi possível proceder ao desenvolvimento do projeto, no qual foi essencial a colaboração com diversas equipas da empresa. A equipa de manutenção de equipamentos desempenhou um papel importante ao partilhar seu *know how* técnico, o que foi fundamental para garantir que o conceito proposto fosse viável e alinhado com as capacidades e limitações técnicas da fábrica. Além disso, a colaboração com as equipas de maquinaria e os operadores de serralharia foi igualmente vital. Estes profissionais forneceram *inputs* práticos baseados na sua experiência direta com os equipamentos e os processos diários onde as suas contribuições ajudaram a refinar o projeto do equipamento, garantindo que este não apenas atuasse sob os problemas identificados, mas também se integrasse de maneira eficiente com as operações existentes.

3 Estado da Arte

Atualmente, com o intuito de satisfazer as pretensões dos seus clientes, as organizações possuem uma cultura contínua de recolha de informação acerca dos produtos e/ou serviços que disponibilizam. É este o paradigma que viabiliza a sua sobrevivência face à competitividade vivida no atual mercado (Manu, 2011). No caso específico dos produtos, se a dita informação tiver como foco o estado da sua matéria prima, estas ficam habilitadas a uma melhor tomada de decisão nas diferentes etapas de desenvolvimento do mesmo, quer seja em fases de projeto ou de fabrico (Aldaijani, 2022). A determinação dos atributos de um material concerne diretamente ao Tetraedro da Engenharia dos Materiais (Figura 3. 1).

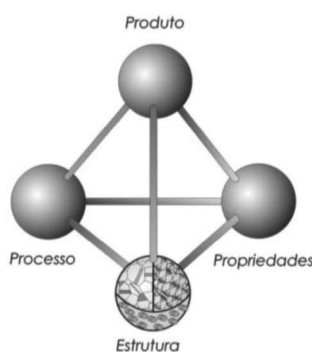


Figura 3. 1 - Tetraedro da Engenharia dos Materiais (Martendal, 2016).

Este tetraedro, que associa a estrutura, propriedades, processamento e aplicação de um dado material, serve como bússola orientadora na tomada de decisão do seu processo de industrialização. Por meio de análises metalográficas, um pilar essencial neste contexto, é possível obter informação acerca do mesmo. Tal entendimento, permite a definição do(s) processo(s) a que este deve ser sujeito para atingir os desempenhos pretendidos, essenciais na diferenciação dos produtos no mercado. Deste modo, absorver esse tipo de informação torna-se essencial, impactando diretamente o ciclo de vida do produto, desde a sua concepção à sua implementação. O presente capítulo aborda os fundamentos e as práticas essenciais da metalografia, com foco na análise em soldaduras. Inicialmente, é apresentada uma visão geral sobre o que é a metalografia e o tipo de análises que são possíveis de se efetuar. Em

seguida, são explorados os tipos de defeitos comuns em soldaduras e aprofunda-se nos princípios de preparação de amostras metalográficas. Estas etapas, que incluem os procedimentos de seccionamento, inclusão em resina, lixamento, polimento e ataque químico, são descritas destacando a sua importância para assegurar a qualidade e a precisão nas consequentes análises metalográficas.

3.1 O que é Metalografia?

Metalografia é o ramo científico que se dedica ao estudo da estrutura de metais e das suas respetivas ligas. No entanto, nos dias de hoje, este tipo de análises já não lhes são exclusivas, uma vez que materiais poliméricos e cerâmicos, por exemplo, podem também ser objeto de diagnósticos desta natureza. Esta extensão na amplitude de matérias-primas alvo deu origem a termos como plastografias, ceramicografias, materialografia, etc. (Akca & Trgo, 2015). Focando o caso dos ensaios metalográficos, estes podem ser executados com base em duas escalas distintas: macrografias e micrografias.

As macrografias permitem aferir o estado de uma superfície alvo de estudo com apenas uma observação a olho nu, ou uma ampliação reduzida, que tipicamente não excede as 50X (Taylor & Guesnier, 2019). Neste tipo de ensaio, algumas das anotações passíveis de serem feitas englobam aspetos como a homogeneidade do material, presença de fendas, impurezas ou a qualidade de uma soldadura existente de modo mais superficial (Rohde, 2010).

Já os ensaios micrográficos consistem em observações feitas com ampliações mais elevadas, tipicamente, superiores a 1000X, onde se faz uso de um microscópio (Taylor & Guesnier, 2019). Com este método, torna-se possível observar as fases presentes no material, tamanhos de grão, a distribuição dos diversos constituintes, etc. (Rohde, 2010).

Posto isto, o desenvolvimento, a inspeção, a produção, entre outras atividades, possuem uma sólida base em análises desta natureza, onde são aplicadas técnicas estereológicas para o efeito, isto é, analisar as características da estrutura num plano bidimensional e, com base nas conclusões alcançadas, inferir as características num plano 3D (Zipperian, 2011).

3.2 Análise em Soldaduras

Objetivamente, a soldadura por fusão é um processo de fabrico a que se recorre quando se pretende ligar dois ou mais materiais que, tipicamente, promove o surgimento de três regiões de interesse: zona do metal base (*Parent Metal*), zona

termicamente afetada (*Heat Affected Zones*) e zona de metal fundida (*Fusion Zone*), como é visível na ilustração presente na Figura 3. 2.

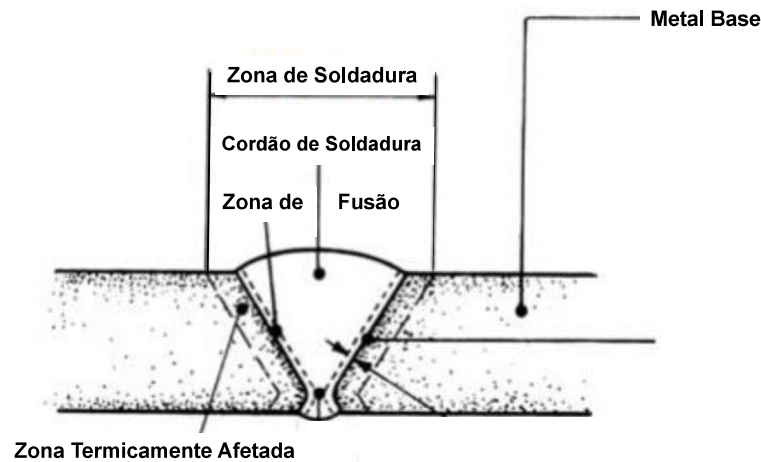


Figura 3. 2 - Representação das principais regiões de uma superfície soldada (adaptado de (Vander Voort, 2011)).

Com o efeito da temperatura, as zonas de metal fundido e as ZTA's sofrem alterações na sua composição, tamanho e orientação de grão, microestrutura e dureza, e, como tal, registam-se propriedades diferentes ao longo do material (Voort, 1999).

Posto isto, no âmbito da monitorização e melhoria do processo (e conseqüentemente do produto resultante), analisar a zona soldada numa perspetiva metalográfica pode revelar-se de importância extrema (Vander Voort, 2011). A possibilidade de averiguar o estado da soldadura quanto à presença de defeitos e respetivas causas, permite avaliar a resistência da união, o que é essencial de forma a oferecer garantias de desempenho e durabilidade ao componente (ClaraVision, 2021).

Existem diversas diretrizes de entidades como *Society of Automotive Engineering* (SAE) e a *American Welding Society* (AWS) para a execução destas análises, no entanto, desconhece-se a existência de normas específicas para tal (Zipperian, 2011).

O uso de micrografia propicia uma análise mais detalhada acerca da soldadura, nomeadamente, no que toca à averiguação da presença de porosidades, microfissuras e estrutura e tamanho de grão, permitindo tirar conclusões quanto às propriedades mecânicas que esta dispõe e como estas variam entre as diferentes regiões geradas pelo processo (ClaraVision, 2021). No entanto, quando comparada com a macrografia, esta requer um estado de superfície mais polido, o que impõe maior grau de preparação das amostras metalográficas (ClaraVision, 2021).

Na Figura 3. 3, é possível visualizar uma micrografia numa soldadura de um aço Inconel 625. Pela sua observação, é possível constatar uma estrutura de grão grosseiro na proximidade da zona de metal fundido (Taylor & Guesnier, 2019).

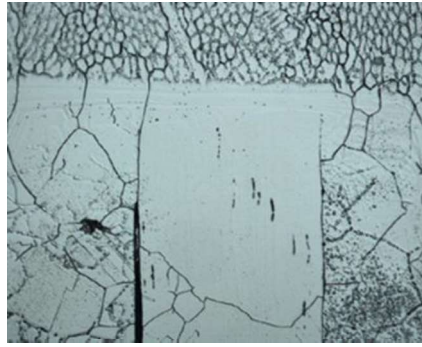


Figura 3. 3 - Micrografia numa região soldada em Inconel 625 (10x) (Taylor & Guesnier, 2019).

Já uma macroscopia numa soldadura pode ajudar à recolha de informação acerca do estado de ligação alcançado entre os materiais, ou seja, o seu grau de homogeneidade, a penetração do cordão e a presença de fissuras, entre outros (Taylor & Guesnier, 2019). Neste tipo de avaliações é frequente a realização de medições na secção de soldadura tais como o comprimento da garganta, penetração do cordão, extensão da ZTA, etc. (Zipperian, 2011).

A título de exemplo, na Figura 3. 4, pode-se observar uma macrografia de uma soldadura num componente automóvel que contém elementos que se encontram soldados entre si, pelo que as medições efetuadas são, para este caso, as seguintes:

- O parâmetro *Throat* refere-se à garganta da soldadura, isto é, corresponde à largura da soldadura na sua secção transversal;
- O *Gap*, ou folga, corresponde à distância entre as extremidades dos materiais que estão a ser ligados;
- A largura da união (*VB*) é definida como a menor distância direta visível na secção transversal entre o material de solda e o componente;
- *SF* é a medida permite averiguar a penetração da soldadura nas superfícies laterais do material.

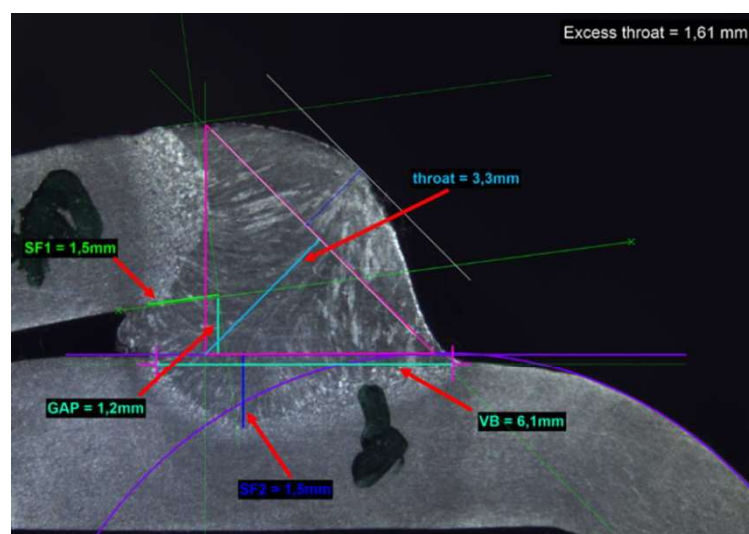


Figura 3. 4 - Macrografia de uma soldadura (cortesia da MCG).

Posteriormente, os valores obtidos são confrontados com os presentes na especificação adotada, com intuito de averiguar se respeitam os intervalos de valores que garantem conformidade à junta soldada. Note-se que, por norma, a definição das medições necessárias a efetuar são também estabelecidas pela documentação usada.

3.3 Defeitos em Soldaduras

Focando mais concretamente as macrografias em soldaduras, através da sua análise é possível aferir outras características, nomeadamente, a identificação de inconformidades como a continuidade da soldadura, a uniformidade do cordão e a presença de qualquer desvio em relação às características esperadas. Defeitos como mordeduras, porosidades, inclusões e fissuras são alguns dos defeitos mais típicos (DIN 8524-1, 1986) e detetáveis nesta fase, permitindo intervenções corretivas antes que a soldadura entre em uso.

Mordeduras

Em soldadura, o termo mordedura refere-se a uma diminuição localizada da espessura do metal base nas proximidades da zona fundida, como é observável no exemplo apresentado na Figura 3. 5. Trata-se de um fenómeno tipicamente causado pela aplicação de uma intensidade de corrente excessivamente alta ou por um ângulo da tocha em relação à superfície soldada inadequado. Uma mordedura pode comprometer seriamente a integridade estrutural da junta soldada, resultando em falhas prematuras. Detetar e corrigir esse defeito é essencial para garantir a qualidade da soldadura (Hadzihafizovic, 2022).

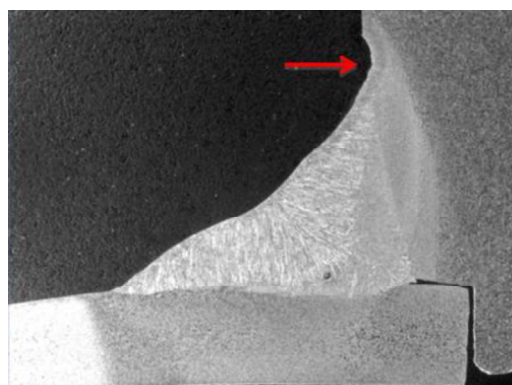


Figura 3. 5 – Mordedura num canto de soldadura (Hadzihafizovic, 2022).

Porosidades

Em soldadura, a porosidade diz respeito à presença de pequenas bolhas de gás retidas no metal durante o processo de solidificação, como constatável na Figura 3. 6. Estes poros podem comprometer a resistência da junta uma vez que representam

regiões menos densas e mais suscetíveis a falhas por fratura devido à redução de resistência mecânica e ductilidade, o que pode resultar na redução da vida útil da soldadura levando-a a ter falhas prematuras (Kou, 2003).

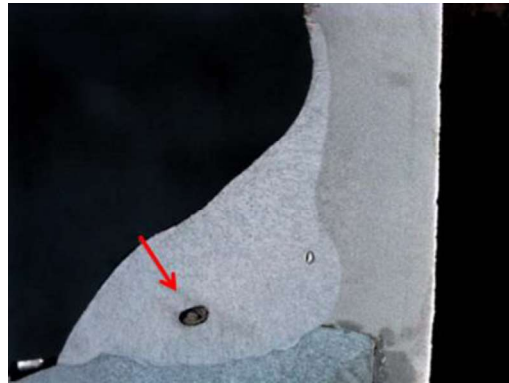


Figura 3. 6 – Porosidade num canto de soldadura (Hadzihafizovic, 2022).

Inclusões

Defeitos por inclusões ocorrem quando materiais estranhos, tipicamente escórias ou óxidos, são incorporados na zona da soldadura (Figura 3. 7). Tratam-se de agentes contaminantes que podem deteriorar as propriedades mecânicas da junta propiciando a sua fragilidade, redução da resistência e o aumento da suscetibilidade à corrosão na área afetada (Kou, 2003).

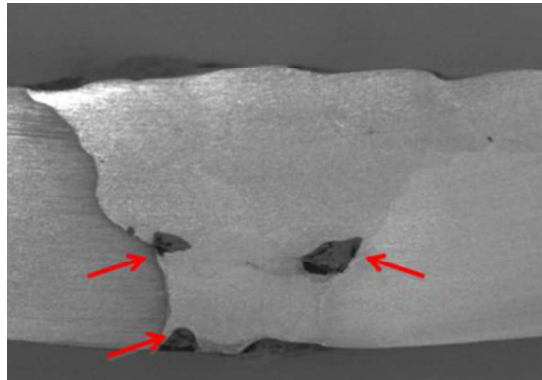


Figura 3. 7 – Inclusões numa região soldada (Hadzihafizovic, 2022).

Fissuras

No caso das fissuras (Figura 3. 8), apesar de estas poderem surgir devido ao modo de execução, surgem, maioritariamente, devido a características relacionadas com o material, estando muito associadas ao aparecimento de tensões de natureza térmica, resultantes do arrefecimento rápido do material (DIN 8524-1, 1986).

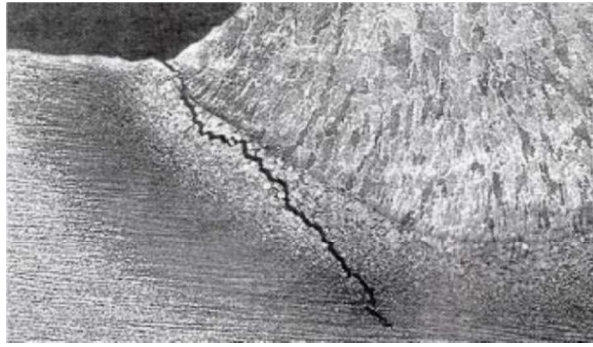


Figura 3. 8 - Fissura em união soldada (Toptitech, 2024).

3.4 Princípios de Preparação de Amostras Metalográficas

Este tipo de estudo é aplicado em amostras. Previamente à análise que se pretende executar, é fundamental preparar corretamente estes elementos. Fundamentalmente, pretende-se atingir a preservação da microestrutura do material e revelar imagens nítidas que facilitem a sua observação. Com isto, evita-se que os indicadores que daí advêm levem a conclusões erradas (ASM, 1992).

No que toca à preparação das amostras, requer-se o cumprimento rigoroso de instruções sequenciadas que devem ser previamente definidas. Na Figura 3. 9, é possível ver um esquema que retrata o processo típico de preparação de amostras de forma cronológica. Primeiramente, a amostra é cortada do modo desejado e é colocada em resina para garantir, essencialmente, a sua integridade, conferindo uma camada protetora na zona de análise. Em seguida, é efetuado o lixamento e o polimento da superfície da amostra para obter um acabamento adequado ao processo de análise sendo que, por fim, aplica-se um ataque químico para revelar a estrutura do material, facilitando a observação detalhada das características pretendidas.



Figura 3. 9 - Etapas típicas de processo de preparação de amostras metalográficas.

3.4.1 Corte

A maioria das amostras alvo de ensaios metalográficos requerem um corte cujo intuito é permitir a análise de regiões específicas dos mesmos. Existem várias tecnologias possíveis de aplicadas para viabilizar este corte, sendo que, a diferenciação destas na tomada de decisão baseia-se nas características das superfícies de corte resultantes, i.e., o dano causado na região cortada (ASM, 1992). Na Tabela 3. 1, pode-se constatar os principais efeitos pretendidos e os não pretendidos na superfície da amostra que é cortada.

Tabela 3. 1 - Características de superfícies cortadas (Zipperian, 2011).

Efeitos de Corte Desejáveis	Efeitos de Corte Indesejáveis
Planicidade e precisão na região pretendida	Deformações plásticas no corpo de prova
Dano microestrutural mínimo	Surgimento de ZTA
	Fissuras
	Dano microestrutural

Entre as diversas tecnologias de corte possíveis de serem aplicadas, é o corte abrasivo uma das mais empregues (Rohde, 2010) pois, embora se trate de um processo que gera uma quantidade significativa de calor na amostra, a sua relação entre a precisão alcançada com o tempo despendido torna-a numa solução consideravelmente mais económica quando comparada com outras (ASM, 1992). Na Figura 3. 10, pode-se observar o grau de deformação e dano entre o corte abrasivo, corte com serra de fita e corte com guilhotina em aço com revestimento de esmalte, onde, neste caso, se confirma de forma evidente a melhor qualidade de corte do abrasivo.

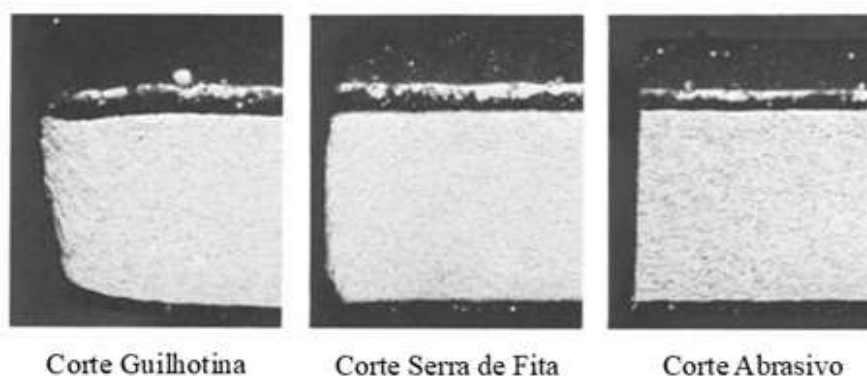


Figura 3. 10 - Deformação de corte gerada por três métodos diferentes (adaptado de (Voort, 1999)).

Corte com Disco de Abrasivo Consumível

Tipicamente mais adequado para cortes em materiais metálicos, este tipo de corte abrasivo consiste na utilização de discos consumíveis a elevadas velocidades de rotação. Estas ferramentas finas e circulares são constituídas por grãos abrasivos, como Óxidos de Alumínio ou Carbonetos de Silício, com orientações aleatórias e unidos por um material comumente denominado como aglomerante, como borrachas ou resinas, mais apropriados para operações com e sem fluido de refrigeração, respetivamente (Zipperian, 2011).

De realçar que com o acumular de cortes, os abrasivos vão-se separando do aglomerante. É devido a esta ocorrência que o disco vai sendo consumido, e consequentemente diâmetro de corte de forma contínua. Tipicamente, o rácio

aconselhado entre material cortado para material consumido deve ser de 1,5 para 1 (ASM, 1992).

O tipo de abrasivo e aglomerante do disco implica que o processo apresente características diferentes. Na Tabela 3. 2, encontram-se apresentadas essas mesmas características para o caso dos exemplos apresentados.

Tabela 3. 2 - Principais características de discos de corte abrasivos (ASM, 1992; Bjerregaard *et al.*, 1992).

Tipo de Abrasivo	
Óxido de Alumínio	Carboneto de Silício
Dureza moderada	Dureza muito elevada tendo propensão à fratura
Aplicação ideal para corte de metais ferrosos	Bastante aplicado em metais não ferrosos
Tipo de Aglomerante	
Borrachas	Resina
Maior tempo de vida	Menor libertação cheiros
Libertação de cheiros	Maior desgaste
Mais queimaduras na superfície de corte	Menos queimaduras na superfície de corte
Menor compatibilidade com o material do abrasivo	Maior compatibilidade com o material do abrasivo

Posto isto, quando se pretende selecionar o disco de abrasivo mais adequado deve-se ter em conta uma ampla gama de fatores, dando especial destaque à dureza do material que se pretende cortar. Tipicamente, materiais duros requerem discos abrasivos de menor dureza, e vice-versa. Isto sucede-se uma vez que discos menos duros fornecem de modo contínuo maiores quantidades de partículas abrasivas cortantes durante o processo, fruto de uma menor retenção das partículas menos cortantes. Assim sendo, o tipo de aglomerante escolhido deve possuir uma taxa de desgaste semelhante à do abrasivo e, se tal se verificar, partículas mais afiadas irão surgir continuamente, proporcionando melhores propriedades de corte à ferramenta (Bjerregaard *et al.*, 1992).

Com o disco consumível devidamente selecionado, o processo tipicamente requer que exista um fluido de corte durante o processamento da peça uma vez que, na maior parte dos casos, este beneficia da sua ação ao refrigerar a interface disco-peça, removendo micro-aparas e partículas abrasivas menos cortantes que se vão desaglomerando. Estes fluidos devem possuir um ponto de inflamação elevado e, preferencialmente, conter um óleo solúvel em água com um aditivo cuja função seja inibir o surgimento de corrosão (ASM, 1992).

Na Tabela 3. 3, podem ser vistos alguns dos problemas típicos de cortes abrasivos com discos consumíveis

Tabela 3. 3 - Principais problemas gerados por corte abrasivo com discos consumíveis (ASM, 1992; Bjerregaard *et al.*, 1992).

Problemas	Causas
Fratura do disco	Incorreta parametrização das variáveis de corte (velocidade de rotação, avanço, etc.)
	Fixação defeituosa da peça
	Disco muito duro
Taxa de desgaste do disco elevada	Disco com dureza insuficiente para o processo
Rebarba	Disco muito duro
	Abrasivo com granulometria excessivamente grosseira
	Avanço excessivo
Aquecimento do disco	Refrigeração deficiente ou inexistente Velocidade de rotação baixa
Queimaduras na peça	Fluido de corte não adequado (nos casos onde a refrigeração está presente)
	Força de corte excessiva

Corte com Disco de Abrasivo Não Consumível

Tal como já mencionado, este tipo de corte abrasivo recorre a discos diamantados a velocidades de rotação reduzidas quando comparadas com as dos discos consumíveis. Devido à elevada dureza e resistência à fratura do diamante, esta opção torna-se numa escolha onde são obtidas superfícies com pouco dano microestrutural e com distorções reduzidas, sendo que para as etapas de preparação posteriores são empregues tempos menores para a sua execução (Zipperian, 2011). É, tendencialmente, utilizado quando a intenção é obter cortes extremamente precisos ou quando se está perante uma peça delicada, tendo a contrapartida de o custo associado ser habitualmente mais dispendioso (ASM, 1992).

Construtivamente, estes discos, para além de diamante, contêm pós metálicos e outro tipo de materiais de enchimento que são conformados, sinterizados e unidos a um núcleo metálico, sendo aconselhável executar o corte com estas ferramentas com o suporte de um líquido de corte com o objetivo de limpar as micro-aparas geradas, lubrificar a interface peça-disco e reduzir a propensão à corrosão. Os fluidos mais típicos são à base de água ou de óleo. Enquanto os primeiros são mais fáceis de limpar, em contrapartida, não proporcionam um nível de lubrificação tão elevado como os óleos (Zipperian, 2011).

Na Tabela 3. 4 encontram-se alguns dos problemas e respetivas possíveis causas que tendem a surgir neste tipo de corte.

Tabela 3. 4 - Principais entraves gerados por corte abrasivo não consumível(ASM, 1992; Zipperian, 2011).

Problemas	Causas
Fratura do disco	Incorreta fixação da peça
	Força de corte inicial demasiado elevada
Oscilação do disco	Força de corte elevada
Baixa taxa de corte	Material da peça na superfície do disco
	Velocidade de rotação do disco insuficiente
	Baixa força de corte aplicada
Dano causado na amostra	Vibrações
	Velocidade de rotação do disco demasiado elevada
Rebarba	Força de corte excessiva
	Vibrações

3.4.2 Inclusão em Resina

Em procedimentos de preparação de amostras metalográficas é comum proceder-se à sua colocação em resina, isto é, após o corte estar concluído, amostras que resultaram dessa etapa são envolvidas num outro material, tipicamente resinas, gerando um corpo único (Kumar & Sahoo, 2005), como se pode ver no esquema presente na Figura 3. 11.

A intenção de o fazer assenta na necessidade de manusear a amostra com maior facilidade, otimizando a execução das subseqüentes etapas de preparação, o que se verifica, essencialmente, em amostras cujas geometrias sejam mais irregulares e de dimensões mais reduzidas. Deste modo, fixá-las e orientá-las corretamente durante o lixamento, polimento ou mesmo na análise ao microscópio, transforma-se numa tarefa menos árdua de se concretizar. Suplementarmente, fornece uma proteção ao corpo de prova em regiões que não se pretendem ver danificadas (Zipperian, 2011), o que implica que o material envolvente não deve reagir quimicamente com o material da amostra, e que ambos devem oferecer resistências à abrasão semelhantes (Kumar & Sahoo, 2005).

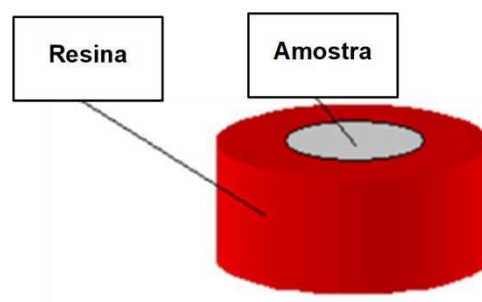


Figura 3. 11 - Esquema de amostra em resina (adaptado de (Kumar & Sahoo, 2005)).

3.4.3 Lixamento

Após a realização de um corte, a estrutura do material sofre alterações. As mais facilmente observáveis dizem respeito à deformação da estrutura de grão (Figura 3. 12), sendo que a maior ou menor profundidade desta deformação varia em função das condições de corte aplicadas. Uma vez que a realização de uma análise metalográfica diretamente nestas superfícies iria fornecer informações erradas acerca do estado metalúrgico da amostra, é necessário proceder à remoção desta camada de grão. Tendencialmente, o primeiro estágio a realizar para tal é o lixamento (Voort, 1999).

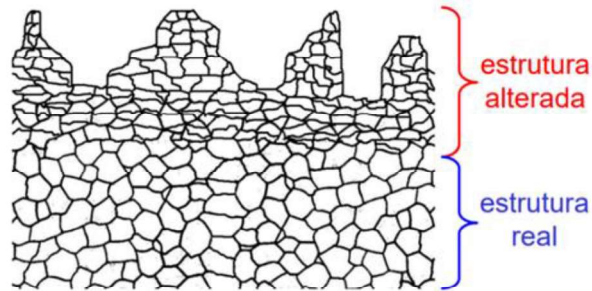


Figura 3. 12 - Representação esquemática das distorções granulares obtidas no corte (Galego, 2015).

É oportuno reconhecer que o processo de lixamento, quando incorretamente executado pode provocar exatamente o oposto do pretendido, ou seja, ao invés de somente remover os grãos alterados pelo corte, pode gerar dano elevado naqueles que representam a real estrutura do material do amostra (Zipperian, 2011). Note-se que é relevante clarificar que, na prática, o lixamento promove sempre deformação no material, no entanto, sendo bem executado, esta deformação é ligeira, alcançando uma estrutura com melhores configurações quando comparada com a que se tinha anteriormente (Bjerregaard *et al.*, 1992).

O procedimento de lixamento assenta num decréscimo sucessivo na granulometria da lixa usada (Rohde, 2010). Com isto, pretende-se transmitir que na preparação de uma amostra para análise metalográfica não é usada uma só dimensão de abrasivo, mas sim várias lixas de igual natureza onde a única diferença assenta no tamanho do grão. A nomenclatura mais popular para a medição da granulometria é a da *Fédération Européenne des Fabricants de Produits Abrasifs* (FEPA), onde, no contexto das lixas mais usadas em preparação metalográfica, a convenção de interesse é a FEPA P. Trata-se de uma escala onde para cada valor de diâmetro médio de grão existe uma codificação associada e que, quanto maior for o seu índice, menor a respetiva dimensão do grão (OTA, 2020).

A título de exemplo observe-se a Figura 3. 13 que retrata o efeito sequenciado de várias lixas numa mesma superfície que vai apresentando uma superfície com um acabamento cada vez mais fino, onde a lixa P120 provoca uma superfície mais

grosseira do que a P600, o que se deve às diferenças de granulometria entre ambas (127 μm e 27,8 μm , respetivamente). Fruto disto, normalmente o mesmo processo de lixamento é subdividido em dois estágios distintos: o grosseiro e o fino.

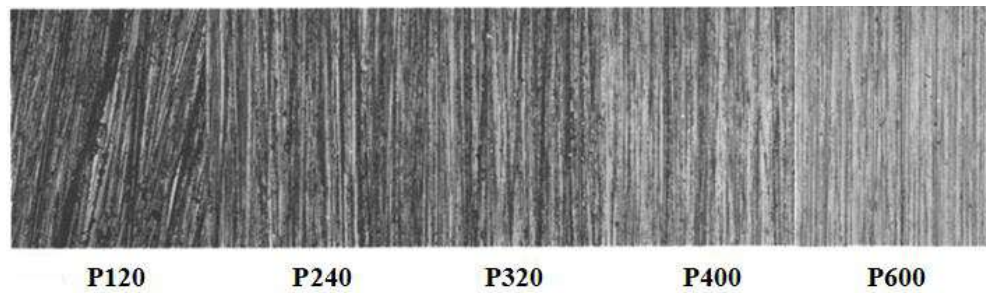


Figura 3. 13 - Impacto da granulometria de uma lixa numa superfície de amostra (adaptado de (Voort, 1999)).

Recorrer a abrasivos mais grosseiros como fase inicial da etapa de lixamento tem como principal objetivo garantir a uniformização da planicidade das superfícies de corte de todas as amostras. A lixa remove os grãos danificados no corte, gerando uma superfície plana onde a estrutura exposta possui menor grau de deformação do que se tinha inicialmente (Bjerregaard *et al.*, 1992; Kumar & Sahoo, 2005).

O lixamento com abrasivos de índice FEPA P superior propicia que o dano gerado no estágio de lixamento grosseiro seja removido, sendo que a estrutura alterada que daqui resulta possui uma preponderância irrisória, podendo ser suprimida numa etapa de polimento subsequente. Após esta fase, as superfícies de corte das amostras possuem uma planicidade comum e detêm deformações consideravelmente reduzidas (Bjerregaard *et al.*, 1992).

Por fim, no que toca à lubrificação, tipicamente é usada água para tal (Voort, 1999). A utilização de um agente lubrificante no processo é justificada com base em três argumentos: melhora o processo de abrasão, reduz o atrito e promove o arrefecimento. No entanto, há que ter em conta que o excesso de líquido lubrificante pode reduzir o poder de abrasão e o seu défice pode não dissipar calor suficiente, pelo que o funcionamento ótimo do processo está também dependente da quantidade usada (Bjerregaard *et al.*, 1992).

3.4.4 Polimento

Como já referido, após terminado o processo de lixamento, ainda existem algumas marcas resultantes nas superfícies de corte, sendo que as respetivas áreas a examinar apresentam um aspeto baço, o que por sua vez, fornece obstáculos ao observador na sua posterior análise. Deste modo, polir gera novas faces com acabamentos mais suaves e brilhantes onde marcas/estrias são eliminadas (Kumar & Sahoo, 2005).

Os princípios associados ao polimento aparentam ser iguais ao da lixamento, no entanto, tratam-se de processos distintos. Esta percepção errada está relacionada com o facto de o processo de polimento ser mais associado ao fenómeno físico de abrasão, o dito polimento mecânico. No entanto, existem outras metodologias que possibilitam a execução desta tarefa sem ter de recorrer a abrasivos, de onde se destaca o polimento eletrolítico.

Polimento Mecânico

É no polimento mecânico que se faz uso de partículas abrasivas, sendo que o princípio de funcionamento assenta na utilização de panos de tecido onde é introduzida uma pasta ou suspensão de abrasivos, o agente de abrasão responsável pelo polimento. A face a polir é pressionada contra esta superfície que se encontra em rotação como exemplificado na Figura 3. 14 (Zipperian, 2011) .



Figura 3. 14 - Execução de um polimento mecânico (cortesia da MCG).

Tipicamente, o polimento mecânico pode ser subdividido em dois estágios. O primeiro estágio é comumente denominado por polimento grosseiro. Com rotações entre 150 e 600 rpm (Voort, 1999) , os abrasivos de diamante com granulometria entre 1 e 15 μm (Zipperian, 2011) executam a deformação plástica da superfície do amostra removendo grande parte dos riscos existentes, conferindo brilho, sendo nesta fase onde se obtêm taxas de remoção mais elevadas, podendo ser selecionados abrasivos com mais do que uma granulometria (Voort, 1999).

O estágio seguinte faz uso de abrasivos de alumina ou carbonetos de silício (Bjerregaard *et al.*, 1992). Trata-se de um polimento fino que fornecerá o estado final da superfície da amostra, onde se destaca o acréscimo no brilho superficial, e onde as granulometrias são tipicamente entre 0,005 e 1 μm com rotações a 150 rpm (Voort, 1999) atingindo taxas de remoção inferiores quando comparadas com o estágio anterior (Zipperian, 2011).

Na Figura 3. 15, é possível visualizar os estados de superfície para três granulometrias obtidos através de um polimento sequencial numa superfície metálica comum. Primeiro, realizaram-se duas fases de polimento grosseiro com duas dimensões de grão de diamante e posteriormente uma de polimento fino com carboneto se silício,

sendo possível constatar que os resultados evidenciam que, com o avanço das etapas de polimento, as marcas existentes na superfície vão sendo suprimidas e vão ocorrendo incrementos no brilho da área trabalhada.

Adicionalmente, o polimento mecânico pode fazer uso da ação de agentes lubrificantes, tipicamente à base de álcool ou água, que humedecem o pano, atuando de acordo com o já referido para o processo de lixamento (Voort, 1999).

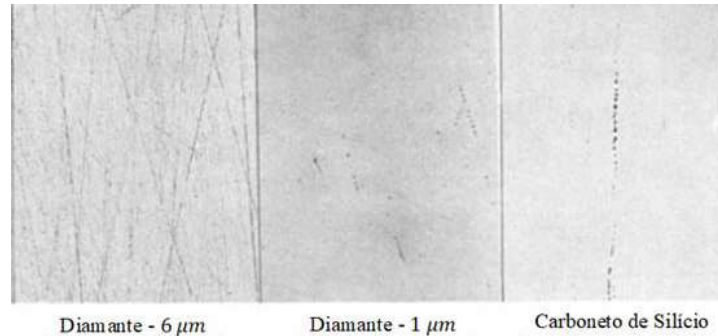


Figura 3. 15 - Impacto da granulometria e natureza do abrasivo no polimento de superfície metálica (adaptado de (Voort, 1999)).

Polimento Eletrolítico

Polimento eletrolítico, também comumente referido por polimento eletroquímico ou anódico, é um método que, no contexto da preparação metalográfica, remonta a 1935, ano em que foi executado com sucesso pela primeira vez (Voort, 1999). Objetivamente, esta técnica executa uma corrosão controlada na amostra, isto é, remove o material desejado à superfície, propiciando baixa rugosidade e brilho. Na Figura 3. 16 é possível observar o esquema representativo deste processo. A remoção de material é alcançada com a anodização do metal da amostra, que é inserido num banho eletrolítico, onde se encontra presente um material inerte, o cátodo. Quando é aplicada corrente ao sistema, os íons do ânodo transferem-se para o cátodo, ou seja, partículas metálicas migram do amostra para o material inerte presente no banho eletrolítico, deixando exposta uma nova superfície (Rohde, 2010).

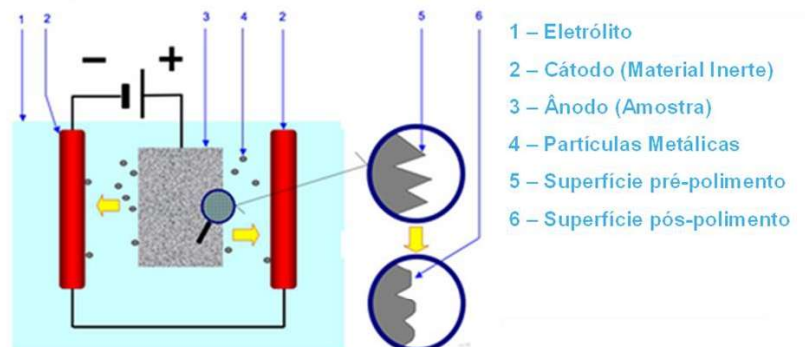


Figura 3. 16 - Esquema representativo do processo de polimento eletrolítico (adaptado de (ANCORP, 2019)).

O sucesso na aplicação desta técnica está, essencialmente, dependente do metal da amostra e do eletrólito usado, não sendo adequado a metais onde exista uma composição química desigual, microsegregações ou com inclusões não metálicas (World Iron & Steel Co.,Ltd, 2021). O tipo de eletrólito é escolhido em função do metal a polir sendo que podem ser compostos por diversas substâncias diferentes (Rohde, 2010). Outros fatores relevantes neste tipo de polimento remetem para a intensidade da corrente, voltagem, temperatura do eletrólito e tempo do processo, todos eles estão também dependentes do metal e eletrólito usados (Voort, 1999).

3.4.5 Ataque Químico

A última etapa do procedimento de preparação metalográfica é denominada por revelação, sendo que a técnica mais recorrente é o ataque/contração química (Akca & Trgo, 2015). Trata-se de um método necessário para gerar contraste na superfície do amostra com o intuito de visualizar algumas características (identificação de fases, tamanho de grão, dimensões da soldadura, etc.) da sua micro e macroestrutura (Zipperian, 2011). Além disso, possibilita a remoção de uma espessura reduzida de material onde é suprimida a estrutura alterada proveniente da última etapa efetuada (Kumar & Sahoo, 2005), o que se trata de uma característica importante do processo pois, como já referido anteriormente, estas análises metalográficas são tipicamente feitas com recurso a microscópios óticos, o que implica a exposição das amostras à luz. Garantindo ainda uma maior uniformização do estado de superfície, obtêm-se direções menos aleatórias no que aos raios refletidos diz respeito, tal como esquematizado na Figura 3. 17, viabilizando uma melhor revelação da morfologia da amostra.

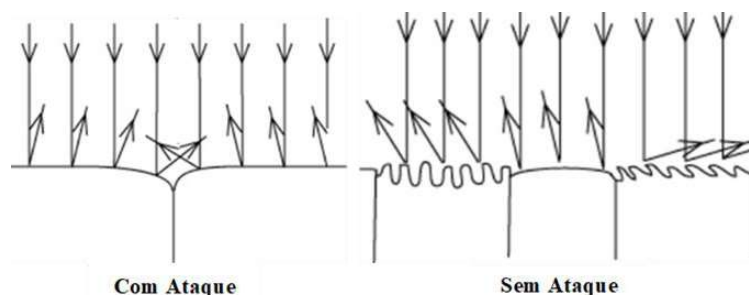


Figura 3. 17 – Representação esquemática da reflectividade em superfícies de amostras metalográficas com e sem ataque químico (adaptado de (Kumar & Sahoo, 2005)).

A execução de um ataque químico consiste na aplicação de um reagente – tipicamente um ácido misturado com um elemento solvente - na superfície que se pretende revelar. Ao reagir com o material, promove reações de oxidação-redução, atingindo os efeitos de contraste e uniformização de superfície pretendidos (Rohde, 2010), como é observável no exemplo da Figura 3. 18 de uma superfície de cobre

antes e depois da revelação feita com ataque químico, onde é possível observar o efeito do processo na identificação da sua estrutura de grão (Kumar & Sahoo, 2005). A seleção dos elementos do reagente a usar bem como o método de aplicação (ataque por imersão, ataque por gotejamento, etc.) dependem das características do material da amostra, pelo que, para a sua definição deve ser consultada documentação apropriada para orientar nesse processo (ASM, 1992). Além disso, o sucesso deste procedimento está diretamente relacionado com outros fatores como a qualidade do polimento, uma solução química apropriada ao material ou o tempo de aplicação da mesma (Voort, 1999).

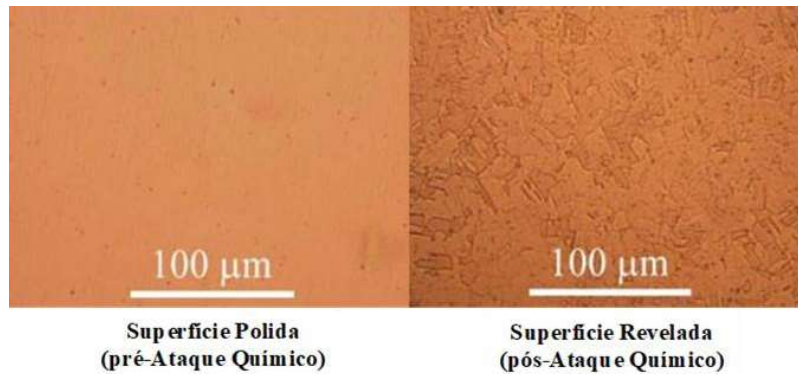


Figura 3. 18 Superfície de amostra em cobre antes e depois ataque químico (adaptado de (Kumar & Sahoo, 2005)).

4 Caracterização do Processo Atual de Corte e Preparação de Amostras

No presente capítulo, serão abordados diversos temas que caracterizam o atual processo implementado na MCG. Primeiramente, será feita uma caracterização do Braço de Controlo de Suspensão de modo que sejam conhecidos os seus componentes e respetivos materiais, oferecendo uma visão mais holística acerca do mesmo. Seguidamente, serão descritas as metodologias adotadas no processo atual de preparação de amostras para análises metalográficas, que irão incidir no corte, lixamento e ataque químico. Por fim, será feita uma análise do processo da qual permitirá identificar os principais problemas e suas causas associadas ao processo de preparação de amostras.

4.1 Braço de Controlo de Suspensão

Um dos componentes produzidos atualmente pela MCG, e que se encontra no âmbito do presente trabalho, é o Braço de Controlo de Suspensão. Trata-se de um componente automóvel, que possibilita a ligação entre o chassis e o *hub* da roda, onde se encontra acoplada a suspensão. Na Figura 4. 1 encontra-se representado um esquema representativo deste tipo de sistemas também conhecidos como estruturas de suspensão *MacPherson*, que funcionalmente permite que os sistemas conectados estejam solidários entre si aquando há movimento e, adicionalmente, promove o amortecimento de impactos.

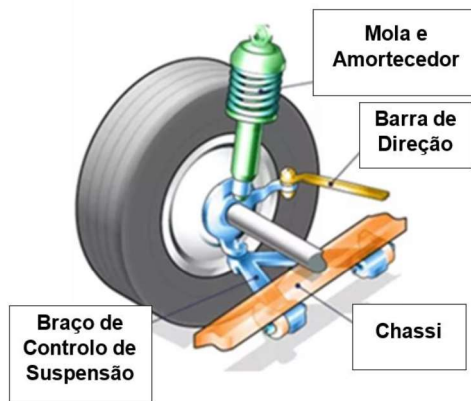


Figura 4. 1 - Esquema de suspensão MacPherson (adaptado de (Costa, 2012)).

O componente objeto de estudo deste trabalho é composto por 5 elementos distintos e as terminologias internas adotadas para referenciar cada um deles são *Upper Shell*, *Lower Shell*, *Bushing*, *Bearing Pin* e *Joint Head*, destacados como A, B, C, D e E na Figura 4. 2, respetivamente.

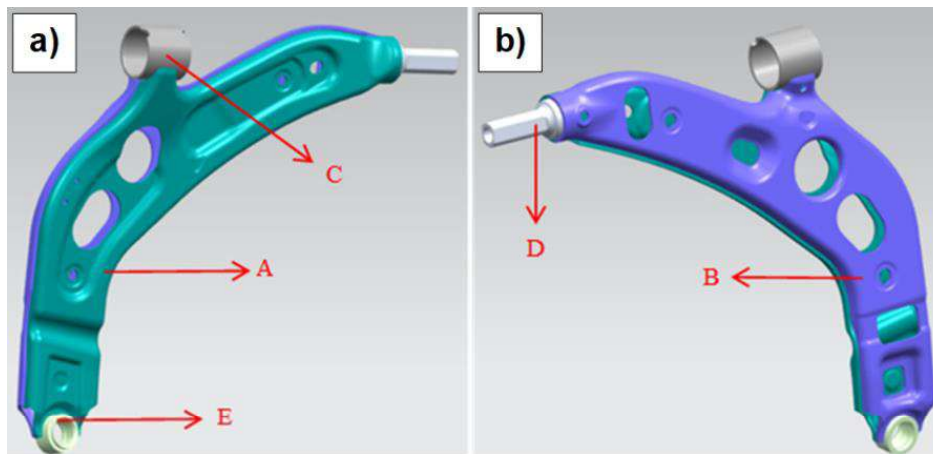


Figura 4. 2 - Braço de Controlo de Suspensão: a) vista frontal; b) vista traseira.

Tanto a *Upper Shell* como a *Lower Shell* são fabricados por estampagem a frio numa chapa com 3,51 mm de espessura, em aço HR660Y760T-CP. De todos os materiais presentes no componente, este é o que apresenta maior dureza, pelo que, é também o mais difícil de cortar. Pela sua nomenclatura é possível recolher informação relativa ao método de fabrico, propriedades mecânicas e características metalúrgicas como se encontra exposto na Figura 4. 3. A composição química e propriedades mecânicas estão representadas na Tabela 4. 1.

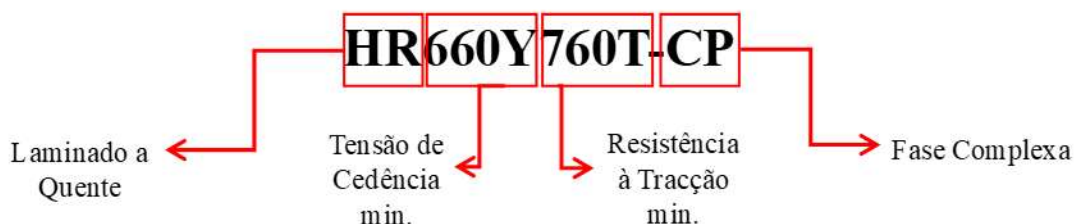


Figura 4. 3 - Interpretação da referência do material base.

Tabela 4. 1 - Propriedades do aço HR660Y760T-CP (cortesia MCG).

Composição Química (pond. %)	Propriedades Mecânicas
- C ≤ 0,18	
- Si ≤ 1,00	
- Mn ≤ 2,20	
- P ≤ 0,050	- σ_y : 660 – 820 (MPa)
- S ≤ 0,010	- R _m : 760 – 960 (MPa)
- 0,015 ≤ Al ≤ 0,12	- E: 277 (GPa)
- Ti + Nb ≤ 0,25	- Dureza: 35 HRC
- Cr + Mo ≤ 1,00	
- B ≤ 0,005	
- Cu ≤ 0,20	

O *Bushing* é um elemento estampado e produzido internamente em aço S420MC, enquanto o *Bearing Pin* é composto no aço 20MnB4 e o *Joint Head* em aço C15C, sendo que são obtidos por *outsourcing*, isto é, tratam-se dos únicos elementos do Braço de Controlo que não são fabricados internamente. Todos os componentes mencionados encontram-se unidos entre si com recurso a processos de soldadura MAG (*Metal Active Gas*) contabilizando uma extensão total de cordão de 1785 mm com espessuras que, dependendo da zona, podem ter 1,1, 2,2 ou 2,6 mm, cujo material é o aço ED-FK800. Depois de ligados todos os elementos, o conjunto, na sua totalidade, possui uma massa de, aproximadamente, 3,976 kg. Trata-se de um componente que possui duas configurações simétricas, como é constatável na Figura 4. 4, com o propósito de serem instaladas do lado esquerdo e direito da viatura. Pode-se então afirmar que este é um componente leve, apresenta elevada dureza e resistência mecânica, características que lhe permitem suportar os elevados esforços (forças de corte, momentos fletores, etc.) a que é submetido durante o movimento do automóvel.

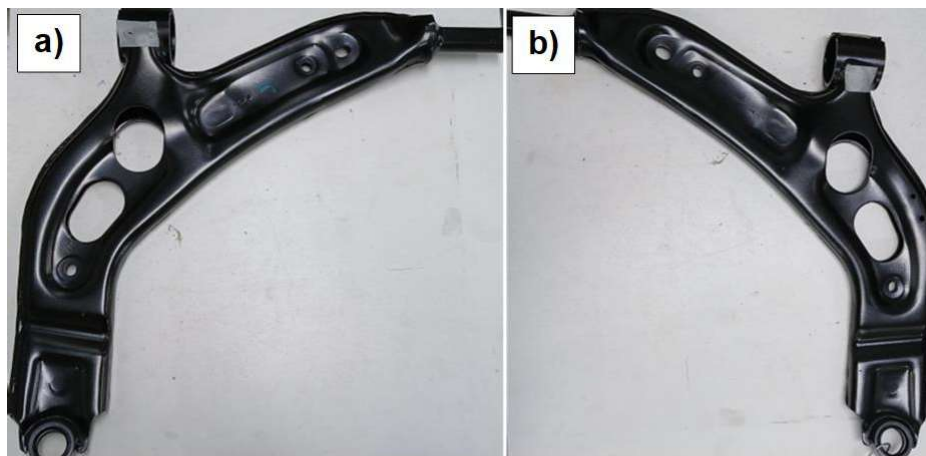


Figura 4. 4 - Braço de Controlo de Suspensão: a) peça esquerda; b) peça direita.

4.2 Caracterização do Corte

Para inspeção, o Braço de Controlo de Suspensão é submetido a um processo destrutivo, mais especificamente, o corte. A caracterização dos cortes pretendidos no componente é de extrema relevância porque estão diretamente relacionados com alguns dos problemas que existem no atual processo de inspeção da peça.

Requer-se que, cada peça, seja seccionada em 13 amostras, sendo que o esquema de corte pretendido para o componente encontra-se visível na Figura 4. 5, onde as linhas laranjas representam as linhas dos cortes que devem ser efetuados numa peça esquerda. É relevante referir que existe para o Braço de Controlo simétrico o respetivo esquema de corte análogo.

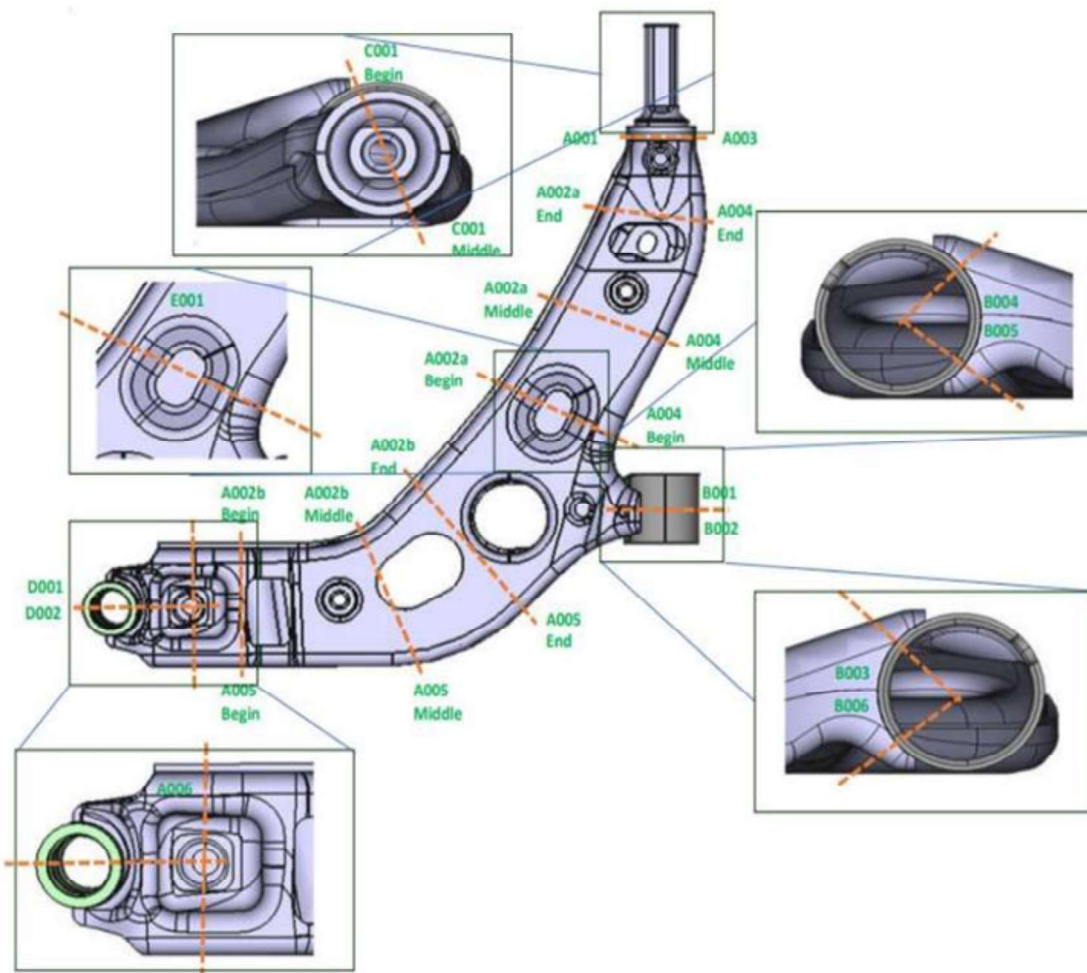


Figura 4. 5 - Esquema de corte.

Uma condição extremamente relevante, que se tem de assegurar, diz respeito à orientação da ferramenta de corte, neste caso, o disco, em relação ao plano da soldadura. É absolutamente crucial garantir uma condição de perpendicularidade entre estes uma vez que isso terá impacto na orientação das estrias geradas nas faces cortadas, visto que um corte que não respeite esta condição pode apresentar estrias com orientações enviesadas/oblíquas, o que por sua vez pode dificultar a análise metalográfica, contribuindo para o enviesamento dos resultados.

Na Figura 4. 6 a) é possível constatar um exemplo de uma superfície de corte que não se pretende enquanto na Figura 4. 6 b) encontra-se a orientação desejada.

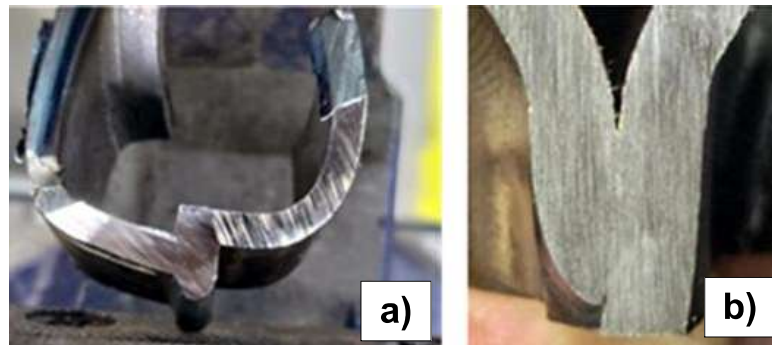


Figura 4. 6 – Direção das estrias de corte: a) incorretas; b) correctas.

4.3 Preparação das Amostras Metalográficas

Na Figura 4. 7, encontra-se representado o atual processo executado na preparação das amostras metalográficas para o componente em análise. Este processo tem início com a etapa de corte, realizada em duas fases distintas, denominadas por corte grosseiro e corte fino, estando por sua vez seguido de uma etapa de lixamento e uma de ataque químico. Ao confrontar este procedimento com as práticas convencionais descritas no subcapítulo 0, percebe-se que há algumas diferenças em relação ao método típico apresentado na literatura, nomeadamente, o procedimento adotado exclui as etapas de inclusão em resina e polimento. A ausência da inclusão em resina é justificada, fundamentalmente, pelo facto de as dimensões das amostras permitirem o seu manuseio sem a necessidade de suporte adicional, já o polimento não é realizado pois a análise macroscópica que se pretende realizar não requer uma superfície com um grau de refinamento que este oferece. Consequentemente, o tempo de processo é reduzido focando apenas nas ações que são estritamente necessárias para a análise pretendida. Nos subcapítulos seguintes, cada uma destas etapas encontra-se devidamente detalhada.

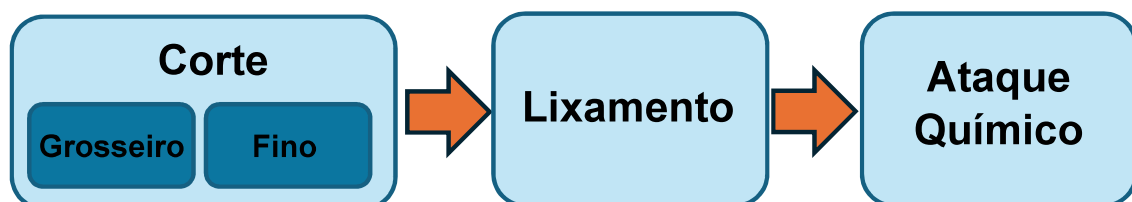


Figura 4. 7 – Atual processo de preparação de amostras metalográficas.

4.3.1 Corte

Existindo a necessidade de particionar as peças Braço de Controlo nas frações que se encontram caracterizadas na Figura 4. 5, no processo atual, foi adotado um procedimento que se encontra dividido em dois estágios distintos: corte grosseiro e

corte fino. Estas operações coexistem separadamente por necessidade, sendo que a execução da segunda está, inevitavelmente, dependente da prévia conclusão da primeira. A razão pela qual se efetua o corte em duas etapas está associada ao equipamento disponível para a realização do corte fino, mais concretamente ao facto de este não possuir uma área útil de trabalho compatível com as dimensões de atravancamento do Braço de Controlo. Por isto, recorre-se a um equipamento de corte portátil com avanço manual, para executar o corte grosseiro, tratando-se do modelo TC-MC 355 da *Einhell* (Figura 4. 8).



Figura 4. 8 - Einhell TC-MC 355

Com este dispositivo, realiza-se um corte inicial mais grosseiro que divide a peça em 10 porções (9 cortes), conforme ilustrado na Figura 4. 9. Este corte preliminar é efetuado com o intuito de reduzir a peça em seções com tamanhos mais pequenos e adequados, isto é, facilitando a execução do estágio de corte seguinte. Um desses cortes é considerado como um corte auxiliar, pois tem a função de separar o *Bushing* da restante da peça, no entanto, é importante destacar que este não corresponde a nenhum dos cortes pré-identificados na Figura 4. 5, sendo uma etapa adicional adotada para a preparação das amostras. A sequência exata em que estes cortes são realizados está detalhada na Tabela 4. 2, que organiza e sistematiza o todo processo.

Tabela 4. 2 - Sequência da etapa de Corte Grosseiro.

Sequência	Designação do Corte
1º	A001-A003
2º	A002a <i>Middle</i> –A004 <i>Middle</i>
3º	A002a <i>End</i> –A004 <i>End</i>
4º	A002b <i>End</i> –A005 <i>End</i>
5º	A002b <i>Middle</i> –A005 <i>Middle</i>
6º	A006
7º	A002b <i>Begin</i> –A005 <i>Begin</i>
8º	A002a <i>Begin</i> –A004 <i>Begin</i>
9º	Corte auxiliar

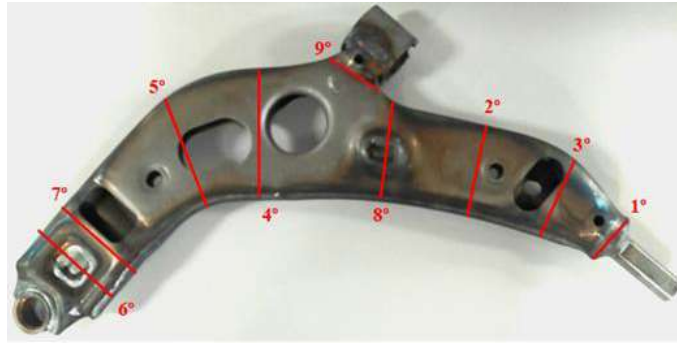


Figura 4. 9 - Cortes executados na etapa de corte grosseiro.

O corte grosseiro é executado pelo disco Tyrolit 39053 com 350 mm composto por abrasivo de óxido de alumínio com de granulometria de 46 na escala FEPA P. Este disco, quando combinado com o equipamento de corte utilizado, apresenta uma precisão e qualidade de corte consideravelmente reduzida em relação ao que era desejado, o que, aliado à elevada dureza do aço, propicia o desenvolvimento de superfícies de corte com rugosidades consideráveis e raras mais elevadas, tal como é constatável na

Figura 4. 10.



Figura 4. 10 - Morfologia de corte obtida na etapa de Corte Grosseiro.

Adicionalmente, é relevante constatar que se gera calor fruto do trabalho de corte que o disco realiza na interface com a peça. Uma vez que não existe um sistema de refrigeração incorporado nesta etapa do processo, a dissipação desta energia é feita através do próprio componente. Quando, durante a execução do processo, esta particularidade é incorretamente ponderada pelo operador, sobretudo na definição da velocidade de avanço, existe a possibilidade de se gerarem queimaduras na superfície de corte (Figura 4. 11 b)). Acrescente-se que as amostras geradas encontram-se a elevadas temperaturas, só se tornando manuseáveis ao fim de algum tempo de arrefecimento, onde para além disso, durante o corte são projetadas uma quantidade significativa de micro-aperas incandescentes, o que expõe o operador a riscos (Figura 4. 11 a)).

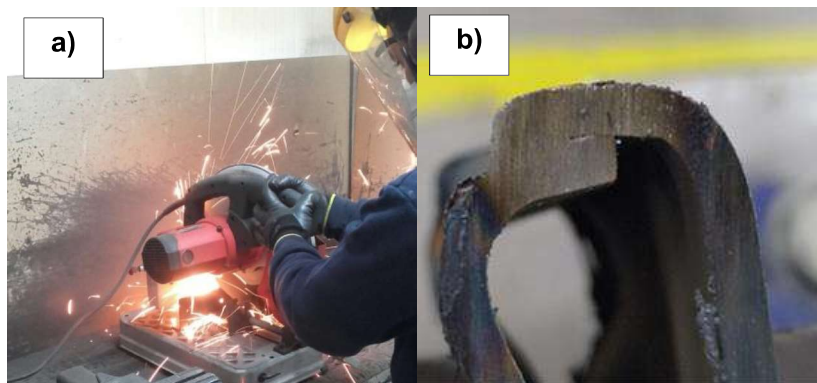


Figura 4. 11 – a) Fagulhas projectadas; b) Queimaduras na amostra.

No que respeita à fixação da peça, esta é realizada com recurso a um sistema de aperto mecânico com mordentes de faces planas incorporado no próprio equipamento, assim como destacado na Figura 4. 12. Tal implica que, no final de cada corte, a peça tenha de ser reposicionada para a execução do seguinte. No entanto, o posicionamento da peça é feito com base na sensibilidade do operador por impossibilidade de o fazer por outra metodologia, o que implica que as zonas cortadas não respeitam necessariamente as zonas pré-identificadas, isto é, não existe repetibilidade no posicionamento da peça, não satisfazendo as reais condições do corte pretendidas.



Figura 4. 12 - Sistema de aperto da Einhell TC-MC 355.

Suplementarmente, no que diz respeito ao corte A001-A003 não existe nenhuma zona do Braço que possibilite a sua fixação no equipamento de corte devido à sua geometria naquela região. Pela observação da Figura 4. 13, a curvatura presente na zona da peça onde o aperto seria necessário, impede que esta esteja devidamente imobilizada durante o corte, tendo inclusivamente sido testado fazê-lo no passado, mas sem sucesso. Posto isto, entendeu-se que, independentemente da sequência dos cortes adotada, fixar a peça com o sistema existente no equipamento não seria viável, sendo por isso que a fixação é feita manualmente, ou seja, é o operador que agarra a peça durante o processo, carecendo então de atenções redobradas da sua parte. Uma vez que, como já referido, a peça aquece significativamente durante o processo, este passou a ser o primeiro corte a ser executado de forma a possibilitar uma maior dissipação de calor, evitando queimaduras no operador e facilitando-lhe o manuseamento da mesma.



Figura 4. 13 - Curvatura da zona de aperto no corte A001-A003.

No que toca ao corte A002a *Begin*–A004 *Begin*, devido à forma como a peça tem de estar posicionada no sistema de aperto, mesmo quando o disco abrasivo já se encontra com diâmetro mais reduzido devido ao desgaste (sensivelmente 150 mm de diâmetro), existe sempre contacto na zona do *Bushing*, gerando um pequeno corte neste componente tal como está apresentado na Figura 4. 14 b). Este corte não coincide com nenhum dos outros que se pretendem efetuar, pelo que a integridade das zonas de análise pretendidas não são comprometidas, no entanto, o disco é submetido a um esforço extra o que aumenta o seu risco de fratura.

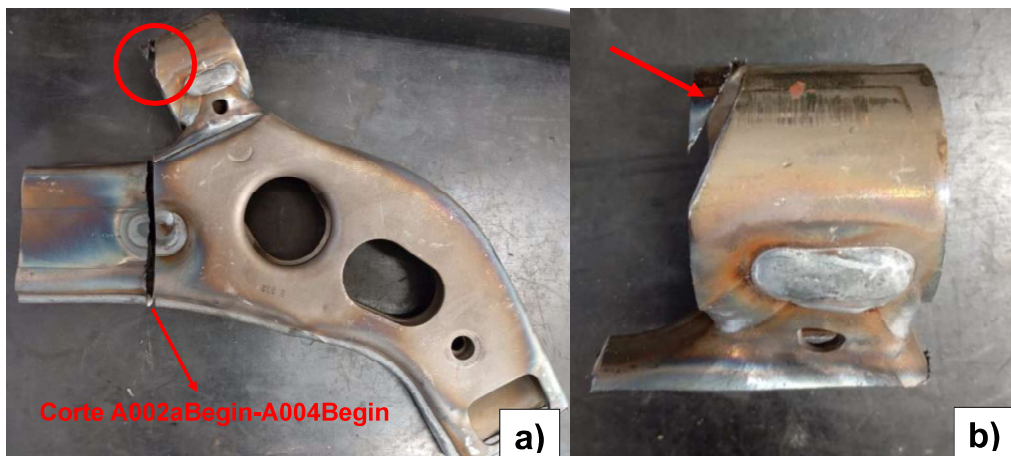


Figura 4. 14 - a) Corte A002a *Begin* - A004 *Begin*; b) Corte indesejado no *Bushing*.

Após terminado o primeiro estágio de corte, que na sua totalidade demora cerca de 30 minutos até ser concluído, procede-se à realização do Corte Fino com recurso ao equipamento apresentado na Figura 4. 15, o modelo *Brillant 250 X* da ATA. Nesta fase, os restantes 7 cortes, esquematizados na Figura 4. 16, são executados em cerca de 45 minutos para cada peça, onde a ordem de execução da cada um não é relevante, à exceção dos cortes angulares no *Bushnig* que são feitos apenas após o corte B001-B002, sendo que, na Tabela 4. 3 encontra-se a sequência típica executada neste estágio.



Figura 4. 15 - ATA Brillant 250X.

Tabela 4. 3 - Sequência da etapa de Corte Fino.

Sequência	Designação do Corte
1º	B001-B002
2º	B004
3º	B005
4º	B003
5º	B006
6º	D001-D002
7º	C001 <i>Begin</i> -C001 <i>Middle</i>

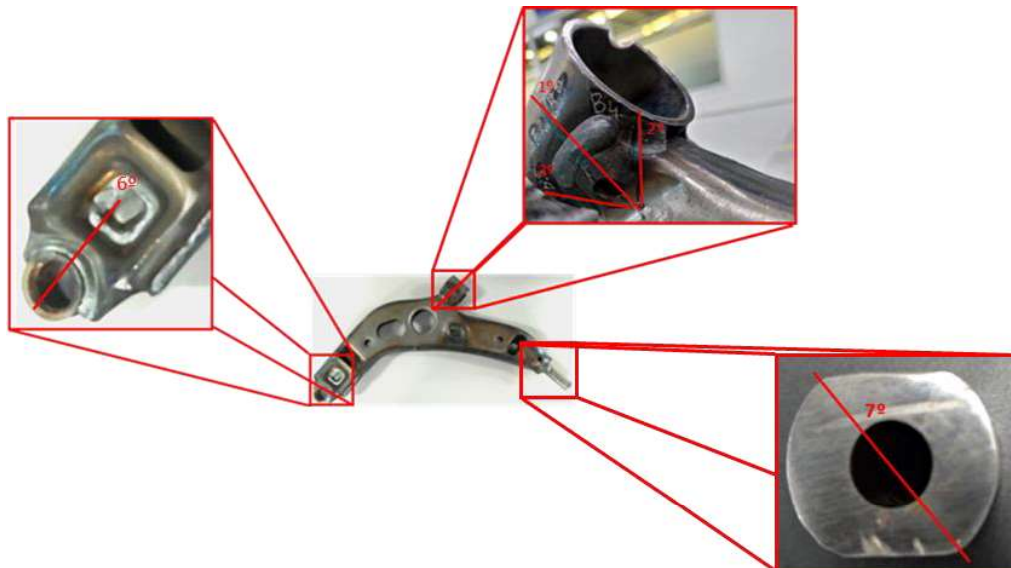


Figura 4. 16 - Cortes executados na etapa de Corte Fino.

Esta etapa de corte é também feita com recurso ao disco abrasivo, o *Pferd SG Lab Steel* com abrasivo de óxido de alumínio, granulometria de 46 na escala FEPA e de 300 mm de diâmetro. A precisão alcançada com este disco é superior quando comparada com a do Corte Grosso, devido ao facto de este equipamento ser mais robusto do que o utilizado no estágio anterior e por estar provido de um sistema de refrigeração a Óleo Ecocool RF 14GD em ciclo fechado, sendo que, nesta fase, não se constata queimaduras nas áreas cortadas, conforme se ilustra na Figura 4. 17.

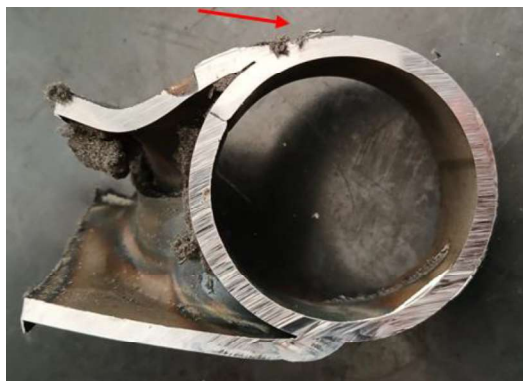


Figura 4. 17 - Morfologia obtida na etapa de Corte Fino – corte B001-B002.

No que se refere ao princípio de fixação do Braço de Controlo durante o Corte Fino, este procedimento diferencia-se do Corte Grossoiro ao utilizar dois pontos de aperto capazes de segurar a peça com maior eficiência, como ilustrado na Figura 4. 18. Estas amarras de fixação garantem uma maior estabilização da peça no decorrer do corte, minimizando os efeitos das vibrações e reduzindo a probabilidade de eventuais movimentos indesejados.

Na Tabela 4. 4, encontram-se características técnicas dos equipamentos utilizados para cada uma das etapas de corte das peças.



Figura 4. 18 - Amarras de fixação da ATA Brillant 250X

Tabela 4. 4 - Parâmetros técnicos dos equipamentos de corte.

Corte Grossoiro	Corte Fino
<i>Einhell</i> TC-MC 355	ATA <i>Brillant</i> 250X
Potência do Motor: 2,3 kW	Potência do Motor: 4 kW
Velocidade de Rotação: 4000 RPM	Velocidade de Rotação: 700-3000 RPM
Dimensões do Disco: $\varnothing 355 \times \varnothing 25,4 \times 3,2$ mm	Dimensões do Disco: $\varnothing 300 \times \varnothing 32 \times 2$ mm
Peso: 15 Kg	Peso: 130 Kg

4.3.2 Lixamento

No que respeita ao lixamento das superfícies de corte, este é feito no equipamento ilustrado na Figura 4. 19, onde, tipicamente, recorrem-se a lixas P80 e P320 para

realizar este desbaste abrasivo. A escolha entre estas é, naturalmente, feita com base no estado da superfície que apresentam, por exemplo, para as superfícies mais grosseiras, a primeira lixa aplicada é a P80, sendo que por vezes se recorre à P320, posteriormente. Já nas superfícies de corte com acabamento mais fino, normalmente, apenas é aplicada a P320. Todo o processo tem uma duração de, aproximadamente, 45 minutos. Diga-se ainda, que, durante a sua execução, o processo de lixamento tem a ação de um caudal de água, que vai removendo as micro-aperas geradas.



Figura 4. 19 - Equipamento para lixamento.

4.3.3 Ataque Químico

Para a contrastação das peças, é realizado um ataque químico sob a superfície das mesmas pela aplicação de um reagente designado por Nital, composto por ácido nítrico e etanol, com o auxílio de um pincel, e o cordão de soldadura é revelado conforme o exemplo na Figura 4. 20. A peça é lavada com água, enxugada com um pano e colocada uma proteção anticorrosiva para que a zona da soldadura não oxide imediatamente, levando a que toda a etapa demora um período de execução a rondar os 30 minutos.

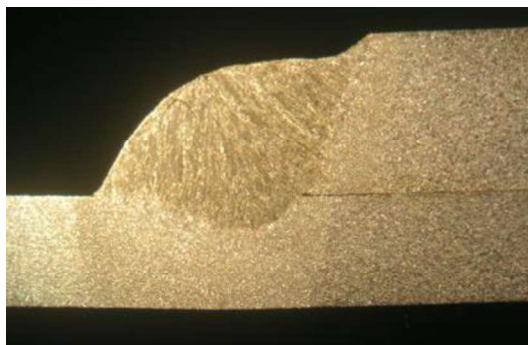


Figura 4. 20 - Superfície proveniente do corte A002a *Middle*-A004 *Middle* após revelação.

4.3.4 Sumário do processo de preparação de amostras

A partir da Tabela 4. 5 é possível obter uma visão mais generalizada de todo o processo de preparação de amostras metalográficas do Braço de Controlo de Suspensão, onde estão evidenciados, resumidamente, os principais aspetos de cada

etapa, de onde se destaca o tempo total necessário que cada peça demora durante este procedimento, cerca de 150 minutos. O corte, dividido entre a fase grosseira e fina, consome cerca 50% do tempo total do processo, sendo o processo de maior dificuldade de execução. Esta etapa inicial é crucial uma vez que define a base para todas as operações subsequentes. O lixamento, desempenha um papel vital no processo ao garantir um acabamento superficial uniforme e indicado para a revelação das microestruturas feitas com recurso a um ataque químico, permitindo uma análise detalhada e precisa, sendo que estes dois últimos tomam os restantes 50% do tempo total de processo.

Tabela 4. 5 - Sumário do processo de preparação de amostras metalográficas.

Etapa	Características	Tempo de Operação p/ peça (min)
Corte	Grosseiro	8 cortes + 1 auxiliar
	Fino	7 cortes
Lixamento	Lixas P80 e P320	45
Ataque Químico	Nital	30
		Total: 150 min (cerca de 2h e 30 min)

4.4 Identificação de Problemas

Ao analisar-se todo o processo de preparação de amostras para análise macrográfica descrito no subcapítulo 0, foram constatadas algumas limitações na metodologia atualmente implementada. Aquilo que se deduz de forma mais imediata é que o tempo total de operação é, efetivamente, bastante longo, não sendo compatível com os parâmetros de produtividade pretendidos, sendo evidência disso mesmo as filas de espera de Braços de Controlo que se geram, conforme se ilustra na Figura 4. 21.



Figura 4. 21 – Acumulação de peças em espera para análise macrográfica.

Uma das causas associadas a este problema está relacionado com a execução de tarefas de fixação da peça por ser um procedimento cuja concretização se revela de extrema inconveniência devido à reduzida simetria e planicidade em diversas regiões do Braço de Controlo de Suspensão. Como consequência, trabalhos desta natureza alongam os tempos entre os respetivos cortes, levando a que todas as outras etapas de preparação também se estendam no tempo, adiando a conclusão de todo o

trabalho. Através da Tabela 4. 5, é possível comprovar que é na etapa inicial, referente à concretização dos cortes, correspondente a um total de cerca de 75 minutos de tempo de operação, que se encontra a maior porção de tempo despendido, sendo representativo de, aproximadamente, 50% do tempo total de preparação das amostras. Adicionalmente, o entrave colocado na fixação dos Braços de Controlo é referente a esta mesma etapa, pelo que todas as particularidades relatadas anteriormente estão diretamente dependentes deste ponto do processo. Posto isto, o foco das limitações do atual processo de preparação de amostras é, inequivocamente, o corte das peças visto que diversas problemáticas estão associadas.

Como já relatado, a etapa em questão é consumada em dois estágios com características de corte distintas o que, por si só, tem impacto nos tempos de operação das etapas de lixamento consequentes. O facto de as respetivas áreas de corte geradas possuírem configurações com diferentes morfologias, exige tempos de operação díspares durante as mesmas. Isto é, as superfícies cujas qualidade de corte se encontrem mais distantes dos padrões pretendidos, requerem períodos de lixamento mais longos do que as outras. sendo possível afirmar que esta heterogeneidade inerente à etapa de corte é um problema com impacto no tempo do processo. O Corte Grosseiro é claramente aquele que gera piores superfícies de corte, o que não acontece só exclusivamente pelo disco que é utilizado. Primeiramente, o próprio equipamento é algo rudimentar para a tarefa em causa, uma vez que devido aos esforços a que se encontra submetido, não oferece garantias de rigidez no decorrer do corte, vibrando de forma significativa. Para além de isto resultar nos padrões de corte já descritos, paralelamente também implica danos causados ao próprio, levando-o a deixar de estar operacional recorrentemente (Figura 4. 22).



Figura 4. 22 – Einhell TC-MC 355 em estado NOK (Not Ok).

Adicionalmente, reitera-se o aspeto relacionado com a fixação da peça, não no âmbito dos tempos que demoram a realização dos apertos, mas no impacto que as suas propriedades têm na superfície de corte. Note-se que apenas existe um aperto na mesma durante esta etapa, o que leva a que, à medida que o corte é executado, uma maior instabilidade ocorra na parte da peça que não se encontra fixa. Adicionalmente, a falta de planicidade do Braço de Controlo dificulta todo o processo de imobilização

do mesmo para os cortes nas zonas pretendidas, sendo que por vezes a peça sai de posição durante a ação do disco. Tudo isto tem impacto direto na condição da superfície de corte, resultando em regiões mais grosseiras. Além disso, reitere-se ainda o problema que já foi descrito no subcapítulo 0. Para o corte A001-A003 não se consegue fixar a peça com o sistema de aperto do equipamento, pelo que é o operador que a segura durante o processo, conduzindo este a uma situação de maior exposição ao risco.

Já no contexto do Corte Fino, é também importante referir que, apesar da melhoria da qualidade do corte desta fase do trabalho quando comparada com o corte anterior, os padrões de qualidade da superfície gerada não atingem as pretensões idealizadas. Na fixação do componente, o problema identificado é comum ao corte anterior pois, apesar da imobilização da peça ser mais eficaz por existirem dois pontos de aperto por corte, a falta de planicidade mantém-se e pelo desgaste desses mesmos sistemas de aperto as dificuldades de fixação permanecem. Para além do mais, existe uma limitação no que toca à utilização de discos com performances mais elevadas, uma vez que o equipamento em causa não assegura velocidades de rotação requeridas por esse tipo de discos de corte devido ao seu desgaste. Há ainda que relembrar que a não homogeneidade nas áreas cortadas tem como génese a necessidade de recorrer ao Corte Grosseiro, necessidade essa causada pela falta de área útil no equipamento disponível para o Corte Fino, pelo que é também um dos entraves relacionados com esta etapa do corte.

Por último, refira-se que as propriedades mecânicas do material apresentam desafios na obtenção dos padrões de corte desejados uma vez que se trata de um componente com durezas bastantes elevadas.

Posto isto, na Tabela 4. 6 encontram-se sumarizados os problemas identificados no processo e as causas a eles associadas.

Tabela 4. 6 - Problemas e causas identificados.

Problemas Identificados	Causas
Tempo até conclusão do processo total de preparação das amostras	Tempo de Corte: limitações nos parâmetros de corte Tempo gasto no posicionamento e fixação da peça Heterogeneidade nas superfícies de corte entre os estágios grosseiro e fino Procedimento de corte pouco automatizado
Qualidade dos cortes alcançada	Características dos equipamentos e discos utilizados Fixação deficiente do Braço de Controlo de Suspensão e instabilidade no disco Dureza elevada do aço HR660Y760T-CP
Posicionamento e fixação do componente	Inexistência de dispositivos de posicionamento customizados à peça Dispositivos de aperto com desgaste

5 Automatismo de Corte: Concepção e Detalhes Técnicos

Com o intuito de solucionar os problemas inerentes ao processo de preparação de amostras para as análises macrográficas pretendidas, foi projetado um automatismo de corte customizado, especificamente pensado para esta finalidade. Na Figura 5. 1, é possível visualizar o equipamento que possui dimensões máximas de 1830x1494x1267 mm e uma massa aproximada de 1088 kg.

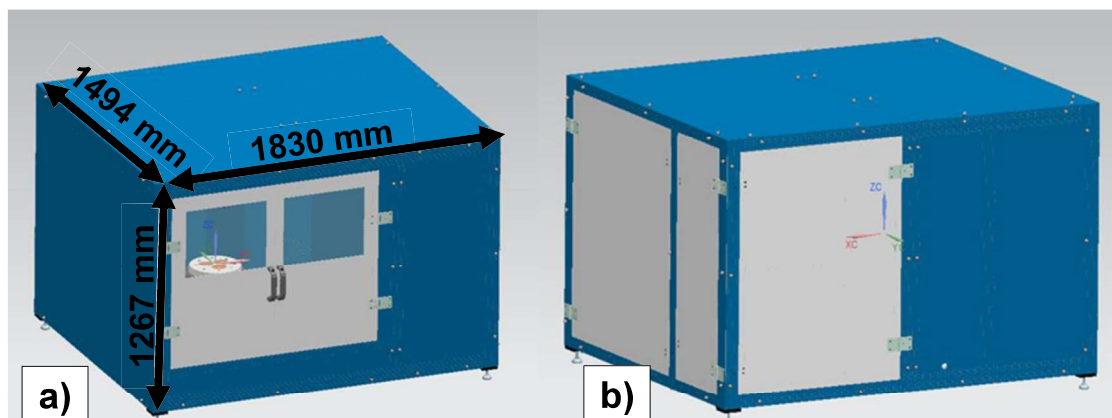


Figura 5. 1 - Automatismo de corte: a) vista frontal; b) vista traseira.

No entanto, é crucial destacar que o equipamento projetado não se encontra totalmente finalizado e apto para pleno funcionamento. Tal deve-se ao facto de que apenas foi solicitado o desenvolvimento de um sistema que se apresentasse como uma solução construtiva viável para o processo atual, portanto, todas as etapas referentes aos elementos de automação e eletrónica não foram incorporadas no plano de trabalho previsto.

O automatismo apresentado possui duas portas na zona frontal, que dão acesso à área de trabalho do equipamento, onde o processo de corte é realizado. No interior, está instalado um sistema composto por dois cursos lineares e um módulo rotativo (Figura 5. 2 a)), no qual é fixado um dos três pratos de trabalho, possibilitando a execução dos cortes pretendidos, sendo que o Plano de Corte (Figura 4. 5) está distribuído entre os três pratos que são intercambiáveis, isto é, alternam conforme os

cortes a serem realizados. A título representativo, na Figura 5. 2 b) é possível visualizar o Prato A posicionado no equipamento.

Adicionalmente, o automatismo está equipado com um disco de corte abrasivo a elevadas rotações que realiza o avanço e recuo em relação à peça, desempenhado assim o processo de corte requerido.

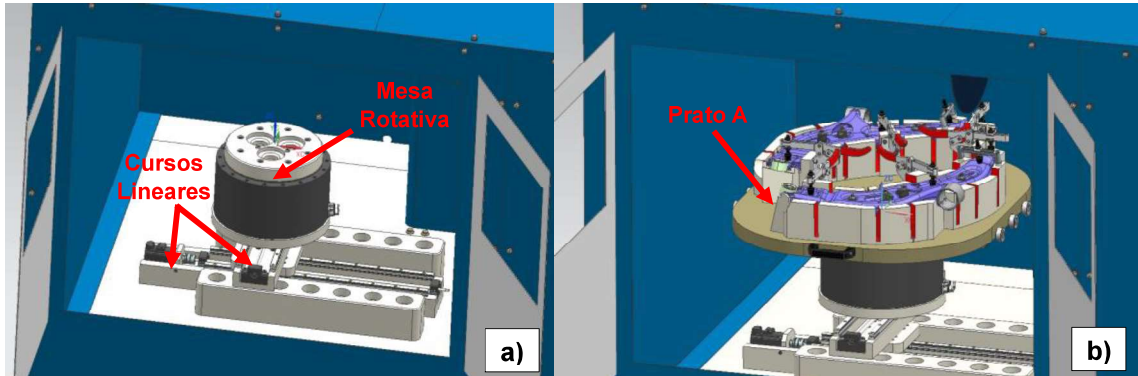


Figura 5. 2 – a) Sistemas de movimentos lineares e rotativo; b) Prato A no automatismo.

Por fim, como ilustrado na Figura 5. 3, ao abrir as portas laterais e traseira do equipamento, tem-se fácil acesso às áreas necessárias para ações de manutenção. Nessas áreas, é possível ter acesso ao sistema responsável pela geração de potência mecânica do disco, o Módulo de Corte, e o cilindro hidráulico responsável pelo movimento de ataque do disco. Note-se também a existência de regiões ainda por ocupar, correspondentes às zonas definidas para os restantes elementos a serem adicionados. Desta forma, o automatismo possui um *layout* flexível, capaz de acomodar futuras melhorias e expansões.

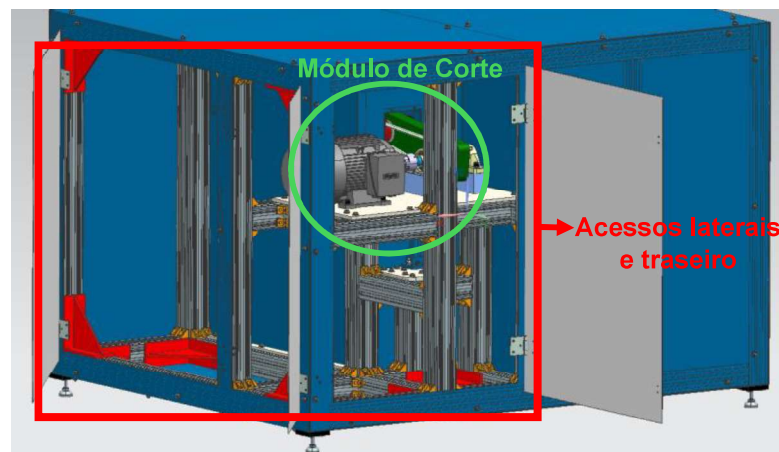


Figura 5. 3 – Acessos laterais do automatismo.

5.1 Desenvolvimento do Projeto

O presente subcapítulo aborda o desenvolvimento do automatismo em causa, com ênfase nos módulos fundamentais que compõem este equipamento e nos

procedimentos adotados para o seu dimensionamento. Inicialmente, é detalhado o módulo de corte, incluindo a seleção do disco de corte, testes de desempenho e a quantificação dos parâmetros de corte. De seguida, é abordada a escolha do motor e o sistema de transmissão de potência, com atenção especial aos veios, braços de suporte, rolamentos, correias e polias. São também explorados os sistemas de posicionamento e fixação, essenciais para a precisão operacional, assim como os movimentos lineares e rotativos do equipamento. Por fim, são discutidos os módulos referentes à estrutura do equipamento e o sistema de refrigeração.

5.1.1 Módulo de Corte

O primeiro elemento a ser desenvolvido no projeto do automatismo de corte foi o Módulo de Corte, que se encontra representado na Figura 5. 4. Trata-se de um sistema composto por um motor, que produz a potência necessária a fornecer ao disco, e pela ferramenta responsável pela execução dos cortes.

A potência é transmitida ao disco através de um sistema de transmissão, composto por duas polias e duas correias, onde cada cada polia, motora e movida, encontra-se acoplada ao respetivo veio, que estão suportados em rolamentos e/ou chumaceiras. O elemento Braço de Suporte (Figura 5. 4) tem um eixo de rotação coincidente com o eixo do motor e é o elemento estrutural deste sistema.

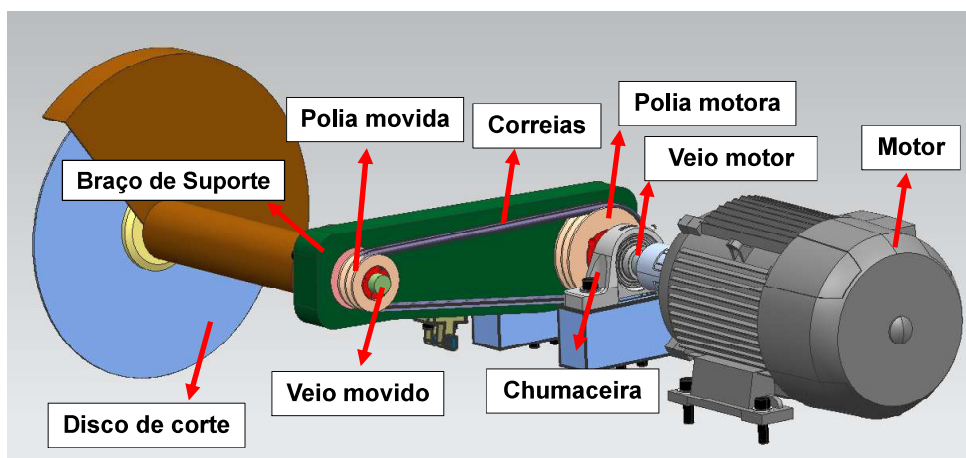


Figura 5. 4 – Módulo de Corte.

Disco de Corte

Neste subcapítulo, é abordado o processo de seleção do disco de corte para o automatismo, com foco nos testes realizados e na quantificação dos parâmetros de operação. A partir de propostas de diferentes fornecedores, foram conduzidos ensaios para avaliar a eficácia de cada disco em cenários de corte fino e grosseiro, considerando tanto a qualidade do corte quanto a durabilidade e compatibilidade com os equipamentos disponíveis. Posteriormente, os parâmetros de corte foram

estimados para garantir o desempenho pretendido do sistema, servindo de base para o dimensionamento dos restantes elementos do equipamento.

Testes de Corte

Com o intuito de selecionar a ferramenta mais adequada para o corte, foram contactados quatro fornecedores de discos de corte, aconselhados pelo *Supply Chain* da MCG. O problema foi-lhes apresentado e, com base nas informações dadas, cada representante efetuou uma proposta de disco. Para a verificação das mesmas, a execução de testes era primordial, no entanto, devido aos equipamentos disponíveis para a realização destes ensaios, foi apenas possível receber três discos, cuja respetiva informação técnica é apresentada no Tabela 5. 1.

Tabela 5. 1 - Características dos discos de corte testados (Bosch, 2021; Pferd, 2024; Tyrolit, 2024).



Referência	Dimensões (mm)	Velocidade de rotação aconselhada (rpm)	Tipo de Ferramenta	Plano de Corte Testado
<i>Pferd SG Lab Steel</i>	300 x 2 x 32	4400	Disco abrasivo	Plano de Corte Fino
<i>Tyrolit Premium 779428</i>	350 x 2,5 x 25,4	4400	Disco abrasivo	Plano de Corte Grosseiro
<i>Bosch Expert for Steel</i>	305 x 2,6 x 25,4	1500	Disco de serra circular com pastilhas em carboneto	Plano de Corte Grosseiro

O primeiro disco apresentado, tratava-se do disco *Pferd*, que já era usado na etapa de Corte Fino, o que, por isso, já se tinham referências internas da resposta do mesmo ao corte do Braço de Suspensão. Já o segundo disco sugerido, o *Tyrolit Premium 779428*, e o disco usado durante o processo de Corte Grosseiro, *Tyrolit Standard 390532*, não só eram do mesmo fabricante, como se tratavam de discos com características semelhantes, nomeadamente, nos materiais que os compunham. Por fim, o disco Bosch destacou-se por ser diferente dos restantes por não se tratar de um disco abrasivo, mas sim disco de serra circular com pastilhas de carboneto. Era também incompatível com os equipamentos disponíveis, no entanto, juntamente com a amostra, foi possível receber uma máquina de corte adequada para este, permitindo assim o seu teste.

O plano de corte testado em cada uma das amostras, Corte Fino ou Corte Grosseiro, foi definido em função do tipo de equipamento com o qual respetivo disco era compatível, logo, como se pode verificar pela Tabela 5. 1, os dois discos que nunca haviam sido testados foram aplicados na etapa de Corte Grosseiro.

Na Tabela 5. 2, é possível visualizar o tipo de corte obtido para cada um dos discos testados e suas características.

Tabela 5. 2 - Tipo de corte com discos testados e suas características.

Disco	Corte alcançado	Análise do corte	Observações
<i>Pferd SG Lab Steel</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Acabamento razoável - Rebarbas de pequena dimensão - Inexistência de zonas com queimaduras 	<ul style="list-style-type: none"> - Presença de sistema de refrigeração durante o corte
<i>Tyrolit Premium 779428</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Mau acabamento - Rebarbas de dimensão considerável - Existência de zonas com queimaduras 	<ul style="list-style-type: none"> - Desgaste do abrasivo mais demorado para o mesmo número de cortes
<i>Bosch Expert for Steel</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Bom acabamento - Rebarba quase inexistente - Inexistência de zonas com queimaduras 	<ul style="list-style-type: none"> - Inexistência de sistema de refrigeração durante o corte - Disco penetrou na peça com grande facilidade - Menor necessidade de lixar amostras, e por isso, menor tempo de processo total

Com base nos dados apresentados na Tabela 5. 2, qualitativamente o disco Bosch apresenta os melhores resultados, estando inclusive dentro dos padrões de qualidade tidos como Ok por parte do departamento da Qualidade. No entanto, foram registados alguns contratempos durante a sua utilização.

À semelhança do que acontecia no equipamento da *Einhell* usado no Corte Grosseiro, durante o corte *A002a Begin–A004 Begin*, o disco penetrava no *Bushing*, deixando um pequeno rasgo neste (Figura 4. 14 b)). No decorrer do teste com este disco, o operador alegou que a força sentida durante este contacto disco-peça foi superior, tendo-se sentido bastante instabilidade no equipamento de corte, culminando na fratura de algumas das suas pastilhas de corte (Figura 5. 5).

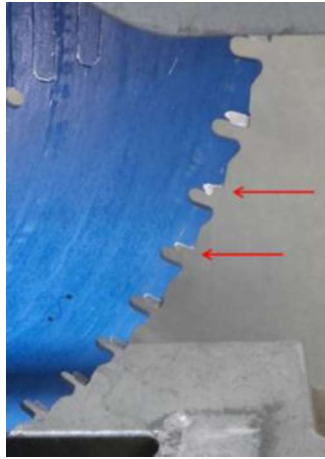


Figura 5. 5 - Disco Bosch danificado.

O problema descrito foi causado pelo desgaste do equipamento fornecido para os testes, mais concretamente no seu sistema de aperto, que apresentava folgas e não fixava a peça eficientemente, o que gerou a vibração do disco durante o corte. Como o fenómeno ocorreu após cortar apenas três peças, não foi possível confirmar como o disco se comportaria com a cadência idealmente pretendida (cerca de 20 peças/semana), ou até mesmo para atual cadência (cerca de 12 peças/semana). Além disso, o disco em questão, sendo mais duro, não era o mais adequado para o aço utilizado, o que gerou dúvidas sobre sua eficácia para as cadências de corte mais altas. Posto isto, concluiu-se que, apesar de ter apresentado melhor qualidade de corte, o disco *Bosch Expert for Steel* não podia ser o selecionado à data, tendo ficado a intenção de no futuro serem realizados novos ensaios com equipamento próprio em melhores condições.

Posto isto, após a conclusão dos ensaios, foi então pré-selecionado o disco *Tyrolit Premium 779428* (Figura 5. 6), tendo sido acrescentado pela Qualidade o requisito de projetar o automatismo de forma que este fosse também compatível com o disco *Bosch Expert for Steel*.



Figura 5. 6 - Tyrolit Premium 779428 (Tyrolit, 2024).

Quantificação dos Parâmetros de Corte

Após terminada a etapa de seleção do disco, foi fulcral estimar os parâmetros de corte associados ao mesmo, e, uma vez que se pretende um equipamento compatível para dois discos distintos, a quantificação dos parâmetros de corte foi efetuada de modo a satisfazer os requisitos técnicos de ambas as ferramentas.

Primeiramente, a Velocidade de Corte (V_c) foi calculada, o que corresponde à velocidade linear dos pontos periféricos do disco, ou seja, os pontos do diâmetro externo. Tendo em atenção que o disco perde material no caso do abrasivo, recorrendo à Equação 5. 1 (Cardoso, 2015), calculou-se a referida velocidade para dois diâmetros, o inicial e o final, como é apresentado na Tabela 5. 3, cujas velocidades de rotação são as apresentada na Tabela 5. 1.

$$V_c = \frac{\phi \times \pi \times n}{1000 \times 60} \quad 5. 1$$

Tabela 5. 3 - Velocidade de corte dos discos.

Referência	Diâmetro do disco	Velocidade de Rotação	Velocidade de
	ϕ (mm)	aconselhada n (rpm)	Corte V_c (m/min)
Tyrolit 779428	350	4400	4837,8
	150		2073,6
Bosch Expert for Steel	305	1500	1437

De seguida, foi estimada a potência de corte (P_c) envolvida no processo através da expressão descrita pela Equação 5. 2 (Cardoso, 2015).

$$P_c = \frac{p_{\text{corte}} \times l_{\text{corte}} \times V_f \times K_c \times 10^{-3}}{60 \times \eta} \quad 5. 2$$

Foi definido como 60 mm o valor da profundidade de corte (p_{corte}) por corresponder a uma ligeira majoração do maior corte presente no plano de corte enquanto a largura de corte (l_{corte}) está associada à espessura do disco. Já a velocidade de avanço (V_f), a pressão específica de corte (K_c) (Mitsubishi Materials Corporation, 2022) e a eficiência (η) (Dash *et al.*, 2024) foram definidos com os valores apresentados na Tabela 5. 4.

A velocidade de avanço está associada à velocidade de penetração do disco na peça, e está diretamente relacionada à qualidade do corte obtida uma vez que, tipicamente, menores velocidades implicam melhor qualidade e conseqüentemente maior tempo despendido, e vice-versa. O valor definido foi selecionado como valor limite pretendido. No que toca à força específica de corte, esta é uma propriedade dependente do material e respetivo avanço aplicado. Por último, a eficiência de corte mencionada corresponde ao rácio entre a potência líquida de corte e a potência que é, efetivamente, fornecida ao disco.

Tabela 5. 4 - Potência de Corte dos discos.

Referência	p_{corte} (mm)	l_{corte} (mm)	V_f (mm/min)	K_c (MPa)	η (%)	P_c (W)
<i>Tyrolit 779428</i>	60	2,5	150	4050	90	1687,5
<i>Bosch Expert for Steel</i>		2,6				1755

Por fim, foram calculadas a força tangencial (F_t), força radial (F_r) e o binário (T_{disco}) atuantes no disco pelas Equações 5. 3, 5. 4 e 5. 5, respetivamente (Ojolo *et al.*, 2010), sendo que os valores obtidos são apresentados na Tabela 5. 5.

$$F_t = \frac{P_c}{V_c} \quad 5.3$$

$$F_r = 2 \times F_t \quad 5.4$$

$$T_{\text{disco}} = F_t \times \left(\frac{\phi}{2} \times 10^{-3} \right) \quad 5.5$$

Tabela 5. 5 - Forças e Binário dos discos.

Referência	ϕ (mm)	P_c (W)	V_c (m/min)	F_t (N)	F_r (N)	T_{disco} (Nm)
<i>Tyrolit 779428</i>	350	1687,5	4837,8	20,93	41,86	3,66
	150		2073,6	48,83	97,66	3,66
<i>Bosch Expert for Steel</i>	305	1755	1437	73,26	146,53	11,17

Seleção do Motor

O passo seguinte consistiu na seleção do motor elétrico responsável pela potência fornecida ao disco de corte, que neste caso foi o motor 1LE1004-1BA22-1AA6 da *Siemens*, apresentado na Figura 5. 7, estando os principais parâmetros técnicos presentes na Tabela 5.6.

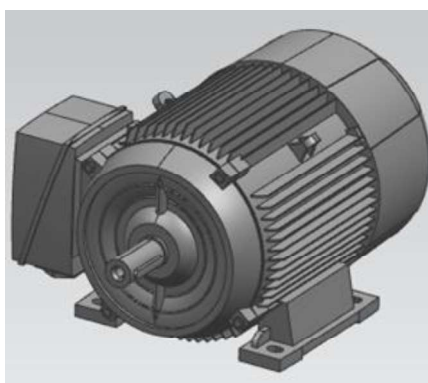


Figura 5. 7 - Motor Siemens 1LE1004-1BA22-1AA6.

Tabela 5. 6 – Parâmetros técnicos do Siemens 1LE1004-1BA22-1AA6 (Siemens, 2022).

	Tensão (V)	Frequência (Hz)	Potência (kW)	Rotação operacional (rpm)	Momento de Inércia de massa máx. (kg.m ²)
<i>Siemens</i> 1LE1004-1BA22-1AA6	380	50	4	2950	0,9872

Para a seleção deste dispositivo foram adotados três principais critérios de decisão: a potência, a rotação e o binário.

- Potência

Dos cálculos feitos previamente, averiguou-se que a maior potência líquida de corte necessária rondava os 1755 W, quando se considerava uma eficiência de corte de 90%. Relembrando que o disco e o motor não possuem uma acoplação direta, iriam existir perdas no sistema de transmissão de potência projetado, o que, ao considerar-se um rendimento de 70% (Budynas *et al.*, 2015), a máxima potência requerida situava-se nos 2507 W. No entanto, foi necessário ter em consideração um segundo fator. Nos instantes iniciais do corte, a potência necessária tende a aumentar até atingir um pico máximo, sendo que posteriormente tende a diminuir e a estabilizar (Bird & Ross, 2009), ou seja, a potência do motor necessária teria de ser superior aos 2507 W de forma a assegurar o corte para qualquer uma das ferramentas identificadas. Posto isto, foi tomada a opção referente ao motor disponível em catálogo com a potência operacional imediatamente acima, 4 kW.

- Rotação

No que toca à rotação do motor, teve-se em atenção as velocidades de rotação dos discos aconselhadas por cada fabricante já apresentadas na Tabela 5. 1, tendo-se optado por um motor com a velocidade de rotação operacional de 2950 rpm. Deste modo, a estratégia passaria por dimensionar o sistema de transmissão de potência em função de uma relação de transmissão que possibilitasse as rotações do disco acima dos 4000 rpm, e, com o auxílio de um variador de velocidade, ajustar-se-ia a rotação do motor para valores inferiores cobrindo uma gama mais ampla, podendo ter um disco com uma rotação no intervalo [1700; 5000] rpm, e ainda, com a mesma variação da rotação seria possível obter binários e potências superiores. A única ressalva a ter assenta no facto de garantir que com a variação da velocidade de rotação, a frequência do motor não atinja valores abaixo dos 15 Hz, pois isso coloca em risco a sua capacidade de se auto refrigerar.

- Inércia e Binário

Por último, é crucial assegurar que o sistema que se pretende movimentar tenha um Momento Inércia de massa (I_m) inferior à capacidade máxima do motor. Se esta

grandeza associada ao sistema for demasiado elevada, pode resultar em tempos de aceleração mais longos, oscilações excessivas ou sobrecargas no motor, afetando negativamente o desempenho e a vida útil do mesmo (Dorf & Svoboda, 2010). De forma a calcular este parâmetro recorreu-se à seguinte Equação 5. 6 (Edge & LLC, 2000).

$$I_m = 0,5 \times m \times r^2 \quad 5. 6$$

Posto isto, considerando a massa (m) e o raio (r) do conjunto de elementos que têm movimento rotacional e a própria inércia do motor, tem-se um momento de inércia de massa total do sistema de $5,77 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$, valor este inferior ao momento de inércia de massa do motor, $0,9872 \text{ kg.m}^2$ (Tabela 5.6).

No que diz respeito ao binário, o motor oferece um binário que varia de 25 N·m a 50 N.m dentro do intervalo de rotação do disco definido. No entanto, devido a perdas no sistema de transmissão e no variador de velocidade, o binário efetivo disponível será menor. Assumindo uma perda de 8% (Hughes & Drury, 2013), o menor binário efetivo à saída do motor seria de 23 N.m. Adicionalmente, relembrando que o maior binário de corte é de 11,17 (Tabela 5. 5), e sabendo que a relação de transmissão do veio movido para o motor é de 0,594, o binário transmitido ao veio motor será 59,4% menor, ou seja, 6,63 N.m. Deste modo, como o binário efetivo disponível de 23 N·m excede os 6,63 N·m transmitidos ao veio motor, garante-se a funcionalidade do motor selecionado para a aplicação em questão.

Sistema de Transmissão de Potência

Neste subcapítulo, será abordado o sistema de transmissão de potência, um sistema vital para a operação e desempenho da máquina em estudo. Serão analisados e dimensionados os elementos principais, incluindo veios, braço de suporte, com ênfase na sua validação estrutural, rolamentos, polias e correias. São apresentadas as metodologias aplicadas para assegurar que todos os componentes do sistema operem dentro dos dentro dos parâmetros funcionais necessários, garantindo a fiabilidade do equipamento em condições operacionais.

Veios

O dimensionamento dos veios motor e movido foi realizado em função das características dimensionais (diâmetros e larguras) dos restantes componentes, tendo sido definido o aço temperado 90MnCrV8 (EN 1.2842) como material dos mesmos por preferência da empresa, e cujas propriedades são apresentadas na Tabela 5. 7. Com o intuito de averiguar a funcionalidade dos veios, foi estimada a Tensão Equivalente de *von Mises* (σ_{VM}) para cada um, considerando o cenário de funcionamento mais

crítico, isto é, considerando o disco *Bosch*, visto ser o que submete os veios aos maiores esforços. Os respectivos diagramas de corpo livre (DCL) encontram-se representados na Figura 5. 8, onde é possível verificar que o veio motor está sujeito à torção enquanto o veio movido está sujeito à torção e à flexão.

Tabela 5. 7 – Propriedades do aço temperado 90MnCrV8 (EN 1.2842) (Xometry, 2024).

Composição Química (pond. %)	Propriedades Mecânicas
– 0,85 ≤ C ≤ 0,95	
– 0,10 ≤ Si ≤ 0,40	
– 1,80 ≤ Mn ≤ 2,20	– σ_y : 739 (MPa)
– P ≤ 0,030	– R _m : 914 (MPa)
– S ≤ 0,030	– E: 386 (GPa)
– 0,20 ≤ Cr ≤ 0,50	– Dureza: 36 HRC
– 0,050 ≤ V ≤ 0,20	

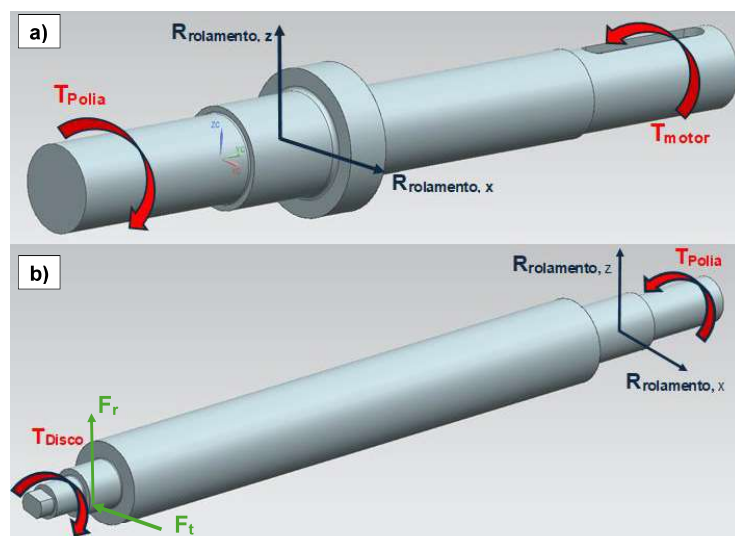


Figura 5. 8 - a) DCL do veio motor; b) DCL do veio movido.

Inicialmente, o binário gerado pela polia (T_{polia}) foi estimado através da Equação 5. 7. Considerando a possibilidade de o motor poder enfrentar picos temporários de carga que podem exceder a sua potência nominal, torna-se necessário considerar uma margem adicional de segurança no dimensionamento dos componentes da transmissão, como polias e correias (Budynas *et al.*, 2015). Como tal, considerou-se um fator de serviço de 1,6 (Budynas *et al.*, 2015), a potência de 4 kW (P_{motor}) e a rotação de 2950 rpm (n), obtendo-se um binário gerado pela polia de 20,72 N.m.

$$T_{polia} = \frac{1,6 \cdot P_{motor}}{\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}\right)} \quad 5.7$$

No caso do veio motor, sendo o menor binário efetivo do motor (T_{motor}) de 23 N.m, e, T_{motor} e T_{polia} possuem sentidos opostos (conforme o DCL da Figura 5. 8 a)), ou seja, o

binário (T) resultante no veio motor é de 2,28 N.m. No caso do veio movido (Figura 5. 8 b)), o binário gerado pelo disco de corte (11,17 N.m pela Tabela 5. 5) e T_{polia} também atuam em sentidos opostos, pelo que o binário resultante neste veio é de 9,55 N.m. Assim sendo, adotando uma abordagem mais conservadora, apenas se consideraram os menores diâmetros efetivos do veio motor e movido, 28 mm e 25,4 mm, respetivamente. Posto isto, o Momento Polar de Inércia da secção (J_0) foi calculado através da Equação 5. 8 (Ojolo *et al.*, 2010), sendo que o cálculo do tensão de corte (τ) para cada veio foi feito com recurso à Equação 5. 9, tendo-se obtido os valores de 0,529 MPa e 2,965 MPa como apresentado na Tabela 5. 8.

$$J_0 = \frac{\pi \times \phi^4}{32} \quad 5. 8$$

$$\tau = \frac{T \times \left(\frac{\phi}{2}\right)}{J_0} \quad 5. 9$$

Tabela 5. 8 – Tensão de Corte dos veios.

	ϕ (mm)	J_0 (m ⁴)	T (N.m)	τ (MPa)
Veio motor	28	6,03 x 10 ⁻⁸	2,28	0,529
Veio movido	25,4	4,09 x 10 ⁻⁸	9,55	2,965

Adicionalmente, uma vez que o veio movido sofre ação de esforços de flexão em dois eixos (Figura 5. 8 b)), foi estimada a Tensão de Flexão Resultante ($\sigma_{b, \text{resultante}}$) com recurso à Equação 5. 10(Beer *et al.*, 2015). Primeiro, foi estimado um Momento de Inércia da secção transversal do veio de através da Equação 5. 10. Sabendo que as forças aplicadas correspondem à força tangencial e radial geradas pelo disco, ou seja, 73,26 N e 146,53 N (Tabela 5. 5), respetivamente, que a distância (L) entre o ponto de aplicação das forças ao apoio no veio é de 321,6 mm e que a distância da linha neutra da seção transversal à fibra mais distante (c) é, no caso de um veio circular, metade do seu diâmetro, obteve-se então uma tensão de 32,80 MPa, tal como é apresentado na Tabela 5. 9.

$$\sigma_{b, \text{resultante}} = \frac{c}{I} \sqrt{(F_t \cdot L)^2 + (F_r \cdot L)^2} \quad 5. 10$$

$$I = \frac{\pi \times \phi^4}{64} \quad 5. 11$$

Tabela 5. 9 – Tensão de flexão resultante no veio movido.

	ϕ (mm)	c (mm)	I (m ⁴)	L (mm)	F_t (N)	F_r (N)	$\sigma_{b, \text{resultante}}$ (MPa)
Veio movido	25,4	12,7	2,04 x 10 ⁻⁸	321,6	73,26	146,53	32,80

Posto isto, a partir da Equação 5. 12 calculou-se a Tensão Equivalente de von Mises para cada um dos veios tal como é apresentado na Tabela 5. 10. Sendo a Tensão de Cedência do material selecionado de 739 MPa (Tabela 5. 7), e assumindo que σ_{VM} máxima admissível é 30% da σ_y do material (Budynas *et al.*, 2015), verificou-se que a Tensão Equivalente de von Mises calculada para ambos os veios está abaixo do valor máximo admissível, confirmando que estes estão dentro dos limites de segurança.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{b,resultante}^2 + 3\tau^2} \quad 5. 12$$

Tabela 5. 10 - Tensão Equivalente de von Mises dos veios.

	$\sigma_{b,resultante}$ (MPa)	τ (MPa)	σ_{VM} (MPa)	$\sigma_{VM,máx}$ (MPa)	$\sigma_{VM} < \sigma_{VM,máx}$	c.s.
Veio motor	NA	0,507	0,88	0,3 x 739=221,7	Ok	251,93
Veio movido	32,75	2,965	33,20		Ok	6,68

Braço de Suporte

O elemento Braço de Suporte (Figura 5. 9) é um componente crítico do sistema visto que está submetido a esforços de flexão durante o corte, o que poderia comprometer a qualidade do corte. Como tal foram feitas simulações de elementos finitos nesta peça com o intuito de confirmar a sua funcionalidade com o *Simulation SolidWorks*. O material definido trata-se do aço de construção C45E EN 1.1191 por requisição da empresa.

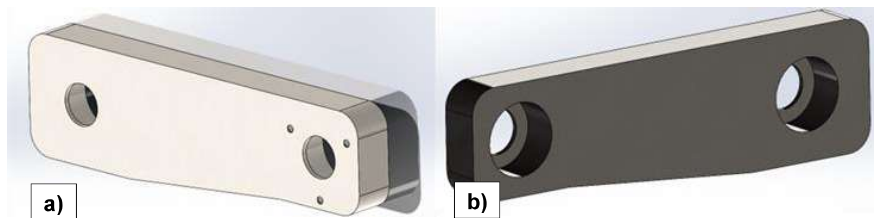


Figura 5. 9 - Braço de Suporte: a) vista frontal; b) vista traseira.

As simulações *Finite Element Method* (FEM) realizadas neste componente consideraram o instante onde o disco penetra a peça, o movimento descendente deste componente, por este se tratar do momento mais crítico do processo de corte. Para tal foram consideradas a força máxima do cilindro hidráulico, cerca de 3430 N, e uma ligeira majoração das maiores forças tangencial e radial provocadas pelo disco de 80 N e de 150 N, respetivamente. Na Figura 5. 10, é possível visualizar as ditas forças aplicadas bem como um constrangimento fixo, aplicado na região do rolamento presente no Veio Motor, que limitou todos os 6 Graus de Liberdade permitindo simular um cenário de flexão no componente.



Figura 5. 10 - Aplicação de constrangimentos e esforços no Braço de Suporte.

Foram feitas simulações para malhas de 60 mm, 40 mm, 20 mm, 10 mm, 8 mm, 5 mm, 3 mm e 2 mm. Deste modo, foi possível verificar a convergência nos resultados das tensões obtidas, evitando o dimensionamento com base em singularidades de tensões, tendo-se verificado que a tensão máxima de *von Mises* presente na peça era de cerca de 12 MPa (ver Figura 5. 11). Sabendo que a Tensão de Cedência do material em causa é de 565 MPa, constata-se que o c.s. do componente é 44,1, o que demonstra o sobredimensionamento deste componente. O resultado comprovativo da convergência de malha para as Tensões de *von Mises* encontra-se presente na Figura 5. 12.

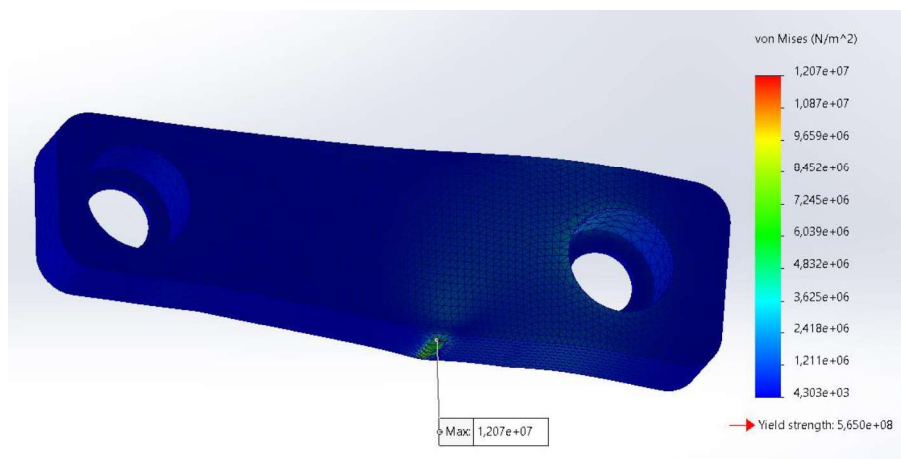


Figura 5. 11- Tensão de von Mises no Braço de Suporte.

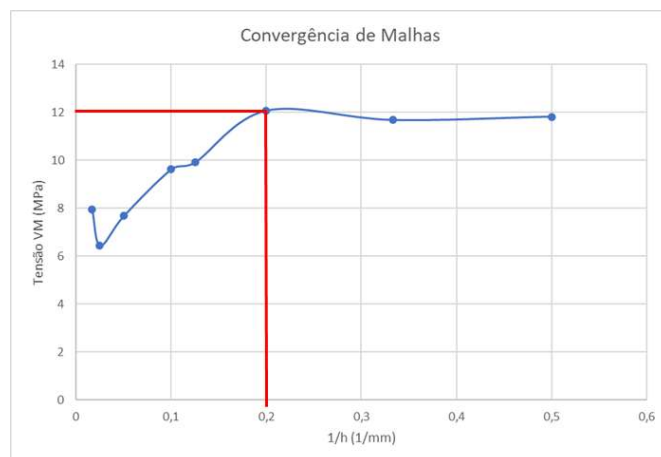


Figura 5. 12 - Teste de convergência de malhas.

Rolamentos

Os rolamentos são componentes essenciais no bom funcionamento do equipamento uma vez que são responsáveis por suportar cargas a que o sistema será submetido durante o corte. Foram selecionados dois rolamentos iguais, o 6306 da SKF. Tratam-se de rolamentos de esferas de carreira única com larga aplicabilidade na indústria. Foram adotados quatro critérios para a sua seleção: a rotação admissível, capacidade de carga estática (C_0), capacidade de carga dinâmica (C) e o ruído. As Equações 5. 13 e 5. 14 (SKF, 2018) foram utilizadas para o cálculo de C_0 e C , respetivamente, onde se quantificou o coeficiente de segurança (c.s.), fator de esforços dinâmicos (f_l), fator de temperatura (f_t) e o fator de rotação (f_n) previamente.

$$C_0 = c.s. \times F_0 \quad 5. 13$$

$$C = \frac{f_l}{f_t \times f_n} \times F \quad 5. 14$$

Os cálculos efetuados encontram-se presentes no Apêndice A – Rolamentos, sendo que, com o mesmo intuito de garantir compatibilidade com outros discos, os cálculos foram feitos em função da ferramenta que apresentava as cargas mais elevadas no rolamento, neste caso, o disco *Tyrolit*. Com o intuito de garantir um nível de ruído inferior, para além dos primeiros critérios enunciados serem respeitados, foi selecionado o 6306 por apresentar um coeficiente de segurança à carga estática bastante superior, o que, segundo o catálogo do fabricante (SKF, 2018), garantirá um funcionamento mais silencioso ao sistema.

Na Tabela 5. 11, é possível fazer a comparação entre os valores calculados para o maior esforço nos rolamentos com os valores admissíveis do escolhido, verificando a sua aptidão para a função.

Tabela 5. 11 - Cargas nos rolamentos.

	C_0 (N)	C (N)	n (rpm)
Rolamento do veio motor	859	11403	2950
Rolamento do veio movido	908	13769	4400
Rolamento 6306	16000	29600	13000

Correias e Polias

Assumindo que o motor opera a uma rotação de 2950 rpm e que se deseja alcançar 4400 rpm no disco, a relação de transmissão (i) necessária seria aproximadamente 0,670. Com base nas restrições dimensionais e na relação de transmissão desejada, e considerando que a rotação do motor será controlada por um variador de velocidade, foram escolhidas polias trapezoidais de dois canais do tipo SPZ, formato J, da Norelem. Os diâmetros nominais selecionados foram 106 mm e 63 mm para a polia

motora e polia movida, respetivamente. Desta forma, a relação de transmissão obtida é cerca de 0,594 (63/106), sendo que as buchas foram selecionadas em função da compatibilidade com a respetiva polia e pelo diâmetro do veio onde estão acopladas. Foram ainda selecionadas duas correias trapezoidais com perfil do tipo SPZ, segundo a DIN 2215, de 927 mm cada com base no gráfico apresentado na Figura 5. 13. O ponto referente às condições de funcionamento encontra-se acima da linha referente ao perfil SPZ, o que indica a sua adequabilidade.

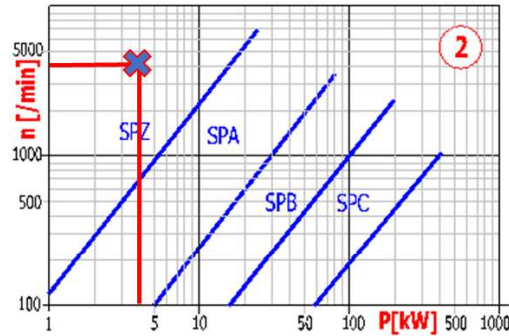


Figura 5. 13 - Gráfico P x rpm para seleção do perfil de correia (adaptado de (Mitcalc, 2003)).

5.1.2 Sistema de Posicionamento e Fixação

No âmbito do processo de corte, o posicionamento do Braço de Controlo de Suspensão emerge como um desafio preponderante. Conforme abordado no Subcapítulo 0, os atuais procedimentos e equipamentos não garantem que os cortes atendam aos requisitos especificados. O posicionamento manual do componente em relação ao disco não assegura repetibilidade nos cortes e a falta de estabilização adequada da peça afeta negativamente a sua qualidade.

Posto isto, como resposta a estes entraves no processo, foram desenvolvidos três pratos de trabalho, Prato A, Prato B e Prato C (Figura 5. 14), que permitem solucionar os problemas identificados. Note-se que, pela necessidade de garantir a condição de perpendicularidade entre o disco e a secção transversal, foi necessário projetar mais *gabarits* para o efeito. Não sendo possível distribuir todos os *gabarits* num mesmo prato por questões dimensionais, houve a necessidade de o fazer pelos três pratos de trabalho referidos.

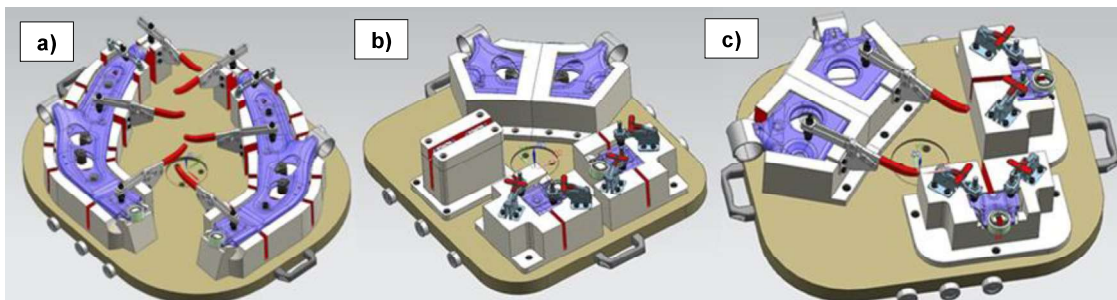


Figura 5. 14 – a) Prato A; b) Prato B; c) Prato C.

Os *gabarits* encontram-se talhados para a execução de um ou mais cortes, sendo que cada um pode ser dividido em dois grupos de elementos diferentes: os Ninhos e o respetivo Sistema de Fixação.

Os Ninhos correspondem às estruturas concebidas para retratar o “negativo da peça”, sendo maquinadas em Alumínio 1100. Com esta abordagem, a repetibilidade no posicionamento da peça é alcançada, garantindo que o corte é feito sempre na mesma zona do cordão, respeitando também a premissa de perpendicularidade pretendida.

Já o Sistema de Fixação adotado contempla uma combinação de acessórios que garantem a total imobilização do componente e de todos os amostras que se vão gerando com o avançar do processo, assegurando a fixação em vista. Cada Ninho é portador do respetivo dispositivo de fixação, pensado para garantir a imobilização da peça/retraço com os acessórios suficientes e necessários à sua estabilização.

Sistema de Posicionamento

Embora a temática relacionada com os movimentos (lineares e/ou rotativos) dos Pratos de trabalho seja apenas abordada no seguinte Subcapítulo 5.1.3, é determinante tê-la sempre em consideração quando se pretende desenvolver uma alternativa customizada a um processo, como é o presente caso. Tal deve-se ao facto de os sistemas projetados, seja pelas características dos seus elementos, ou pela disposição que detêm no equipamento, poderem restringir os graus de liberdade suficientes e necessários para que a tarefa pretendida seja executada. Ou seja, no caso do Sistema de Posicionamento e Fixação, o modo como este se encontra definido afeta diretamente as necessidades do número de GDL (graus de liberdade) que o(s) Prato(s) e o Módulo de Corte necessitam.

Por esta razão, são apresentadas de seguida as duas iterações que relatam o sequenciamento dos acontecimentos justificando as decisões culminaram na definição das mesas apresentadas.

Com base cenários conceptualizados anteriormente, foram definidos três requisitos adicionais no projeto do equipamento:

1. Ataque do disco deve ser feito no eixo z, isto é, sentido ascendente/descendente em relação ao plano da peça;
2. O Prato de Trabalho, para além da rotação, requer dois movimentos lineares nos eixos x e y;
3. Com o intuito de reduzir a área útil de trabalho, o(s) Prato(s) deve(m) ser de menores dimensões.

Posto isto, o desenvolvimento do Prato de trabalho teve como ponto inicial a definição do sistema de posicionamento da peça, mais concretamente numa estrutura que incorporasse um molde do Braço de Suspensão. Após se ter deparado com Ninhos

referentes à *Lower Shell* que integravam calibres de controlo dimensional nas instalações da MCG (Figura 5. 15), procedeu-se a uma adaptação deste conceito de modo a atender às necessidades pretendidas.

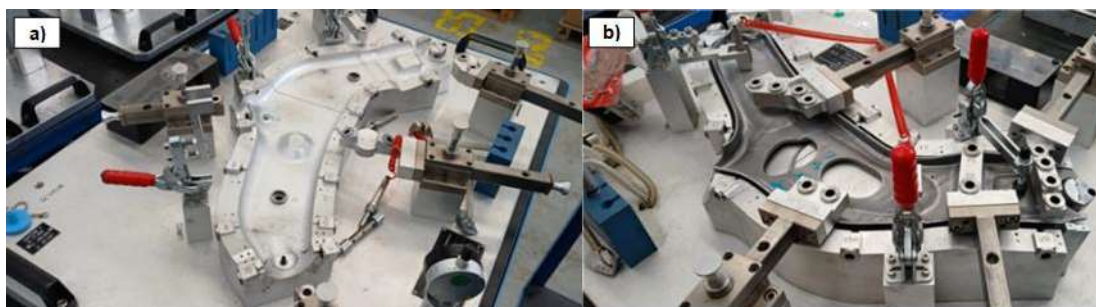


Figura 5. 15 - Calibres da Lower Shell: a) sem a peça; b) com a peça.

Foram então projetados dois Ninhos para ambas as configurações do Braço de Controlo de Suspensão, esquerda e direita. Foram feitas as necessárias adaptações ao processo pretendido, de onde se destacam a incorporação de rasgos nas zonas de corte para a passagem do disco e a possibilidade de estes posicionarem o Braço no estado final do seu ciclo produtivo, ou seja, considerando não só a *Lower Shell* como todos os outros elementos. Na Figura 5. 16 a) e Figura 5. 16 b) encontram-se de modo mais detalhado o Ninho da peça esquerda e direita, respetivamente.

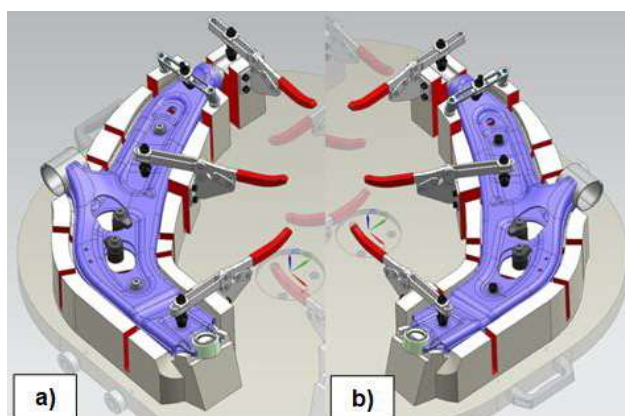


Figura 5. 16 – Prato A: a) Ninho da peça esquerda; b) Ninho da peça direita.

Note-se que, ambas as estruturas apresentadas não permitiam contemplar todos os cortes pretendidos, seja por não cumprirem o critério da perpendicularidade já referenciado, seja por obstruções da ferramenta de corte. Posto isto, foram definidos Ninhos referentes apenas às porções que se pretendiam seccionar posteriormente, e foram dispostos nos Prato B (Figura 5. 17) e C (Figura 5. 18). Na Tabela 5. 12 é possível constatar quais as sequências de cortes realizados em cada um dos Pratos.

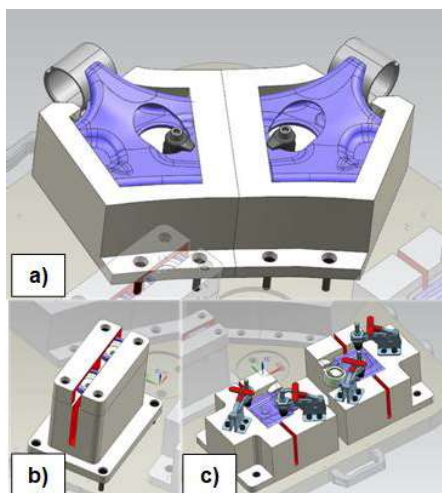


Figura 5. 17 – Prato B: a) Ninhos para cortes no *Bushing*; b) Ninho para corte C001 *Begin*; c) Ninhos para corte A006.

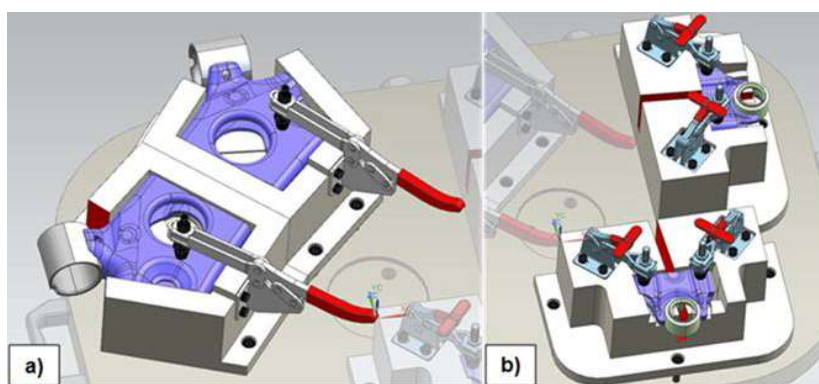


Figura 5. 18 - Prato C: a) Ninhos para cortes no *Bushing*; b) Ninhos para corte D001 - D002.


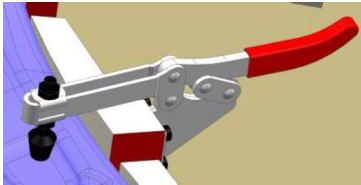
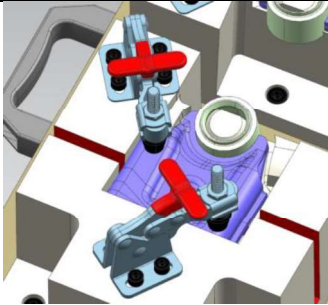
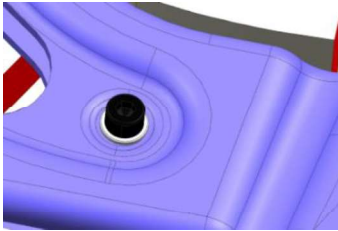
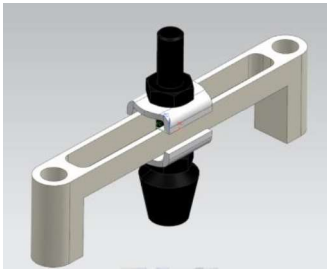
Tabela 5. 12 - Identificação de cortes em cada Prato.

	Prato A	Prato B	Prato C
	- A001-A003		
	- A002a <i>End</i> -A004 <i>End</i>	- C001 <i>Begin</i>	- D001 - D002
	- A002a <i>Middle</i> -A004 <i>Middle</i>	- A006	- B001 - B002
Cortes	- A002a <i>Begin</i> -A004 <i>Begin</i>	- B003	- B005
	- A002b <i>End</i> -A005 <i>End</i>	- B004	- B006
	- A002b <i>Middle</i> -A005 <i>Middle</i>		
	- A002b <i>Begin</i> -A005 <i>Begin</i>		

Sistema de Fixação

No que ao Sistema de Fixação diz respeito, este faz uso de quatro utensílios diferentes nos vários *gabarits* projetados com vista à imobilização da peça. Deste modo, foram selecionados os acessórios que cumpriam os requisitos relativos aos esforços aplicados, que se encontram apresentados na Tabela 5. 13.

Tabela 5. 13 – Elementos de fixação.

Dispositivo de Aperto		Prato A (Quant.)	Prato B (Quant.)	Prato C (Quant.)
1.	<i>FixtureWorks</i> BJ130 	4	2	0
2.	<i>Fixsolda</i> 202 FL 	6	0	2
3.	<i>Fixsolda</i> GH-13007 	0	4	4
4.	Parafuso M8 + Anilha 	4	0	0
5.	AVIC D9000 + <i>Fixsolda</i> FC-086312-SS + Parafuso M6X2 	2	0	0
Total:		16	6	6

Forças de Aperto

Todos os dispositivos de fixação definidos aplicam uma força de aperto vertical no componente que vai interagir diretamente com a F_r aplicada pelo disco, tal como é visível na Figura 5. 19. No que diz respeito aos dispositivos identificados na Tabela 5. 13 por 1,2 e 3, para estas forças de aperto (F_{aperto}) foram consideradas os valores fornecidos pelo próprio catálogo do fornecedor. Por outro lado, no caso dos dispositivos 4 e 5, foram estimados através da seguinte Equação 5. 15 (Budynas *et al.*, 2015) Para os dois casos em questão foram definidos $T_{\text{aperto}}=20$ N.m e $K=0,2$ (Budynas *et al.*, 2015), sendo que K é a constante de rosca. No caso do diâmetro nominal, este deve ser de 0,08 m e 0,06 m, respetivamente.

$$F_{\text{aperto}} = \frac{T_{\text{aperto}}}{K \times \phi} \quad 5. 15$$

Posto isto, lembrando que a maior carga vertical que o Braço de Suspensão pode ser submetido é de 146,5 N, é possível de visualizar na Tabela 5. 14 que todas as forças de aperto são de maior magnitude, garantindo a fixação da peça como pretendido.

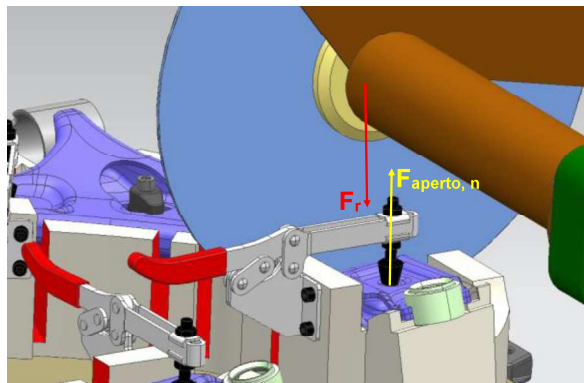


Figura 5. 19 - DCL genérico da fixação de peças.

Tabela 5. 14 – Forças de aperto.

Dispositivo de Aperto		F_{aperto}	F_r	$F_{\text{aperto}} > F_r$
		(N)	(N)	
1.	FixtureWorks BJ130	15000		Ok
2.	Fixsolda 202 FL	2224,6		Ok
3.	Fixsolda GH-13007	1470	146,5	Ok
4.	Parafuso M8	12500		Ok
5.	AVIC D9000 + Fixsolda FC-086312-SS + Parafuso M6X2	16666,67		Ok

Troca de Pratos

Tendo em conta a existência de três pratos para a execução do processo de corte, torna-se necessário proceder à sua troca de forma a executar os respetivos cortes para cada um deles, sendo necessário que estes sejam transportáveis pelo operador. Um dos principais entraves associados a este parâmetro refere-se à massa dos mesmos. Os Pratos A, B e C têm 68,86 kg, 62,85 kg e 35,30 kg, respetivamente, tornando-se inviável impor a um operador que suporte estas cargas durante o processo de substituição.

Assim sendo, foram incorporados em cada um dos pratos seis rodas 95057 da Norelem que conferem uma capacidade de carga total de 240 kg. Considerando o caso mais crítico, o Prato A com duas peças posicionadas nos Ninhos possui uma massa de 75,61 kg, o que se encontra abaixo da capacidade que as rodas conferem. Deste modo, o operador pode deslocar os pratos pelo escorregamento das mesmas (Figura 5. 20), tornando-o num processo bastante mais viável uma vez que o esforço necessário diminui drasticamente.

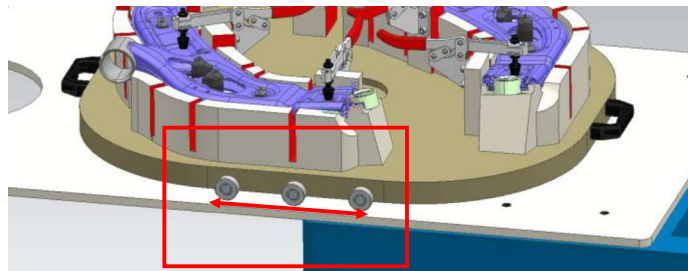


Figura 5. 20 - Rodas Norelem 95057 no Prato A.

Posto isto, foi idealizado o carrinho de transporte conceptual presente na Figura 5. 21 a) abaixo onde se encontra uma placa com o recorte circular numa das suas extremidades à medida do processo de troca pretendido. Este sistema permitiria assim realizar a troca entre os três pratos onde o bocal presente no carro é encostado à base fixada na mesa rotativa. Posteriormente, os pratos deslizam sobre a superfície do carro tal como está apresentado no esquema da seguinte Figura 5. 21 b), evitando a necessidade de o operador as ter de carregar.

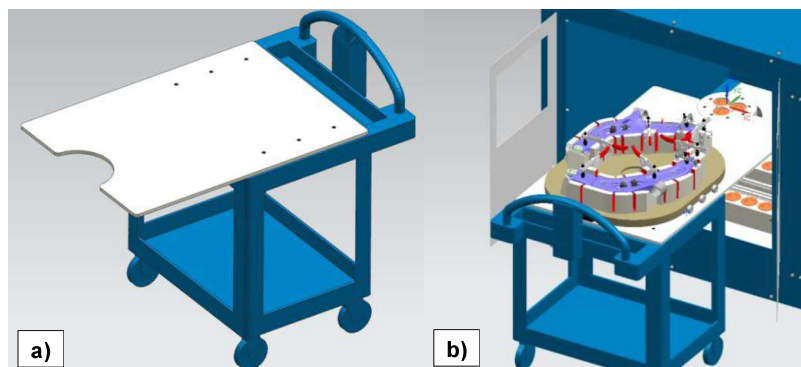


Figura 5. 21 – a) Carrinho conceptual para troca de pratos; b) Esquema conceptual da troca do Prato A.

5.1.3 Movimentos Lineares e Rotativo

No presente subcapítulo, é explorada a integração de sistemas de movimento fundamentais no automatismo desenvolvido, essenciais para garantir precisão e eficiência do processo de corte. São abordados quatro sistemas principais: o cilindro hidráulico, responsável pelo controle do movimento linear do Módulo de Corte, a mesa rotativa, que permite o ajuste angular da mesa de trabalho, e dois sistemas de parafuso com guias e patins, que oferece deslocamento linear de robusto e de precisão. Esta análise técnica contextualiza as decisões de projeto adotadas, justificando a escolha dos componentes com base nos requisitos funcionais.

Cilindro Hidráulico

A decisão de optar por um cilindro hidráulico como dispositivo associado à movimentação do Módulo de Corte foi motivada por uma série de fatores essenciais para o desempenho pretendido do equipamento. O principal diz questão à precisão no movimento do Módulo de Corte. Visto que os sistemas hidráulicos oferecem um controle mais rigoroso entre a velocidade e a direção do movimento, e tendo em conta as características de corte que se pretendem alcançar, essa exatidão confere uma mais-valia para o resultado procurado. Adicionalmente, a capacidade que estes sistemas têm de lidar com cargas variadas é um outro fator a destacar, uma vez que, durante o processo de corte, vai permitir uma adaptação dinâmica às condições de corte, propiciando maior homogeneidade nas amostras obtidas.

Para o presente trabalho, o cilindro selecionado trata-se do modelo com a referência CD70K25/16-80Z1X/02HTKM2-3A do fabricante *Rexroth* (ver Figura 5. 22). Trata-se de um cilindro com 80 mm de curso, com um diâmetro do pistão e da haste de 25 mm e 16 mm, respetivamente. A trabalhar a uma pressão nominal de 70 bar, considerando um rendimento na ordem dos 60%, permite assim atingir uma carga a rondar os 3430 N, valor de maior magnitude em relação às forças de corte com que vai atuar.



Figura 5. 22 - Cilindro hidráulico Rexroth CD70K25/16-80Z1X/02HTKM2-3^a.

Força do Cilindro Hidráulico

A primeira etapa para a seleção do cilindro assentou no cálculo da força suficiente e necessária que este necessitava de efetuar para iniciar o movimento pretendido. Para tal, idealizou-se um movimento de rotação ascendente e outro descendente no Braço de Suporte do Módulo de Corte, cada um com 15° de amplitude como se pode visualizar esquematicamente na Figura 5. 23 abaixo.

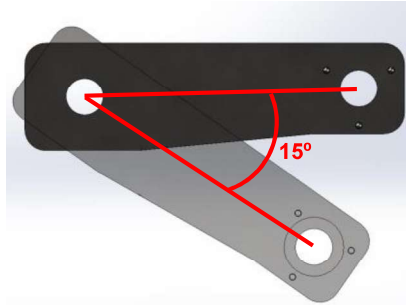


Figura 5. 23 - Amplitude de rotação do Braço de Suporte.

De seguida, tendo em conta os movimentos descritos, existem dois DCL's a considerar, o referente ao movimento descendente (Figura 5. 24 a)) e outro ao movimento ascendente (Figura 5. 24 b)). É o movimento descendente que corresponde ao avanço do disco durante o corte, pelo que, para além da força aplicada pelo cilindro ($F_{cilindro}$) e a força gravítica do sistema (F_g), é necessário considerar a reação à força aplicada pelo disco (R_{disco}). Já no movimento ascendente apenas estão aplicadas no Braço de Suporte F_g e $F_{cilindro}$. Adicionalmente, sabendo que b_n é a distância entre o ponto de rotação e o ponto de aplicação da carga, na Tabela 5. 15 são apresentados os valores referentes a b_1 , b_2 , b_3 , ou seja, a distância entre o ponto de rotação e a força gravítica, força ascendente/descendente aplicada pelo cilindro e a reação dos disco, respetivamente, e à massa do Braço de Suporte.

Tabela 5. 15 - Braços de momento e massa do Braço de Suporte.

b_1 (mm)	b_2 (mm)	b_3 (mm)	$m_{\text{Braço de Suporte}}$ (kg)
165	200	330	30

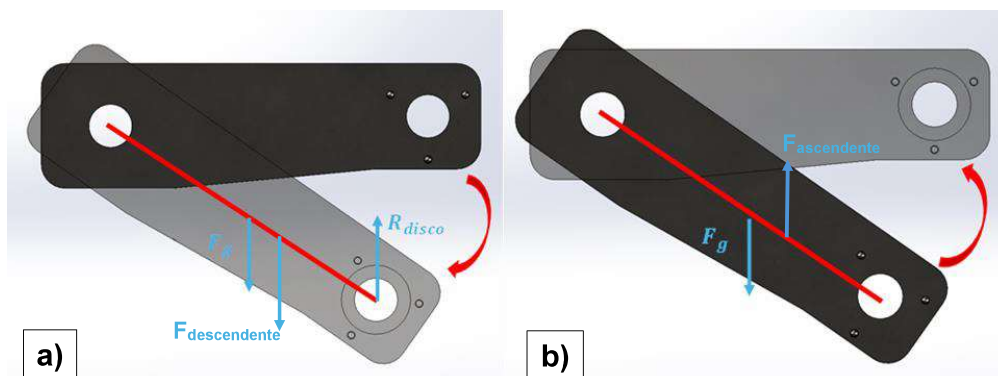


Figura 5. 24 – a) DCL do movimento descendente; b) DCL do movimento ascendente.

Posto isto, pelas equações de equilíbrio referentes a cada cenário, obteve-se uma força mínima do cilindro de 0,825 N no movimento descendente (Equação 5. 16) e de 242,55N no movimento ascendente (Equação 5. 17). Assim sendo, sabendo que o cilindro é capaz de uma carga0 máxima igual a cerca de 3430 N, é possível verificar que este se encontra apto para a funcionalidade pretendida visto este valor estar acima dos valores mínimos estimados.

$$F_{\text{descendente}} = \frac{R_{\text{disco}} \cdot b_3 - m_{\text{Braço de Suporte}} \cdot g \cdot b_1}{b_2} \quad 5. 16$$

$$F_{\text{ascendente}} = \frac{m_{\text{Braço de Suporte}} \cdot g \cdot b_1}{b_2} \quad 5. 17$$

Curso

De seguida, foi definido aquele que seria o curso mínimo que o cilindro necessitava de ter de modo a executar os movimentos descritos anteriormente. Para tal, recorreu-se a uma simples operação trigonométrica. Considerando como cateto adjacente a distância correspondente ao ponto de aplicação da força do cilindro, e lembrando que $\beta=15^\circ$, então, temos que o curso mínimo do cilindro (C_{cilindro}) é de aproximadamente 53,60 mm (Figura 5. 25). O cilindro selecionado cumpre os requisitos uma vez que detém um curso de 80 mm.

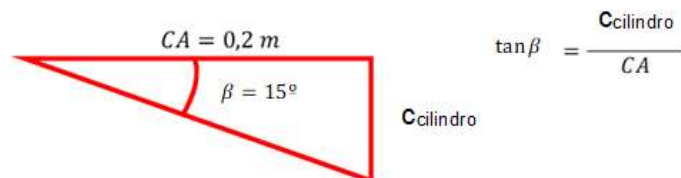


Figura 5. 25 - Curso mínimo do cilindro.

Mesa Rotativa

Atendendo à necessidade de realizar rotações no Prato de trabalho de modo a posicionar peça em função do corte a efetuar, foi necessário selecionar uma mesa rotativa para o efeito. O tipo de sistema definido foi uma mesa rotativa com um servomotor incorporado por proporcionar vantagens para o processo pretendido. A mesa selecionada foi a DMS74 da *Hiwin* com o *encoder* absoluto NDAT 2.2 *Single Turn* 13 bits (Figura 5. 26).



Figura 5. 26 - Mesa rotativa Hiwin DMS74.

Tendo em conta a resolução angular pretendida, a utilização de um servomotor integrado numa mesa rotativa oferece um controle de posição rigoroso. Para além disso, trata-se de um tipo de sistema de rápida resposta com a capacidade de ajustar dinamicamente a velocidade e a aceleração em tempo real. No caso da mesa selecionada, é possível realizar uma rotação bidirecional ao longo de 360° com incrementos aproximadamente de 0,044°, satisfazendo esse requisito de projeto. Além disso, o feedback de posição fornecido pelo servomotor garante a estabilidade na posição da mesma. Na Tabela 5. 16, encontram-se algumas das suas principais características.

Tabela 5. 16 - Especificações técnicas da Hiwin DMS74 (Hiwin, 2019).

Binário Nominal	50 N.m
Binário de Bloqueio	35 N.m
Momento de Inércia de Massa	0,152 kg.m ²
Carga axial máxima	8000 N
Carga radial máxima	6500 N
Binário Vertical máximo	360 N.m
Velocidade Nominal	120 rpm
Resolução	0,044°

Esforço Axial

De modo a garantir a funcionalidade deste equipamento, é necessário estimar se os esforços aplicados não excedem os limites do mesmo, pelo que o primeiro parâmetro averiguado foi a carga axial aplicada. Neste caso, o esforço axial corresponde à massa total assente no módulo rotativo do equipamento, como é possível de observar no DCL presente na Figura 5. 27. A condição mais crítica envolve o Prato A e as peças fixas nos *gabarits*, resultando numa carga axial de 90,02 kg, o que corresponde 882,196 N. Segundo os dados do fabricante na Tabela 5. 16, a capacidade máxima da mesa é de 8000 N, o que indica que o esforço aplicado está dentro da zona de segurança, já que a capacidade da mesa é maior que o esforço suportado.

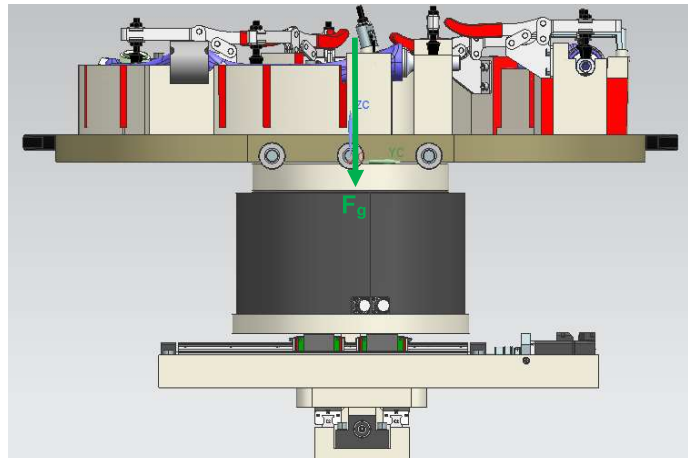


Figura 5. 27 - DCL do esforço axial aplicado à mesa rotativa.

Momento de Flexão

De seguida, foi estimado o Momento de Flexão da mesa segundo DCL presente na Figura 5. 28. Uma vez que os Ninhos encontram-se localizados nas extremidades dos pratos, a força radial de corte imposta pelo disco vai impor um momento vertical na mesa rotativa, o que por sua vez, este momento alienado à própria massa do prato, vai gerar inclinação na mesma. Posto isto, visto que o caso mais desfavorável é o Prato A por ser aquele que tem maior dimensão, considerando a maior Força Radial do disco de 146,5 N, e sabendo que a maior distância entre o ponto de aplicação da força e o centro de rotação é de 300 mm, tem-se pela Equação 5. 18 que o momento de flexão ($M_{flexão}$) aplicado à mesa rotativa é de 43,95 N.m. Consequentemente, verificando os dados técnicos apresentados pelo fabricante presentes na Tabela 5. 16, é possível consultar que o máximo binário vertical que esta mesa suporta é de 360 N.m. Deste modo, uma vez que a capacidade da mesa está acima do momento de flexão máximo gerado, conclui-se a funcionalidade do sistema.

$$M_{flexão} = F_r \times b \quad 5. 18$$

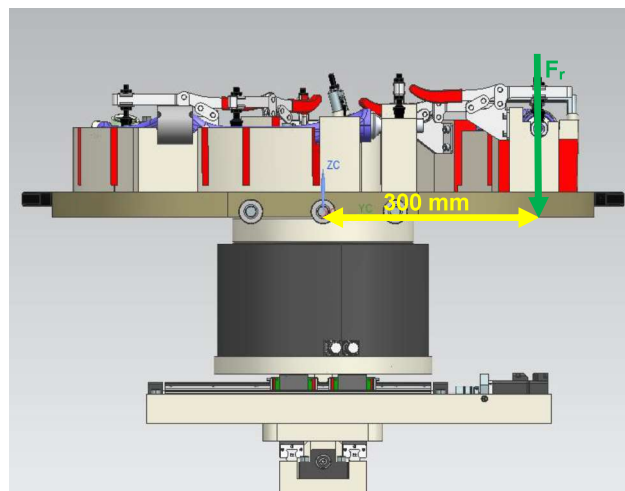


Figura 5. 28 - DCL do momento de flexão na mesa rotativa.

Binário

Adicionalmente, é necessário garantir o controlo sob o binário em torno do eixo de rotação da mesa, de modo a garantir os movimentos pretendidos para o posicionamento dos pratos, bem como a imobilização destes durante o corte.

No primeiro cenário é necessário garantir que a mesa é capaz de gerar binário suficiente para a rotação dos pratos de forma que seja possível posicionar a peça para os cortes pretendidos. Relembrando a carga máxima de 90,02 kg e considerando o raio máximo de 385 mm, pela Equação 5. 6, tem-se que a inércia de massa do Prato A é de cerca de 6,67 kg.m². Considerando ainda a própria inércia da *Hiwin* DMS74 (Tabela 5. 16), tem-se uma inércia de massa total de 6,82 kg.m². Posto isto, pela Equação 5. 19 (Moreira, 2015), considerando uma aceleração angular máxima de 4 rad/s², obteve-se um binário de 27,28 N.m.

$$T_{\text{rot,pos}} = I_m \cdot \alpha \quad 5. 19$$

Para o segundo caso, pretendemos que a mesa não efetue nenhuma rotação durante o processo de corte, permanecendo imóvel. Pela observação do DCL presente na Figura 5. 29, é possível verificar que a aplicação da Força Tangencial aplicada pelo disco gera um binário na mesa. O caso mais crítico ocorre no Prato A, mais concretamente no corte A001-A003 do *gabarit* referente à peça esquerda, onde o braço (b) é de 117 mm e F_t de 73,26 N. Como tal, recorrendo à Equação 5. 20, tem-se que o binário gerado durante o corte é de 8,57 N.m.

$$T_{\text{rot,corte}} = F_t \cdot b \quad 5. 20$$

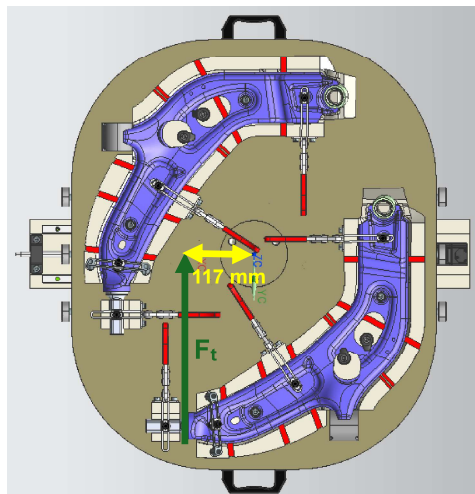


Figura 5. 29 - DCL do binário na mesa gerado pelo disco de corte.

Posto isto, pela Tabela 5. 17, encontram-se comparados os binários estimados para os dois cenários descritos com os respetivos parâmetros associados à capacidade da mesa. É possível verificar que a mesa selecionada cumpre os requisitos pretendidos uma vez que garante o binário pretendido para o posicionamento dos pratos e o binário de bloqueio necessário à imobilização da mesa durante o corte.

Tabela 5. 17 – Requisitos Vs Hiwin DMS74.

	Requisito	Capacidade da <i>Hiwin</i> DMS74	
T (N.m)	27,28	50	Ok
M _{rot} (N.m)	8,57	35	Ok

Sistema Parafuso

Para gerar os movimentos lineares necessários ao deslocamento da mesa, foi selecionada uma tecnologia de acionamento linear por parafuso, pelo que foram projetados dois sistemas num layout cruzado, isto é, um orientado no eixo y e outro no eixo x e que se encontram apresentados na Figura 5. 30. Este tipo de sistemas destaca-se pela sua precisão, durabilidade e facilidade de manutenção, oferecendo uma integração simples, capacidade de carga robusta e operação fiável a longo prazo, vantagens que justificam a sua escolha.

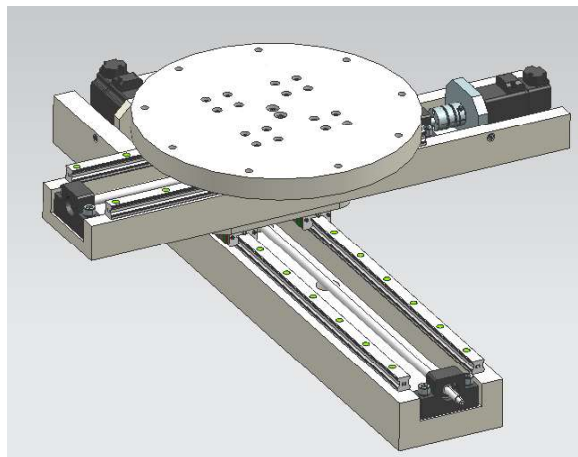


Figura 5. 30 - Sistema de parafuso x e y em *layout* cruzado.

O processo de configuração dos sistemas pretendidos foi feito com o auxílio da ferramenta de dimensionamento da *Hiwin* (*Hiwin, 2024a*), onde foram inseridas as características que eram pretendidas para estes, isto é, as limitações dimensionais, massas a movimentar, forças externas atuantes, entre outros parâmetros, sendo que a ferramenta da *Hiwin* utiliza esses mesmos dados para realizar uma série de cálculos fundamentais para o dimensionamento adequado dos componentes, agilizando todo o processo de acompanhamento.

Primeiramente, a ferramenta avalia a carga dinâmica e estática que os patins e guias precisam de suportar, baseando-se na massa a ser movida e nas forças aplicadas. Com esses dados, calcula a vida útil esperada dos componentes, aplicando fórmulas de fadiga de contato e considerando o coeficiente de segurança adequado.

Em seguida, a ferramenta verifica a rigidez dos elementos, garantindo que a flexão sob carga esteja dentro dos limites aceitáveis para manter a precisão do movimento,

considerando momentos de inércia de massa e coeficientes de elasticidade dos materiais das guias e patins.

Além disso, são analisados os fatores de velocidade e aceleração do sistema, determinando o perfil de movimento adequado para o parafuso de modo a garantir uma operação suave e eficaz. A escolha do parafuso é baseada na combinação ideal de passo e diâmetro, atendendo aos requisitos de velocidade e força necessários. A ferramenta calcula o momento de torção necessário, a força axial e a velocidade crítica do parafuso, assegurando que ele opere dentro dos parâmetros seguros e eficientes.

Por fim, a ferramenta aconselha quais os componentes do catálogo da *Hiwin* que melhor se adequam às especificações fornecidas, garantindo que todo o sistema opere de forma eficiente e confiável. Este processo automatizado facilitou a escolha dos componentes corretos, assegurando um desempenho otimizado do sistema.

Linear y

O primeiro sistema a ser projetado foi o referente à movimentação linear no eixo do y do automatismo (Figura 5. 31). Este aparelho será responsável por movimentar todo o sistema rotativo com o respetivo prato de trabalho acoplado. Este possui uma base circular onde é fixa a mesa rotativa DMS74 que por sua vez encontra-se assente em quatro patins, agrupados em pares a duas guias paralelas de 378 mm de comprimento espaçadas por 123 mm cuja referência é CGH15CA2R378Z0H2+ZWX (Figura 5. 32 a). O parafuso selecionado trata-se do 1R12-05K4-FSCDIN-378-450-0.052 (Figura 5. 32 b). Possui um comprimento total de 450 mm, diâmetro nominal de 12 mm com passo de 5 mm.

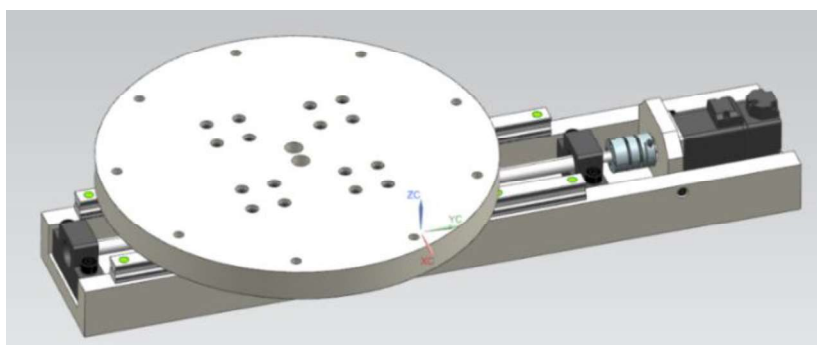


Figura 5. 31 - Sistema linear de parafuso (eixo y).

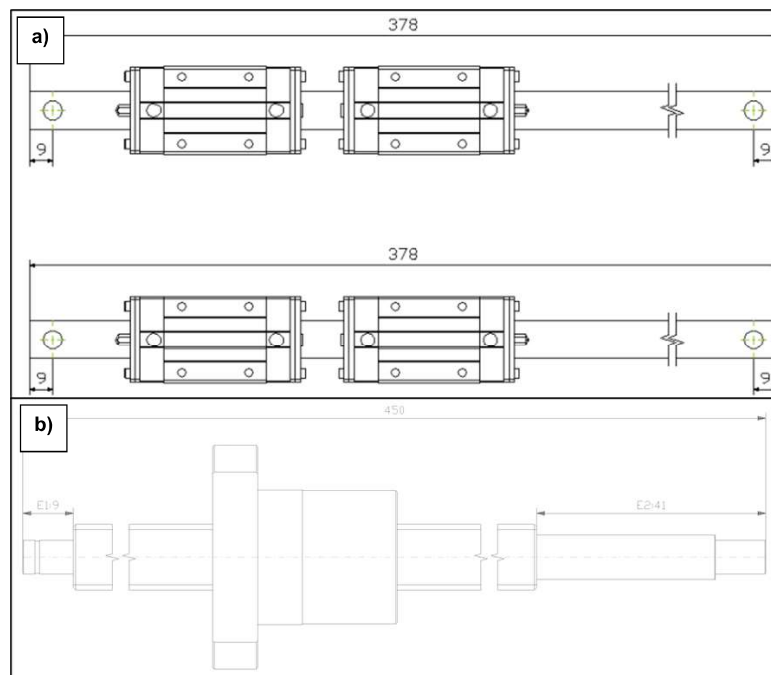


Figura 5. 32 – a) Dimensões das guias (eixo y) (mm); b) Dimensão do parafuso (eixo y) (mm).

Servomotor

O servomotor selecionado foi o EM1-C-M-10-2 da *Hiwin* (Figura 5. 33). No que toca ao dimensionamento do servomotor, foi necessário averiguar o binário necessário que colocaria o parafuso em rotação. Isto porque, só assim se garantiria o movimento pretendido ao longo do curso do parafuso.



Figura 5. 33 - Servomotor Hiwin EM1-C-M-10-2 (Hiwin, 2024b).

Desta forma, para averiguar a viabilidade deste servomotor, foi necessário estimar o binário mínimo necessário à movimentação da carga pretendida (Equação 5. 19), onde, em primeiro lugar, a inércia de massa do sistema ($I_{\text{sistema}, y}$) foi obtida através da Equação 5. 21. Para tal, o momento de inércia de massa do parafuso (I_{parafuso}) foi obtido pela expressão dada anteriormente na Equação 5. 6, enquanto a inércia de massa associada à carga ($I_{\text{carga}, n}$) através da Equação 5. 22 (Moreira, 2015), sabendo que p é o passo da rosca do parafuso (5 mm). Sabendo que o momento de inércia do servomotor ($I_{\text{servomotor}}$) é de $6,2 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$, obteve-se uma inércia do sistema de cerca de $7,57 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$, sendo que na

Tabela 5. 18 encontram-se apresentados todos os parâmetros considerados.

$$I_{\text{sistema},n} = I_{\text{parafuso}} + I_{\text{carga},n} + I_{\text{servomotor}} \quad 5. 21$$

$$I_{\text{carga},n} = \frac{m \times p^2}{4 \times 10^7} \quad 5. 22$$

Tabela 5. 18 - Momento de inércia de massa do sistema y.

I_{parafuso} (kg.m ²)		
m_{parafuso} (kg)	$\varnothing_{\text{parafuso}}$ (mm)	$4,20 \times 10^{-5}$
0,5791	12	
$I_{\text{carga}, y}$ (kg.m ²)		
m_{sistema} (kg)	p (mm)	$7,86 \times 10^{-11}$
126	5	
$I_{\text{servomotor}}$ (kg.m ²)		$6,2 \times 10^{-6}$
$I_{\text{sistema}, y}$ (kg.m ²)		$7,57 \times 10^{-5}$

Assumindo uma velocidade linear máxima de 59,3 mm/s, esse valor corresponde a cerca de 0,084 segundos para percorrer o passo do parafuso, o que permite, pela Equação 5. 23 (Moreira, 2015), calcular a aceleração angular, onde t corresponde ao intervalo de tempo em segundos.

$$\alpha = \frac{4,5}{t^2} \times 2\pi \quad 5. 23$$

Posto isto, na Tabela 5. 19 é possível verificar que se obteve um binário mínimo de 0,067 N.m o que, sabendo que o binário nominal do servomotor selecionado é de 0,32 N.m, permite concluir a adequabilidade do equipamento.

Tabela 5. 19 – Binário do servomotor necessário.

$I_{\text{sistema}, y}$ (kg.m ²)	α (rad/s ²)	T (N.m)
$7,57 \times 10^{-5}$	883,8	0,067

Linear x

Por último, foi dimensionado o sistema de parafuso que funciona orientado ao eixo x (Figura 5. 34). Este sistema está incumbido de realizar o movimento linear suportando as cargas do sistema linear de y, sistema rotativo e o próprio Prato de Trabalho. Neste caso, existe uma base retangular robusta que é assente num sistema semelhante ao caso anterior, onde a principal diferença assenta no comprimento das guias (593 mm),

cuja referência é CGH15CA2R593Z0H2+ZWX (Figura 5. 35 a)). O parafuso selecionado é o R12-05K4-FSCDIN-608-690-0,052, com 690 mm de comprimento (Figura 5. 35 b)).

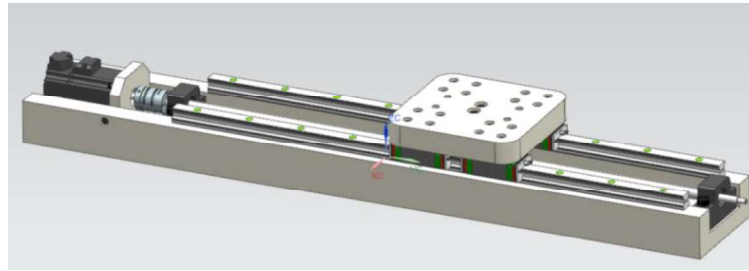


Figura 5. 34 – Sistema Linear de Parafuso (eixo x).

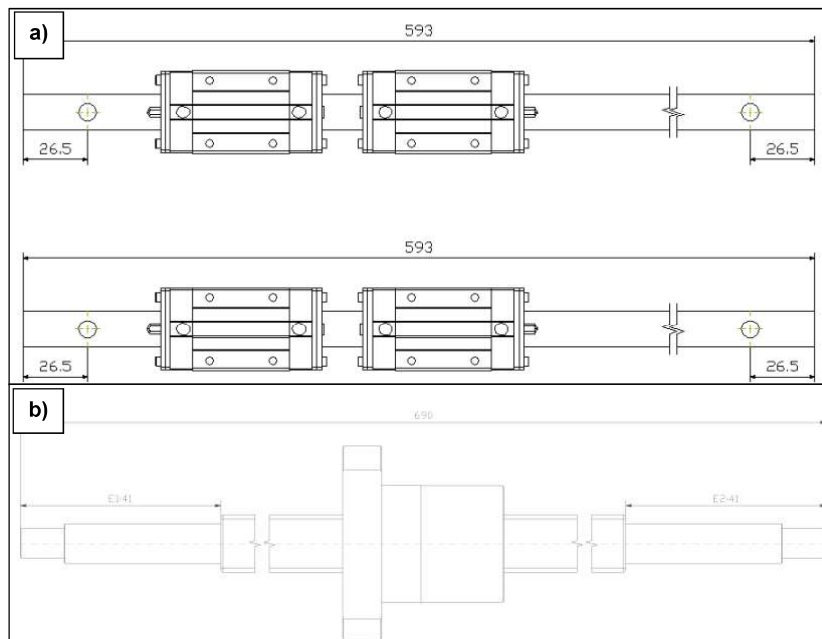


Figura 5. 35 - a) Dimensões das guias (eixo x) (mm); b) Dimensão do parafuso (eixo x) (mm).

Servomotor

Com base no mesmo processo de cálculo adotado para o sistema linear anterior, para uma carga de 162 kg, obteve-se um momento de inércia de massa aproximadamente igual, $I_{\text{sistema},x}=7,57 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$. Note-se que, apesar do aumento da carga em relação ao sistema linear y, o impacto na inércia total foi irrisório, o que, considerando as mesmas condições para a aceleração angular do servomotor, obteve-se um binário mínimo na mesma ordem de grandeza, 0,067 N.m. Posto isto, o servomotor selecionado foi o mesmo modelo EM1-C-M-10-2 da *Hiwin*.

5.1.4 Estrutura

O passo seguinte realizado foi o projeto da estrutura do automatismo. Para tal recorreu-se a perfis de extrusão em alumínio 6063 T6 da *Bosch Rexroth* com secção

de 80x80 (ver Figura 5. 36). A escolha destes elementos assentou na excelente relação entre as suas propriedades mecânicas com a massa reduzida, onde esta simbiose proporciona uma estrutura robusta e versátil capaz de suportar cargas significativas. Além do mais, a montagem de estruturas com estes perfis é relativamente fácil de executar e possui ainda uma relação custo-benefício bastante atrativa. Por tudo isto, considerou-se ser a solução ideal para o automatismo pretendido.

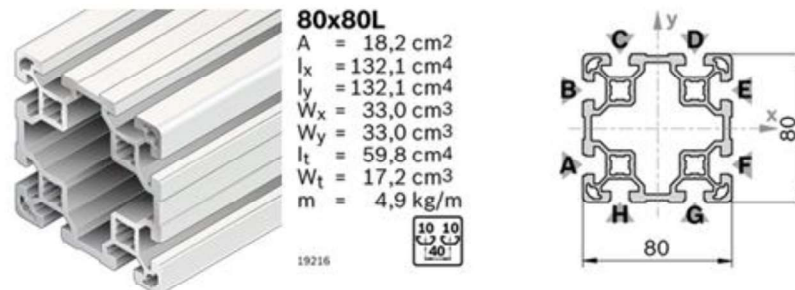


Figura 5. 36 Perfil de alumínio extrudido 80x80L (Bosch Rexroth, 2024).

Os perfis foram dispostos na configuração pretendida onde se fizeram variar os seus comprimentos e orientações. Tal foi possível uma vez este tipo de elementos é compatível com uma série de acessórios de fixação, conferindo uma enorme flexibilidade a todo o sistema. Para unir os perfis, recorreu-se a acessórios como reforços de canto de duas configurações diferentes (Figura 5. 37 a) e b)).

Em função do espaço se tinha como disponível nas diferentes zonas foi-se variando o respetivo utensílio de união procurando garantir a ligação entre os diferentes perfis definidos. Recorrendo novamente à Equação 5. 15, obteve-se uma força de aperto para cada parafuso de 25 kN como é possível constatar na Tabela 5. 20. Assim sendo, no caso do reforço presente na Figura 5. 37 a) e Figura 5. 37 b)), é possível impor uma força de 150 kN e 25 kN em cada um dos dois eixos de ligação, respetivamente.

Tabela 5. 20 - Força de aperto dos parafusos dos elementos de fixação.

T_{aperto} (N.m)	K	Φ (mm)	F_{aperto} (N)
40	0,2	8	25000

Adicionalmente, foram dimensionadas chapas em aço carbono laminado a frio ASTM A1008 com o intuito de cobrir toda a armação. A escolha deste material assentou no facto de apresentar uma boa relação custo-benefício, de onde se destacam o bom acabamento superficial, resistência à corrosão e durabilidade (ASTM International, 2018). Com o intuito de fixar as chapas foram utilizados outros acessórios de onde se destacam a utilização de parafusos com porcas em formato *T-slot* (Figura 5. 37 c)).

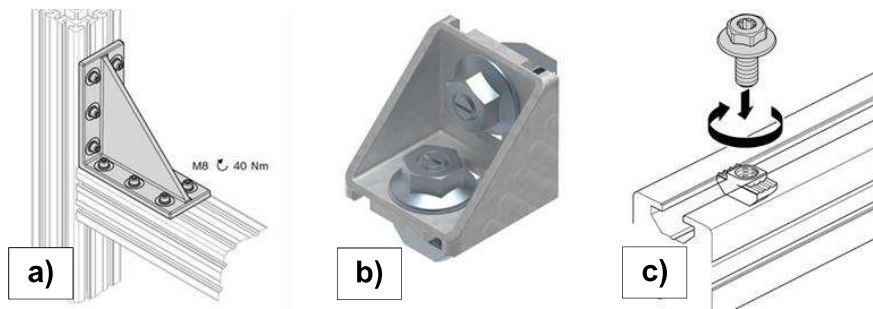


Figura 5. 37 - Acessórios de ligação: a) Reforço de canto 180x180; b) Reforço de canto 30x30; c) Parafuso com flange com porca *T-slot*.

Posto isto, projetou-se a estrutura presente na Figura 5. 38 a) que combina os perfis selecionados com os elementos de fixação referidos. Seguidamente, de forma a validar a funcionalidade desta armação procedeu-se à realização de uma simulação FEM em *SolidWorks Simulation*. O primeiro passo adotado foi a simplificação de toda a infraestrutura apenas aos elementos suficientes e necessários à obtenção dos resultados pretendidos. Desta forma, foram apenas mantidos os perfis de alumínio resultando no seguinte modelo apresentado na Figura 5. 38 b).

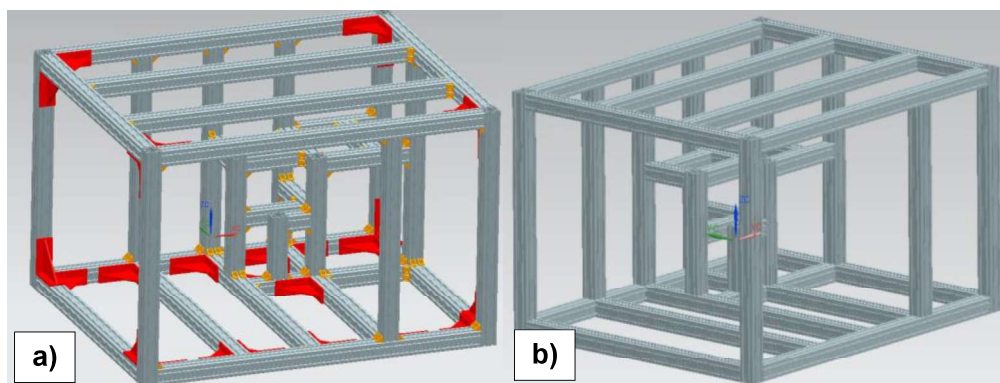


Figura 5. 38 –a) Esqueleto do automatismo; b) Estrutura para simulação FEM.

Além disso, todos os componentes foram modelados como elementos de viga resultando nos nós na Figura 5. 39 a). Esta decisão deve-se ao facto de que este tipo de elementos são especialmente adequados para a simulação de estruturas esbeltas, nas quais a dimensão longitudinal é significativamente maior que as demais dimensões. No caso em questão, essa abordagem permite melhor representar o comportamento estrutural dos perfis de alumínio, proporcionando uma análise mais realista das deformações e tensões ao longo da estrutura. Além disso, é relevante mencionar que se definiu que o modo de interação entre estes era do tipo *Bonded*. No *SolidWorks*, o modo de interação é um tipo de condição de contacto utilizada em simulações de elementos finitos para definir como os diferentes corpos ou componentes interagem entre si. O modo *Bonded* cria uma conexão rígida entre as superfícies de contato dos corpos assumindo que não há movimento relativo entre estas, isto é, permanecem unidas como se fossem uma única peça. Tal foi estabelecido deste modo com base nos valores obtidos nas forças de aperto na

ligação com os acessórios da Figura 5. 37, onde se pressupõe que estes oferecem garantias no seu funcionamento.

Por conseguinte, procedeu-se à aplicação dos constrangimentos e esforços aplicados. Quanto à restrição dos graus de liberdade, estes foram aplicados nos quatro nós onde se encontram acoplados os pés do automatismo uma vez que se tratam dos pontos de apoio do automatismo. Assim sendo, foram bloqueados os 6 GDL de cada um (Figura 5. 39 b)).

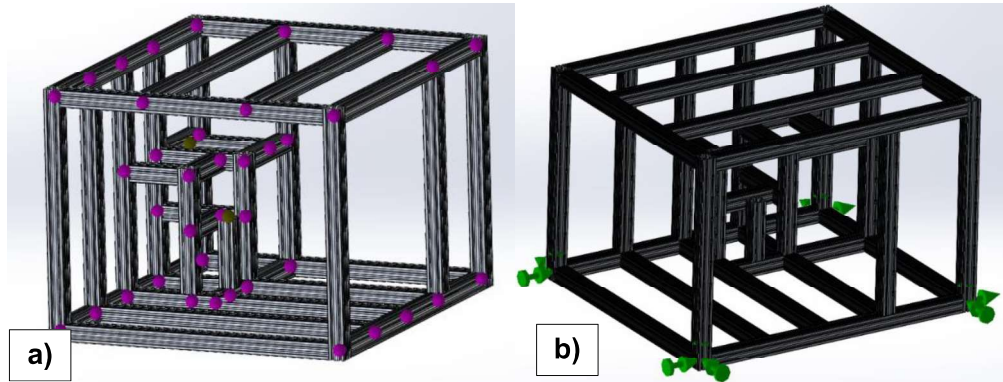


Figura 5. 39 – a) Nós presentes na simulação; b) Aplicação dos constrangimentos fixos.

Por fim, foram aplicados esforços ao modelo. No patamar inferior introduziu-se as forças de corte já apresentadas bem como uma massa distribuída no valor de 300 kg nos nós referentes a essa área. Já no patamar superior, foram aplicados uma massa distribuída de 100 kg e um binário de 15 N.m, alusivos à massa do Módulo de Corte e ao binário do motor, respetivamente. Por último, introduziu-se uma carga de 3430 N alusiva à força máxima do cilindro hidráulico no respetivo ponto de aplicação.

Após a fase de parametrização foi possível correr a simulação. Em primeiro lugar, foi possível identificar o seu ponto de tensão máxima. Obteve-se uma Tensão combinada de esforço Axial (σ_{axial}) e de Flexão ($\sigma_{flexão}$) de 8,726 MPa e um tensão de corte (τ) de cerca de 2,204 MPa, resultando num valor combinado de Tensão Equivalente de von Mises (σ_{VM}) de 9,52 MPa (Equação 5. 24) (Budynas *et al.*, 2015). Tendo em conta que a σ_y do Alumínio 6063-T6 é 214 MPa (ASM Handbook, 1990) MPa, o ponto mais crítico de tensões detém um c.s. de cerca de 20,47.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_{axial} + \sigma_{flexão})^2 + 3\tau^2} \quad 5. 24$$

Adicionalmente, analisou-se a deformação dos perfis do esqueleto do automatismo onde se verificou que o ponto de maior deformação detinha uma deformada de cerca de 0,3923 mm, como está apresentado na Figura 5. 40. A deformada máxima admissível para a liga 6063-T6 para perfis extrudidos é de 2 mm (ANSI 35.2, 2017), conclui-se que o valor obtido encontra-se dentro da gama destes valores aceitáveis, foi então possível validar a viabilidade da configuração estrutural adotada.

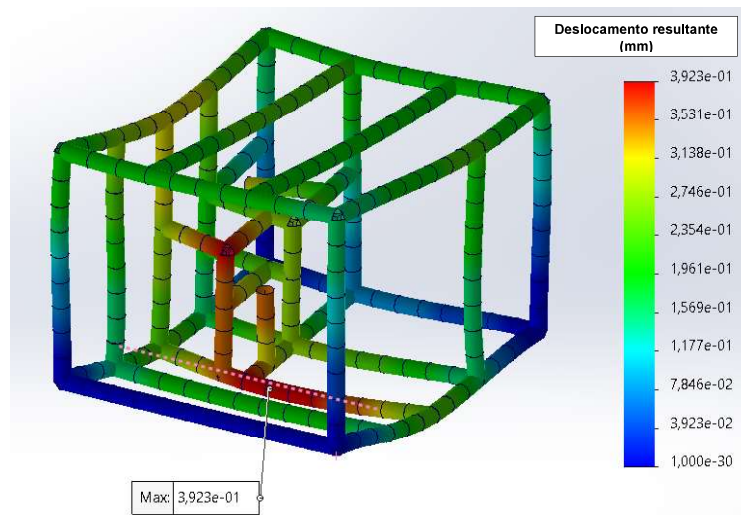


Figura 5. 40 - Deformada máxima da estrutura.

5.1.5 Dimensionamento do Sistema de Refrigeração

Com o intuito de suprimir os defeitos gerados pela ação do calor inerente ao processo, foi dado início ao dimensionamento de um sistema de refrigeração para incorporar o automatismo desenvolvido. Posto isto, o dimensionamento da bomba seguiu cronologicamente os seguintes pontos:

1. Seleção da mangueira e do fluido refrigerante
2. Definição do caudal e velocidade do fluido
3. Estimativa das perdas de carga
4. Altura manométrica total
5. Potência da bomba

1. Seleção da mangueira e do fluido refrigerante

Primeiramente, foi selecionada uma mangueira articulada própria para a condução de líquidos com 25 mm de diâmetro interno e um comprimento de 1,5 m (ver modelo na Figura 5. 41). Posteriormente, optou-se por conservar o mesmo líquido usado para refrigerar o corte durante o processo de Corte Fino, Óleo Ecocool RF 14GD. Trata-se de um fluido de corte semissintético de alto desempenho que oferece mais valias significativas no que à refrigeração diz respeito. Das suas propriedades, destacam-se a densidade (ρ) de 1 g/cm^3 e a viscosidade cinemática (ν) de 30 cSt (cerca de $30 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).



Figura 5. 41 - Mangueira flexível de refrigeração (Norelem, 2024).

2. Definição do caudal e velocidade do fluido

No que ao caudal (Q) de fluido diz respeito, foi definido um fluxo de 0,2 l/s. Deste modo, a velocidade do óleo refrigerante (v_{fluido}) é obtida pela seguinte Equação 5. 25 (Daraghma *et al.*, 2021).

$$v_{\text{fluido}} = \frac{Q}{A} \quad 5. 25$$

Deste modo, partindo do diâmetro da mangueira e do caudal definido tem que v_{fluido} é cerca de 0,41 m/s.

3. Estimativa das perdas de carga

As perdas de carga (h_l) referem-se à redução da pressão do fluido ao longo de um conduto devido a diversos fatores (atrito, mudanças de velocidade de escoamento, obstruções, etc.). Trata-se por isso de um conceito de relevo por poder afetar significativamente o dimensionamento e a eficiência do sistema de refrigeração pretendido.

Para estimar o seu valor, foi primeiro necessário o Número de Reynolds (R_e). Esta grandeza adimensional permite caracterizar o tipo de escoamento presente. Desta forma, aplicou-se a seguinte Equação 5. 26 (Daraghma *et al.*, 2021), tendo-se obtido um valor de 341,67.

$$R_e = \frac{v_{\text{fluido}} \times \phi}{\nu} \quad 5. 26$$

Sabendo que para $R_e < 2000$ encontramos-nos perante um escoamento laminar (White, 2015), o cálculo do fator de atrito (f) é feito pela Equação 5. 27 (Daraghma *et al.*, 2021), obtendo-se assim que $f=0,187$.

$$f = \frac{64}{R_e} \quad 5. 27$$

Assim sendo, pela Equação 5. 28 (Daraghma *et al.*, 2021), temos que as perdas de carga para um comprimento de mangueira ($L_{\text{mangueira}}$) de 1,5 m de associadas a este sistema são de 0,096 m.

$$h_l = f \times \frac{L_{\text{mangueira}}}{\phi} \times \frac{v_{\text{fluido}}^2}{2g} \quad 5. 28$$

4. Altura manométrica total

A altura manométrica total (z) representa a distância efetiva que o sistema terá de ser capaz de bombear o líquido de refrigeração pretendido sendo que Δ representa um diferencial. De forma a estimar esse valor, recorre-se à Equação de Bernoulli entre o

ponto de extração do tanque de armazenamento e o bocal de saída da mangueira, onde se notam os seguintes pressupostos adotados:

- A velocidade à saída do tanque é nula ($V_{\text{fluido}}=0$ m/s);
- A altura de elevação do ponto de extração do tanque é zero ($z_0=0$ m);
- O diferencial de pressão (P) entre a saída do tanque e a saída do bocal da mangueira é equivalente à pressão atmosférica ($\Delta P=101325$ Pa).

Deste modo, obteve-se uma formulação simplificada da mesma (Equação 5. 29) (Daraghma *et al.*, 2021) e assim obter uma altura manométrica total (H_m) de 10,45 m.

$$H_m = h_l + \frac{v_{\text{fluido}}}{2g} + \frac{\Delta P}{\rho g} \quad 5. 29$$

5. Potência da bomba

Por fim, foi então possível dimensionar a potência necessária da bomba (P_{bomba}) a selecionar tendo sido obtido o valor de cerca de 20,50 W através da Equação 5. 30 (Daraghma *et al.*, 2021) abaixo apresentada.

$$P_{\text{bomba}} = H_m \times \rho \times g \times Q \quad 5. 30$$

5.2 Sumário do projeto do Automatismo de Corte

O presente capítulo apresentou a concepção e os detalhes técnicos do automatismo de corte, descrevendo de forma sequenciada as etapas e soluções construtivas adotadas no projeto. Inicialmente, abordou-se o procedimento para a elaboração do Módulo de Corte, com a identificação e seleção dos discos de corte mais adequados após os testes realizados. As análises técnicas subsequentes determinaram os parâmetros de corte e os esforços envolvidos no processo, permitindo o dimensionamento do motor e dos componentes do sistema de transmissão de potência.

Seguidamente, detalhou-se o sistema de posicionamento e fixação, que contempla três pratos de trabalho, que fazem uso de *gabarits* específicos e dispositivos que posicionam e imobilizam as peças de forma segura e estável, assegurando tanto a repetibilidade quanto a precisão dos cortes realizados. Além disso, a integração de movimentos lineares e rotativos permitiu o alinhamento adequado dos cortes pretendidos, ampliando a eficiência do equipamento.

A estrutura do equipamento foi projetada para suportar as forças geradas durante o corte, com simulações computacionais baseadas no método de elementos finitos (FEM) validando a resistência e a robustez do seu *design*.

Por fim, o capítulo incluiu o desenvolvimento do sistema de refrigeração, essencial para minimizar o aquecimento das amostras e do disco de corte, assegurando a qualidade das superfícies obtidas.

6 Discussão

No presente capítulo, pretende-se avaliar qualitativamente como o automatismo projetado pode resolver os problemas identificados no atual processo de preparação de amostras, fazendo sempre a ressalva de que esta apreciação está a ser feita em fase de projeto, onde não existem resultados empíricos concretos para validar todas as melhorias esperadas. Adicionalmente, serão também realçados os impactos menos positivos que a introdução deste sistema trará ao processo.

6.1 Tempo na Etapa de Corte

Um dos principais entraves identificados tratava-se da duração do processo devido, essencialmente, ao tempo despendido no corte, tempo no *setup* de posicionamento e fixação das peças. Com a implementação do automatismo, espera-se que o tempo nesta etapa seja reduzido significativamente. Embora não se possa quantificar experimentalmente essa redução, fez-se uma estimativa tendo como ponto de partida os seguintes pressupostos:

- Velocidade linear dos sistemas lineares x e y de 3500 mm/min;
- Velocidade de rotação do prato de 120 rpm;
- Velocidade de avanço de corte de 150 mm/min;

Para além do mais, tem de se ter em consideração que o tempo de corte e que o tempo do posicionamento do prato (tempo de rotação + tempo de movimento linear x + tempo de movimento linear y) têm de ser considerado duas vezes, uma vez que o disco efetua movimento de avanço e de recuo, uma vez que após a execução de um corte, o prato retoma à posição inicial. Veja-se a Tabela 6. 1 para melhor perceção do descrito. Posto isto, considerando que em cada prato se despende cerca de 1,5 minutos no *setup* de uma peça, obteve-se as seguintes estimativas apresentadas na Tabela 6. 2.

Tabela 6. 1 - Processo de funcionamento do automatismo.

Etapa nº	Descrição
1	Rotação do prato para o corte pretendido
2	Movimento linear em x para a posição de corte pretendida
3	Movimento linear em y para a posição de corte pretendida
4	Avanço do disco de corte
5	Recuo do disco de corte
6	Movimento linear em y para retorno à posição original
7	Movimento linear em x para retorno à posição original
8	Movimento de rotação para retorno à posição original

Tabela 6. 2 - Tempos estimados para a etapa de corte.

Prato	Corte	Tempo de rotação (min)	Tempo de mov. linear em x (min)	Tempo de mov. linear em y (min)	Tempo de Corte (min)	Setup p/peça (min)
Prato A	A001-A003	0,0000	0,0343	0,0000	0,6400	1,5
	A002a End - A004 End	0,0004	0,0514	0,0029	0,3867	
	A002a Middle - A004 Middle	0,0009	0,0697	0,0183	0,3467	
	A002a Begin - A004 Begin	0,0009	0,1029	0,0289	0,3733	
	A002b End - A005 End	0,0020	0,1120	0,0320	0,3467	
	A002b Middle - A005 Middle	0,0029	0,0977	0,0371	0,3467	
	A002b Begin - A005 Begin	0,0042	0,0960	0,0114	0,3600	
Prato B	B002	0,0039	0,1497	0,0743	0,3600	1,5
	B005	0,0060	0,2400	0,0086	0,1333	
	B006	0,0021	0,0440	0,0806	0,1333	
	C001 Begin	0,0042	0,0834	0,0446	0,6400	
Prato C	A006	0,0000	0,0000	0,0000	0,4000	1,5
	B001	0,0000	0,1611	0,0371	0,3600	
	B003	0,0021	0,0651	0,0857	0,1333	
	B004	0,0021	0,0503	0,0766	0,1333	
	D001-D002	0,0086	0,0343	0,0229	0,5333	
Total		0,0402	1,3920	0,5609	5,6267	4,5

Posto isto, ao se somar os tempos apresentados, é possível obter um tempo de processo de corte para uma referência do Braço de Controlo de Suspensão igual 5,6266 min, ao qual somando os tempos associados aos movimentos do prato que alinham a peça com o corte, tem-se então 7,6198. Adicionalmente, considerando os tempos de *setup* de uma peça em cada um dos Pratos, tem-se um tempo final por peça de 12,1197 minutos.

Relembrando que no atual processo, a soma entre o tempo na etapa de corte fino com a de corte grosseiro ascende aos 105 minutos por peça, executando uma análise

unitária, espera-se um ganho de cerca de 88,5% no tempo de processo. No entanto, é de reparar que com o automatismo existe um tempo de *setup* de prato associado, isto é, o tempo despendido no processo de comutação entre os três pratos. Posto isto, e visto que o objetivo é atingir as 20 peças por semana, é mais coerente realizar esta análise para esta dimensão da amostra. Assim sendo, considerando o tempo de *setup* de um prato de 7 minutos, com o automatismo elaborado tem-se um tempo e processo de cerca de 248,4 minutos. Atendendo que 20 peças, com atual processo, demoram cerca de 2100 minutos, é possível afirmar que a implementação deste equipamento promove um ganho até cerca de 86,5% no tempo associado à etapa de corte. Na Figura 6. 1 abaixo é possível visualizar graficamente o tempo despendido na etapa de corte com e sem automatismo.

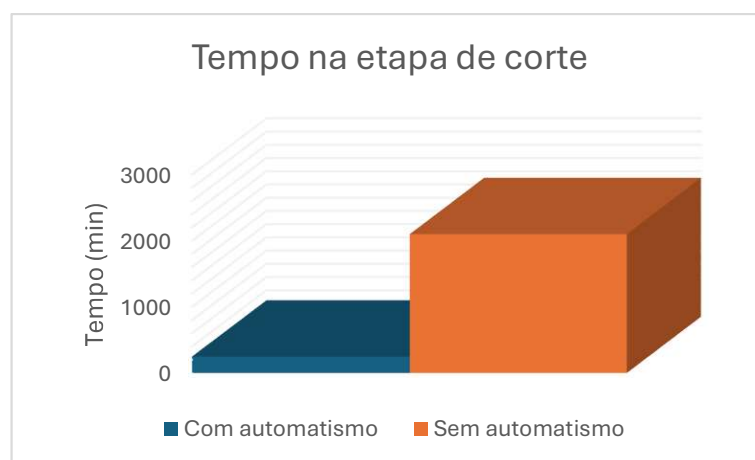


Figura 6. 1 - Comparação do tempo da etapa de corte com e sem a implementação do automatismo.

6.2 Posicionamento e Fixação do Componente

A escassez de precisão e repetibilidade no posicionamento dos Braços de Controlo contribuíam para amostras metalográficas menos bem conseguidas para conseqüente análise. Com a utilização dos ninhos customizados ao componente, alienados ao grampeamento devidamente dimensionado ao processo, prevê-se a obtenção de amostras mais concordantes com o plano de corte requerido e um processo de corte menos propenso a vibrações.

Além disso, com a resolução dos sistemas lineares e rotativo utilizados para posicionamento do prato, é possível garantir um alinhamento de maior precisão entre o disco de corte e o corte pretendido.

6.3 Qualidade dos Cortes Alcançada

O efeito que a implementação do automatismo terá na qualidade das superfícies seccionadas é um dos pontos de análise mais incertos uma vez que não existem

evidências de testes para serem retiradas ilações rigorosas. No entanto, algumas observações são admissíveis de serem feitas.

Como já referido, a utilização de sistemas de fixação para imobilizar a peça durante o seccionamento irá proporcionar maior rigidez ao processo, reduzindo o impacto das vibrações no processo. Deste modo, espera-se uma melhoria na qualidade dos mesmos com esta valência do equipamento.

Adicionalmente, não é só a rigidez do componente que tem de ser evidenciada, mas também a rigidez da ferramenta de corte utilizada. Como era constatável na etapa de corte executada, nomeadamente no estágio de corte grosseiro, era sentida alguma instabilidade no disco de corte, o que beneficiava a qualidade obtida nas faces das amostras. Deste modo, espera-se que a utilização de um sistema hidráulico para guiamento do disco à peça possa resultar em melhorias na morfologia das superfícies obtidas, uma vez que capacidade de fornecer cargas constantes e controladas é uma das vantagens associadas à utilização deste tipo de sistemas.

Por último, com a implementação do sistema de refrigeração final, as peças estarão submetidas a menor carga térmica durante o processo, e assim não se constarão queimaduras ou deformações de origem térmica nas amostras do Braço de Controlo.

6.4 Análise de Custos

Com o intuito de comparar os custos associados ao processo corrente com os custos associados ao processo com a implementação do automatismo, foi feita uma análise que considerou três pontos: os custos energéticos anuais, os custos dos equipamentos dentro do período de vida útil e custos anuais com operadores.

A despesa energética anual dos equipamentos foi calculada com base no consumo de kilowatt-hora (kWh), que representa a quantidade de energia consumida quando um aparelho com potência de 1 kW é utilizado durante 1 hora. Posto isto, foi necessário estimar o tempo de utilização anual para cada equipamento, tal como se encontra na Tabela 6. 3.

Tabela 6. 3 – Tempo de operação anual de cada equipamento de corte.

		Tempo/peça (h/peça)	Peças semanais	Semanas de trabalho/ano	Tempo/ano (h/ano)
Sem automatismo	Einhell TC-MC 355	0,5	12	50	300
	ATA Brillant 250X	0,75			450
Com automatismo	Automatismo	0,202	20		202

Seguidamente, considerando a potência de cada equipamento, obteve-se o consumo kWh anual para os mesmos e, partindo da tarifa de 0,12 €/kWh, estimou-se o custo energético anual de cada equipamento (Tabela 6. 4).

Tabela 6. 4 - Custo energético anual de cada equipamento de corte.

		Tempo/ano (h/ano)	Potência (W)	Consumo anual (kWh/ano)	Tarifa (€/kWh)	Custo anual energético (€/ano)
Sem automatismo	Einhell TC-MC 355	300	2300	690	0,12	82,8
	ATA Brillant 250X	450	4000	1800		216
Com automatismo	Automatismo	202	4000	808		96,96

Posteriormente, foi estimado o custo dos equipamentos dentro do período de vida útil, isto é, o custo de total de cada equipamento pelos 10 anos impostos de tempo de vida para o qual cada um esteja funcional para serviço, que se encontra representado na Tabela 6. 5. No entanto, é relevante notar que o automatismo projetado não se encontra totalmente concluído, o que implica que o custo à data é inferior ao custo final que terá quando contemplar os restantes componentes, pelo que, o valor apresentado na Tabela 6. 5 contempla um acréscimo de 15% em relação ao valor real estimado de modo a atenuar este fator.

Adicionalmente, qualquer um dos procedimentos requer um operador, o que representa um acréscimo nos custos do processo. Como tal, partindo das horas anuais estimadas que cada procedimento requer, e considerando que um operador tem um custo de 7,5 €/h, obteve-se o custo anual que cada um tem com mão de obra (Tabela 6. 5).

Tabela 6. 5 - Custo anual de cada equipamento de corte e de operador.

		Custo de equipamento (€)	Custo anual de equipamento (€/ano)	Tempo/ano (h/ano)	Custo operador por hora (€/h)	Custo anual de operador (€/ano)
Sem automatismo	Einhell TC- MC 355	200	20	300	7,5	2250
	ATA Brillant 250X	16500	1650	450		3325
Com automatismo	Automatismo	26231,5	2623,15	202		1515

Posto isto, com base nos custos anuais de energia, do equipamento e do operador, obteve-se o custo total anual para o processo sem e com automatismo. Posteriormente, com base neste valor, estimando o número de peças cortadas anualmente para cada processo, foi possível obter um custo de 12,66 €/peça e 4,24 €/peça para o procedimento sem e com automatismo, respetivamente, como se encontra representado na Tabela 6. 6. Com base nos resultados estimados, é possível constatar que a implementação do equipamento projetado reflete um custo 33,5%

inferior em relação à atual realidade, mostrando uma mais-valia no que aos custos do processo diz respeito.

Tabela 6. 6 - Custo por peça para processo sem e com automatismo.

	Custo anual energético total (€/ano)	Custo anual de equipamento total (€/ano)	Custo anual de operador total (€/ano)	Custo anual total (€/ano)	Peças por ano	Custo por peça (€/peça)
Sem automatismo	298,8	1670	5625	7593,8	600	12,66
Com automatismo	96,96	2623,15	1515	4235,11	1000	4,24

6.5 Heterogeneidade das Superfícies de Corte

No processo em curso, está presente uma heterogeneidade entre as superfícies de corte nos estágios de corte grosseiro e fino, como já havia sido relatado. Com a centralização de todos os cortes num mesmo equipamento, esta dualidade nas faces obtidas das amostras é abolida do processo. Tal resulta numa maior uniformização dos padrões de corte obtidos e, assumindo que se obtém melhor qualidade de corte, o tempo de preparação das etapas subsequentes ao seccionamento diminuirão.

6.6 Segurança

A implementação do automatismo no processo traz melhorias significativas no que à segurança diz respeito. Os operadores estão menos expostos a riscos físicos, como cortes ou outro tipo de lesões. Pelo facto de o corte de realizar no interior de uma área coberta, a exposição a fagulhas e partículas projetadas durante o corte é suprimida. Deste modo, o automatismo oferece, não apenas ganhos na eficiência do processo de corte, mas também na segurança relativa à execução do mesmo.

6.7 Dimensão e *Layout*

A implementação do automatismo no processo de corte, apesar das vantagens esperadas, apresenta alguns inconvenientes referentes à sua dimensão e ao espaço necessário para a sua laboração.

O equipamento é substancialmente maior do que as máquinas utilizadas no processo atual, exigindo um *layout* de fábrica de maior dimensão. Além do mais, é necessário prever um espaço adicional ao redor do equipamento para o armazenamento dos pratos que não estão em uso e para a movimentação do carrinho de comutação de pratos. Esse espaço extra pode ser um desafio em instalações com restrições de área, impactando a organização e a eficiência do fluxo de trabalho.

A necessidade de um *layout* adequado que acomode o equipamento e os seus acessórios sem comprometer a segurança e a acessibilidade operacional é um fator crítico a ser considerado na implementação do automatismo.

6.8 Desgaste

Devido aos entraves associados ao volume de material presente nos ninhos, foi necessário recorrer a alumínio ao invés de aço de modo a reduzir a massa dos Pratos. Com esta abordagem espera-se uma menor durabilidade das estruturas devido ao desgaste gerado pelas partículas projetadas provindas do corte, perspetivando-se também um encarecimento destes elementos.

6.9 Sumário da discussão dos resultados esperados

Na seguinte Tabela 6. 7, é possível visualizar da forma mais holística os impactos esperados com a implementação do automatismo em comparação com os principais entraves já identificados no atual procedimento (Tabela 4. 6).

Tabela 6. 7 – Impacto do automatismo nos problemas identificados no processo

Problemas Identificados no Atual Processo	Com implementação do automatismo
Tempo até conclusão do processo total de preparação das amostras	Melhoria esperada
Qualidade dos cortes alcançada	Melhoria esperada
Posicionamento e fixação do componente	Melhoria esperada

7. Conclusões e Trabalho Futuro

7.1 Conclusões

Este trabalho representou um marco significativo no desenvolvimento de um equipamento automatizado de corte para a preparação de amostras metalográficas na MCG *Automotive*. A realização do presente projeto capacitou o desenvolvimento de uma série de valências diretamente relativas à Engenharia além de ter viabilizado a ocorrência de uma colaboração de uma empresa consolidada no ramo industrial num trabalho académico, paradigma este essencial para o desenvolvimento empresarial e científico em Portugal.

A análise detalhada das necessidades específicas da MCG revelou que a abordagem de desenvolvimento do automatismo internamente se revelou promissora.

Um dos principais entraves associados refletia-se no tempo despendido durante a execução da etapa de corte, que incluía tanto o tempo efetivo de corte em conjunto com o tempo gasto no posicionamento e fixação da peça a seccionar. A solução apresentada prospeta uma redução significativa do tempo total da etapa de até cerca de 86,5% considerando a maior velocidade de avanço imposta numa cadência de 20 peças/semana. Adicionalmente, este permite acrescentar maior comodidade e fiabilidade a todo o processo de posicionamento e fixação das peças, provendo o novo processo de maior precisão e repetibilidade.

No que concerne à qualidade das superfícies de corte, embora a análise não possa estar completamente respaldada por dados de testes físicos, os indicadores iniciais apontam para que existam melhorias nas morfologias de corte obtidas. Tal assenta na melhor fixação dos componentes, maior adequabilidade do sistema hidráulico responsável pelo ataque do disco bem como a existência de um sistema de refrigeração em todos os cortes.

Adicionalmente, com a centralização de todo o Plano de Corte num só equipamento, a variabilidade entre todas as amostras obtidas será drasticamente menor. Tal reduz a variabilidade entre as amostras podendo até reduzir os tempos de retrabalho das etapas seguintes.

Por fim, a análise de custos realizada permitiu aferir que a implementação do automatismo permite alcançar uma redução de custos significativa no processo de 33,5%, onde verificou-se que os fatores mais preponderantes neste indicador assentam no menor tempo processo esperado e na maior produtividade alcançada com o mesmo.

7.2 Trabalho Futuro

No seguimento de um trabalho futuro, sugere-se:

1. Otimização do projeto dos *gabarits* e respetivas disposições nos Pratos:

Um dos entraves sentidos no desenvolvimento da solução construtiva assenta na massa dos Pratos, nomeadamente, devido ao volume de material existente nos ninhos projetados. Posto isto, sugere-se proceder a uma otimização no projeto destes elementos de modo a reduzir a quantidade de material, não provocando nenhum impacto na funcionalidade dos mesmos. Assim, pretende-se também averiguar a viabilidade da utilização de materiais que oferecem maior durabilidade no seu uso, como aços, por exemplo.

Adicionalmente, a disposição dos vários *gabarits* nos Pratos careceu de uma exploração de hipóteses mais detalhada devido ao tempo a que se dispôs para tal. Visto que apenas foram consideradas duas configurações para além da adotada, propõe-se estudar um maior número casos de modo a averiguar se o número de Pratos pode ser reduzido e/ou serem adotadas novos *layouts* no(s) Prato(s) que permitem uma otimização nos tempos empregues na movimentação da mesa.

2. Análise de Vibrações Mecânicas

A realização de simulações de vibrações mecânicas é essencial para garantir a estabilidade e eficiência do equipamento automatizado de corte. O principal objetivo dessas simulações seria quantificar as vibrações no sistema durante a operação, permitindo identificar se existe algo que possa comprometer a qualidade dos cortes. Recorrendo a *softwares* de análise de elementos finitos, propõe-se modelar o comportamento dinâmico do sistema e avaliar as respostas às forças de corte e aos movimentos das peças. Com os dados obtidos, poderia validar-se o automatismo bem implementar novas soluções de amortecimento e ajustes no projeto estrutural para otimizar o efeito das vibrações, garantindo que o processo de corte ocorre de forma suave e precisa, aumentando a qualidade das amostras produzidas.

3. Dimensionamento do restante sistema hidráulico

Uma vez que neste setor apenas o cilindro foi dimensionado e selecionado, sugere-se a conclusão do restante sistema hidráulico, de onde se destaca a bomba, o motor e respetivo esquema hidráulico onde se inclui válvulas de controlo, filtros, etc.

4. Dimensionamento do restante sistema de refrigeração

À semelhança do sistema hidráulico, também o sistema de refrigeração necessita de ser finalizado. Deste modo, é necessário proceder ao dimensionamento do motor que aciona a bomba, selecionar de catálogo os devidos componentes e

5. Automatização e eletrificação do automatismo

Sugere-se a automatização e eletrificação completa do automatismo de corte, integrando sensores, autómatos, variador de velocidade, ligações elétricas necessárias, entre outros. A implementação destes elementos é fundamental para a continuidade do desenvolvimento do automatismo pois garantirá as funcionalidades pretendidas.

Em suma, este projeto destaca-se como um exemplo de como a Engenharia pode transformar processos industriais, promovendo ganhos significativos de produtividade e qualidade servindo como um alicerce robusto para as necessidades da MCG *Automotive*, demonstrando o potencial da engenharia interna para enfrentar e superar desafios técnicos complexos, sempre com o objetivo de alcançar a excelência operacional. Com a implementação das sugestões propostas, espera-se que o equipamento desenvolvido não apenas atenda às necessidades atuais, mas também se adapte e evolua para enfrentar os desafios futuros.

Referências bibliográficas

- Akca, E., & Trgo, E. (2015). Metallographic Procedures and Analysis – A review. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 3, 9–11.
<https://doi.org/10.21533/pen.v3i2.51>
- Aldajani, E. A. F. (2022). *The Benefits of Metallography*. 12(6).
<https://www.ijera.com/papers/vol12no6/Ser-2/E1206023035.pdf>
- ANCORP. (2019). *Should You Electropolish Your Vacuum Component?* Should You Electropolish Your Vacuum Component? Consultado a 29 de outubro de 2023, em: <https://ancorp.com/blog/should-you-electropolish-your-vacuum-component/>
- ANSI 35.2. (2017). *American National Standard Dimensional Tolerances for Aluminum Mill Products*. https://www.aluminum.org/sites/default/files/2021-11/1-ANSIH35-2_ERRATAPages_Dec%20192017_0.pdf
- ASM. (1992). *ASM Handbook Volume 09—Metallography and Microstructures* (Vol. 9). ASM International. https://docs.google.com/file/d/0B3Mrzn2Z7-tSbURmRThQQnh6Skk/view?usp=embed_facebook
- ASM Handbook, C. (1990). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International.
<https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02.9781627081627>
- ASTM International. (2018). *Standard Specification for Steel, Sheet, Cold-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy, High-Strength Low-Alloy with Improved Formability, Required Hardness, Solution Hardened, and Bake Hardenable*. https://www.astm.org/a1008_a1008m-24.html

- Banco Portugal. (2019). *Análise do setor automóvel*. BPstat. Consultado a 17 de junho de 2024, em: <https://bpstat.bportugal.pt/conteudos/publicacoes/1296#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fbpstat,100>
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2015). *Mechanics of Materials (7th ed.)*. McGraw-Hill.
- Bird, J., & Ross, C. (2009). *Machining Technology: Machine Tools and Operations*. (1st ed.). Butterworth-Heinemann.
- Bjerregaard, L., Geels, K., Ottesen, B., & Rückert, M. (1992). *Metalog Guide* (1st ed.). Struers A/S. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjUsa3a9dODAxXEdaQEHXiqC6QQFnoECB0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.struers.com%2F-%2Fmedia%2FLibrary%2FBrochures%2FEnglish%2FMetalog-Guide.pdf&usg=AOvVaw01hEsESPFshjQJS0_I1eGL&opi=89978449
- Bosch. (2021). *Discos de serra circular Best for Laminate para serras meia-esquadria Discos de serra circular Lâminas de serra e serras cranianas | Bosch Professional*. Consultado a 23 de janeiro de 2024, em: <https://www.bosch-professional.com/pt/pt/discos-de-serra-circular-best-for-laminate-para-serras-meia-esquadria-2867800-ocs-ac/>
- Bosch Rexroth. (2024). *Strut Profile | 3842529347 | Bosch Rexroth*. Consultado a 7 de abril de 2024, em: https://store.boschrexroth.com/Technika-monta%C5%BCu/Podstawowe-elementy-mechaniczne/Profile-i-akcesoria/Profil-no%C5%9Bny/STRUT-PROFILE_3842529347?cclcl=en_PL
- Budynas, R. G., Nisbett, K. J., Nisbett, J. K., & Shigley, J. E. (2015). *Shigley's mechanical engineering design* (10. ed. in SI units). McGraw-Hill Education.
- Cardoso, S. (2015). *Reengenharia do sistema de corte de uma serra de dreno* [Instituto Politécnico de Leiria]. IC-Online. <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/3073?locale=en>

- ClaraVision. (2021, março 4). Welding analysis: Everything you need to know. *Claravision*. <https://www.claravision.com/en/welding-analysis-everything-you-need-to-know/>
- Costa, R. (2012). *Papel da Subsidiária Brasileira na Estratégia de Internacionalização dos Negócios de Empresas Multinacionais do Setor Automotivo* [Universidade de São Paulo]. <https://www.fea.usp.br/fea/eventos/mestrado-papel-da-subsidiaria-brasileira-na-estrategia-de-internacionalizacao-dos>
- Daraghma, H., AISukkar, A., Güler, U., Taş, O., & Saad, M. (2021). *Design and manufacturing of cutting machine for metallurgical testing*. Eastern Mediterranean University Department of Mechanical Engineering. <https://me.emu.edu.tr/Documents/CAPSTONE/PAST%20PROJECTS/2020-21%20Spring/Precision%20cutting%20machine%20for%20metallurgical%20testing%20-%20REPORT.pdf>
- Dash, B., Murthy, V. M. S. R., & Chattopadhyaya, S. (2024). Design Aspects Governing Disc Cutters and Cutterheads of Hard Rock TBM—A Review. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41(1), 219–237. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00923-5>
- DIN 8524-1. (1986). *DIN 8524-1:1986-07 Imperfections in Metallic Welded Joints; Fusion Welded Joints; Classification, Terminology from Intertek Inform*. <https://www.intertekinform.com/en-gb/standards/>
- DIN 8524-1: IMPERFECTIONS IN METALLIC WELDED JOINTS; FUSION WELDED JOINTS; CLASSIFICATION, TERMINOLOGY*. (sem data). Obtido 21 de janeiro de 2024, de https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=DIN%208524%2D1&item_s_key=00119789
- Dorf, R. C., & Svoboda, J. A. (2010). *Introduction to Electric Circuits*. Wiley.
- Edge, E., & LLC, E. E. (2000). *Mass Moment of Inertia Equations*. Consultado a 23 de maio de 2024, em:

https://www.engineersedge.com/mechanics_machines/mass_moment_of_inertia_equations_13091.htm

Europäische Kommission (Ed.). (1997). *The competitiveness of European industry: Based on the working document of Commission services*. Office for official publications of the European Communities.

Eurostat. (2006). *Machinery and equipment*.

<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5691468/KS-BW-07-001-08-EN.PDF.pdf/0419aa56-bea4-4198-9725-1fc30e734924?t=1414773536000>

Galego, J. (2015). *Micrografia* [4].

https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/lmcm1_aula4.pdf

Hadzihafizovic, D. (2022). *Welding Defects*. 1st ed., 39.

Hiwin. (2019). *DMS74-A000 | Rotary tables DMS | Rotary & swivel tables | Products | HIWIN*.

<https://www.hiwin.de/en/Products/Rotary-%26-swivel-tables/Rotary-tables-DMS/DMS74-A000/p/7.R2315>

Hiwin. (2024a). *Create sizing | HIWIN*. Consultado a 24 de abril de 2024, em:

<https://www.hiwin.de/en/projects/newSizingProject/GW>

Hiwin. (2024b). *EM1-C-M-10-2-0-E-0-A | Servo motors EM1 | Servo motors | Products | HIWIN*.

Consultado a 29 de abril de 2024, em:

<https://www.hiwin.de/en/Products/Servo-motors/Servo-motors-EM1/EM1-C-M-10-2-0-E-0-A/p/80025254>

Hughes, A., & Drury, B. (2013). *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. Newnes.

Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy* (2.^a ed.). John Wiley & Sons.

Kumar, A. L., & Sahoo, S. (2005). *Physical Metallurgy Laboratory*.

Manu, M. (2011). *Quality and Customer Satisfaction Perspective in Organisations by*

Gap and Total Quality Improvement Methods.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34692.35202>

- Martendal, C. (2016, fevereiro 19). O que afinal faz um engenheiro de materiais? *Engenheiro de Materiais*.
<https://engenheirodemateriais.wordpress.com/2016/02/19/o-que-afinal-faz-um-engenheiro-de-materiais/>
- Mitcalc. (2003). *MITcalc—Geometric design and strength check of V-belt transmission*. Consultado a 23 de janeiro de 2024, em:
<https://www.mitcalc.com/doc/vbelts/help/en/vbelts.htm>
- Mitsubishi Materials Corporation. (2022, junho 8). *Cutting Power for Turning*. Mitsubishi Materials Corporation. Consultado a 16 de setembro de 2023, em:
https://www.mmc-carbide.com/us/technical_information/formula/tec_turning_cutting_power_formula
- Moreira, A. F. L. (2015). *Máquina-ferramenta CNC para gravação: Desenvolvimento de protótipo de baixo-custo*.
<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/40036>
- Norelem. (2024). *Manaqueira flexível*. Consultado a 2 de junho de 2024, em:
<https://www.norelemusa.com/medias/Details-Default-96200-Anwb1.png?context=bWFzdGVyfHJvb3R8MzEzOTAxGltYWdlL3BuZ3xhRGd3TDJoaE9TODRPRFEwTWpnd01qazVOVFV3TDBSbGRHRnBiSE5mUkdWbVlYVnNkRjg1TmpJd01GOUJibmRpTVM1d2JtY3w2MWM2NmlyYWVjOWVhMzkyNGQ2ZjUxMWFhYmM3NTZiMzBkNTk3ZmUzMjViYzgzYjY4MmMwMzA3NTFjY2E4ZjRj>
- Ojolo, S., Orisaley, J., & Adelaja, A. (2010). Development of a high speed abrasive cutting machine. *Journal of Engineering Research*, 15, 1–8.
- OTA. (2020, outubro). 03. *Como se classifica a granulometria dos abrasivos? – OTA – Organização Técnica de Abrasivos*. Consultado a 11 de novembro de 2023, em: <https://ota-abrasivos.com/2020/10/14/como-se-mede-a-granulometria-dos-abrasivos/>

- Pferd. (2024). *Laboratory cut-off wheel T 300x2x32 mm Performance Line SG LAB STEEL for steel*. Consultado a 28 de novembro de 2023, em: <https://se.pferd.com/en/laboratory-cut-off-wheels-sg-lab-steel?a%5Bdiam-outer-tds%5D=300+mm&a%5Bwidth-tds%5D=2+mm&a%5Bdiam-bore-tds%5D=32+mm&a%5Bhardness-tds%5D=H&a%5Boperating-speed-max-tds%5D=80+m%2Fs>
- Rohde, R. A. (2010). *Metalografia Preparação de Amostras*. USP. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313798/mod_resource/content/1/APOSTILA_METALOGRAFIA.pdf
- Siemens. (2022). *SIMOTICS GP 1LE1/1PC1 Standard Motors*. Consultado a 4 de fevereiro de 2024, em: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/1LE1004-1BA22-1AA6>
- SKF. (2018). *Rolling Bearings*. SKF Group. https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196802809de/pdf_preview_medium/0901d196802809de_pdf_preview_medium.pdf
- Statista. (2022). *Manufacturing: Machinery in the U.S. 2022—Industry Insights & Data Analysis*. <https://www.statista.com/study/15809/manufacturing-machinery-in-the-us/>
- Taylor, B., & Guesnier, A. (2019, março 8). *Metallography of Welds—Application Note*. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwif2JjI5M6DaxWjUqQEHag8BEcQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.struers.com%2F-media%2FLibrary%2FBrochures%2FEnglish%2FApplication-Note-Metallography-of-Welds.pdf&usg=AOvVaw0vELTrXUHKQXkVdGiHxC8M&opi=89978449>
- Toptitech. (2024). *Cold Cracking in Welding: Causes, Prevention, and Mitigation - Knowledge*. Consultado a 15 de outubro de 2023, em:

<https://www.toptitech.com/info/cold-cracking-in-welding-causes-prevention-94185505.html>

Tyrolit. (2024). *PREMIUM cut-off wheels* | Tyrolit. Consultado a 2 de dezembro de 2023, em: <https://www.tyrolit.com/at-en/products/tools/cutting/stationary-cutting/premium-cut-off-wheels-668/>

US Bureau of Labor Statistics. (2024). *Industries at a Glance: Manufacturing: NAICS 31-33: U.S. Bureau of Labor Statistics*. Bureau of Labor Statistics. Consultado a 7 de janeiro de 2024, em: <https://www.bls.gov/iag/tgs/iag31-33.htm>

US Census Bureau. (2024). *North American Industry Classification System (NAICS) U.S. Census Bureau*. Consultado a 7 de janeiro de 2024, em: <https://www.census.gov/naics/?input=31&chart=2022&details=31>

Vander Voort, G. (2011). Metallography of Welds. *Advanced Materials and Processes*, 169, 19–23.

Voort, G. F. V. (1999). *Metallography, Principles and Practice*. ASM International.

White, F. (2015). *Fluid Mechanics* (8th edition). McGraw Hill.

World Iron & Steel Co.,Ltd. (2021, julho). *Electro-polishing VS Chemical Polishing*. Electro-Polishing VS Chemical Polishing. Consultado a 15 de janeiro de 2024, em: <https://www.worldironsteel.com/news/electro-polishing-vs-chemical-polishing-47784594.html>

Xometry. (2024). Steel 1.2842 / 90MnCrV8. *Xometry Pro*. Consultado a 19 de setembro de 2023, em: <https://xometry.pro/en-eu/materials/steel-1-2842/>

Zipperian, D. C. (2011). *Metallographic Handbook*. PACE Technologies. <https://www.metallographic.com/Brochures/Met-manual-2b.pdf>

Apêndice A – Rolamentos

Cálculo da Carga Estática do Rolamento

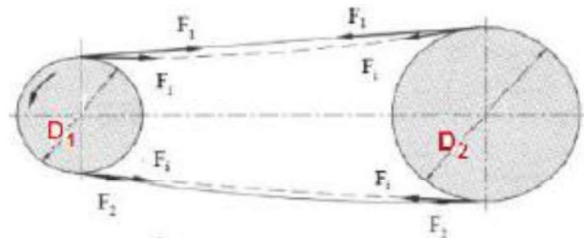
1. Definição dos esforços atuantes no rolamento

No caso de estudo, não existe ação de esforços axiais ($F_{a, rol}$) em nenhum dos veios. Adicionalmente, os esforços radiais ($F_{r, rol}$) aplicados são as cargas submetidas pela correia ($F_{correia}$), sendo que no caso do veio movido temos também F_t .

$$\text{Veio motor: } F_{r, rol} = F_{correia} \quad \text{A.1}$$

$$\text{Veio movido: } F_{r, rol} = F_{correia} + F_t \quad \text{A.2}$$

2. Determinação de $F_{correia}$



a. Definição da Potência de projeto

$$P_{projeto} = 1,6 \times P_{motor} \quad \text{A.3}$$

Tendo-se definido um fator de serviço de 1,6 (referência), sabendo que a potência do motor é de 4000 W, obteve-se uma potência de projeto de 6400 W.

b. Cálculo dos ângulos de abraçamento

$$\vartheta_1 = \pi - 2 \arcsen \left(\frac{\Phi_{polia,2} - \Phi_{polia,1}}{2C_{eixo}} \right) \quad \text{A.4}$$

$$\vartheta_2 = \pi + 2 \arcsen \left(\frac{\Phi_{polia,2} - \Phi_{polia,1}}{2C_{eixo}} \right) \quad \text{A.5}$$

Relembrando que os diâmetros da polia maior ($\Phi_{polia,2}$) e menor ($\Phi_{polia,1}$) são 106 mm e 63 mm, respectivamente, e que a distância entre eixos (C_{eixo}) definida foi de 330 mm, obteve-se um ϑ_1 de 3,27 rad e um ϑ_2 de 3,01 rad.

Posto isto, assume-se o maior valor em módulo para ϑ , ou seja, $\vartheta = \vartheta_1 = 3,27$ rad.

c. Cálculo de F_{correia}

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{0,3 \times \vartheta} \quad \text{A.6}$$

Posto isto, obteve-se que a força no ramo tenso (F_1) e a força no ramo bambo (F_2) da correia eram 625,14 N e 234,25 N, respetivamente.

Assim sendo, como F_{correia} corresponde à soma em módulo destas duas cargas, é possível afirmar que $F_{\text{correia}} = 859,39$ N.

3. Cálculo da Força Equivalente Estática (F_0)

$$F_0 = X_0 F_{r,rol} + Y_0 F_{a,rol} \quad \text{A.7}$$

Como no caso de estudo não existe ação de esforços axiais ($F_{a,rol}$) no veio. Uma vez que a relação $F_{a,rol}/F_{r,rol}$ é 0, o valor de X_0 é 1, e temos então que $F_0 = F_{r,rol} = 859,39$ N no veio motor e 908,21 N no veio movido.

Força equivalente estática (F_0)

Para $F_a \div F_r \leq 0,8$	$F_0 = F_r$
Para $F_a \div F_r > 0,8$	$F_0 = 0,6.F_r + 0,5.F_a$

4. Carga Estática (C_0)

Posto isto, considerando um coeficiente de segurança (f_s) de 1 (SKF, 2018), C_0 é igual a 859,38 N para o veio motor e 908,21 N para o veio movido.

$$C_0 = f_s \times F_0 \quad \text{A.8}$$

Cálculo da carga Dinâmica do Rolamento

1. Cálculo da carga dinâmica (F)

Uma vez que não existe carga axial aplicada, a carga dinâmica (F) é igual à força radial ($F_{r,rol}$):

$$\text{Veio motor: } F = F_{r,rol} = 859,39 \text{ N} \quad \text{A.9}$$

$$\text{Veio movido: } F = F_{r,rol} = 908,21 \text{ N} \quad \text{A.10}$$

2. Definição da vida nominal (L_h)

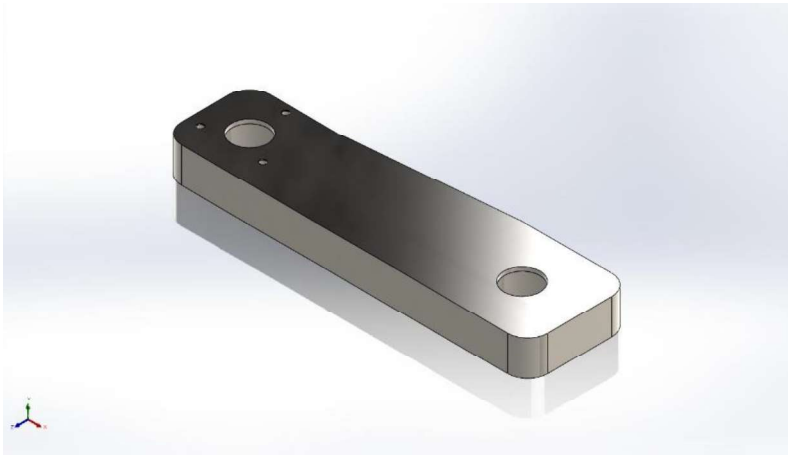
Foi definida uma vida nominal de 13200 h para os rolamentos.

3. Cálculo da capacidade de carga dinâmica (C)

$$C = \sqrt[3]{\frac{L_h \times 60 \times n}{10^6}} \times F \quad \text{A.11}$$

Posto isto, com velocidades de 4400 rpm e 2950 rpm, obteve-se um requisito de uma capacidade de carga dinâmica de 13,77 kN e de 11,40 kN para os rolamentos nos veios movido e motor, respetivamente.

Apêndice B – Simulações FEM



Description

No Data

Simulation of braco de suporte

Date: 23 de junho de 2024
Designer: Solidworks
Study name: Malha 5
Analysis type: Static

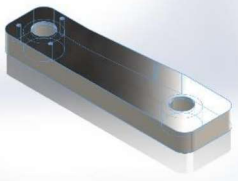
Table of Contents

- Description 108
- Assumptions..... 109
- Model Information 109
- Study Properties..... 110
- Units 110
- Material Properties 111
- Loads and Fixtures 112
- Connector Definitions 113
- Interaction Information 113
- Mesh information..... 114
- Sensor Details..... 115
- Resultant Forces 115
- Beams..... 115
- Study Results 116
- Conclusion..... 117

Assumptions

Model Information



Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
 Cut-Extrude2	Solid Body	Mass: 16,0974 kg Volume: 0,00206377 m ³ Density: 7 800 kg/m ³ Weight: 157,755 N	C:\Users\Utilizador\Desktop\ISEL\Mestrado\4º Semestre (TESE)\simulacao\braco de suporte.SLDPRT Mar 27 20:19:37 2024

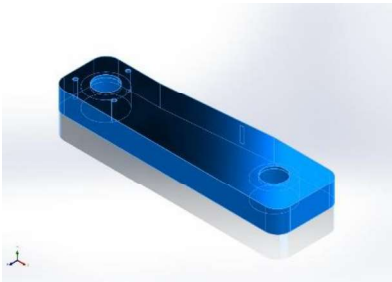
Study Properties

Study name	Malha 5
Analysis type	Static
Mesh type	Solid Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SOLIDWORKS Flow Simulation	Off
Solver type	Automatic
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SOLIDWORKS document (C:\Users\Utilizador\Desktop\ISEL\Mestrado\4º Semestre (TESE)\simulacao)

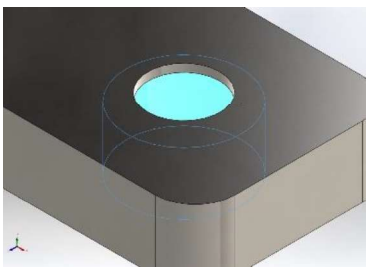
Units

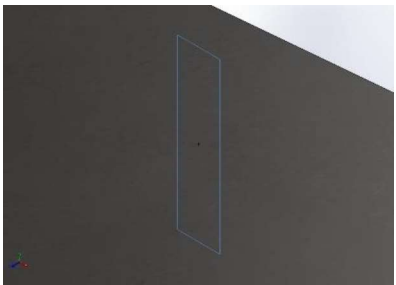
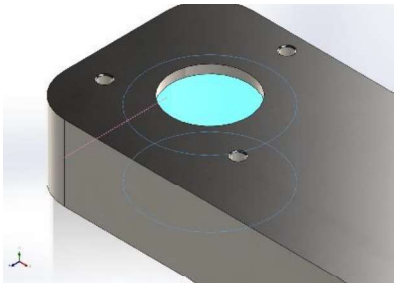
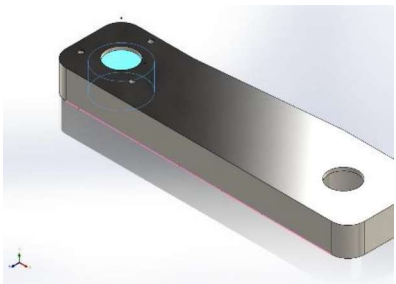
Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m ²

Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<p> Name: 1.1191 (C45E) Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 5,65e+08 N/m² Tensile strength: 7,5e+08 N/m² Elastic modulus: 2,1e+11 N/m² Poisson's ratio: 0,28 Mass density: 7 800 kg/m³ Shear modulus: 7,9e+10 N/m² Thermal expansion coefficient: 1,1e-05 /Kelvin </p>	<p>SolidBody 2(Cut-Extrude2)(braco de suporte)</p>
<p>Curve Data:N/A</p>		

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-1		Entities: 1 face(s) Type: Fixed Geometry		
Resultant Forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	-80,0248	-0,00345737	3 290	3 290,98
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 1 face(s) Type: Apply normal force Value: -3 440 N
Force-2		Entities: 1 face(s) Reference: Edge< 1 > Type: Apply force Values: ---; ---; - 150 N
Force-3		Entities: 1 face(s) Reference: Edge< 1 > Type: Apply force Values: ---; ---; -80 N

Connector Definitions

No Data

Interaction Information

No Data

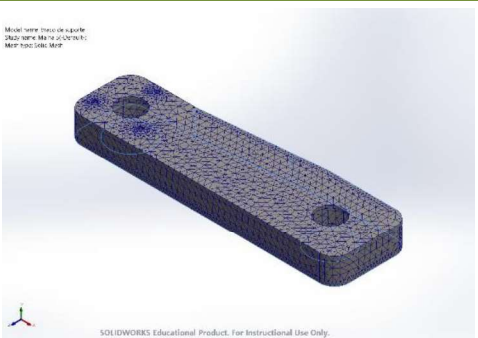
Mesh information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points for High quality mesh	16 Points
Element Size	10 mm
Tolerance	0,5 mm
Mesh Quality	High



Mesh information - Details

Total Nodes	67487
Total Elements	44136
Maximum Aspect Ratio	19,127
% of elements with Aspect Ratio < 3	98,8
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0,0272
Percentage of distorted elements	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:02
Computer name:	

Mesh Control Information:

Mesh Control Name	Mesh Control Image	Mesh Control Details
Control-2		Entities: 3 face(s) Units: mm Size: 5 Ratio: 5

Sensor Details

Sensor name	Location	Sensor Details
Stress1		Value : 3,046e+00 N/mm ² (MPa) Entities :1 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Max over Selected Entities Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA
Stress2		Value : 3,377e+00 N/mm ² (MPa) Entities :1 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Max over Selected Entities Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA

Resultant Forces

Reaction forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	-80,0248	-0,00345737	3 290	3 290,98

Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	0

Free body forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	0,0227019	-0,243479	-0,0500312	0,249601

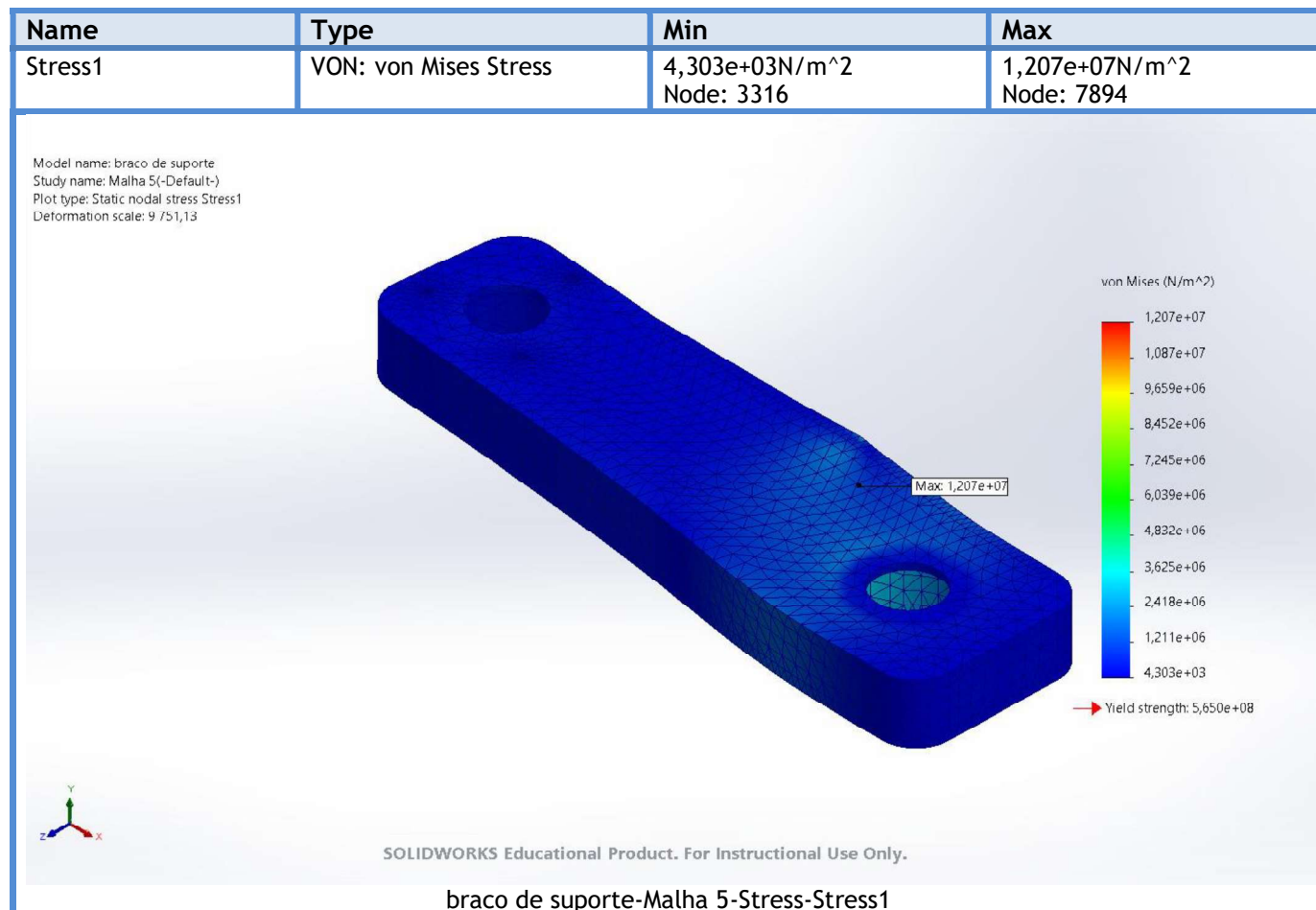
Free body moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	1e-33

Beams

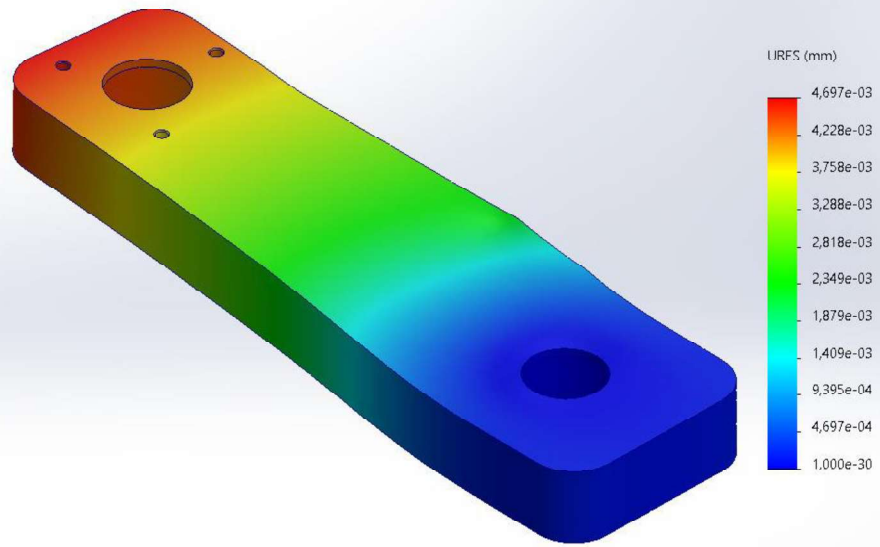
No Data

Study Results



Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0,000e+00mm Node: 138	4,697e-03mm Node: 585

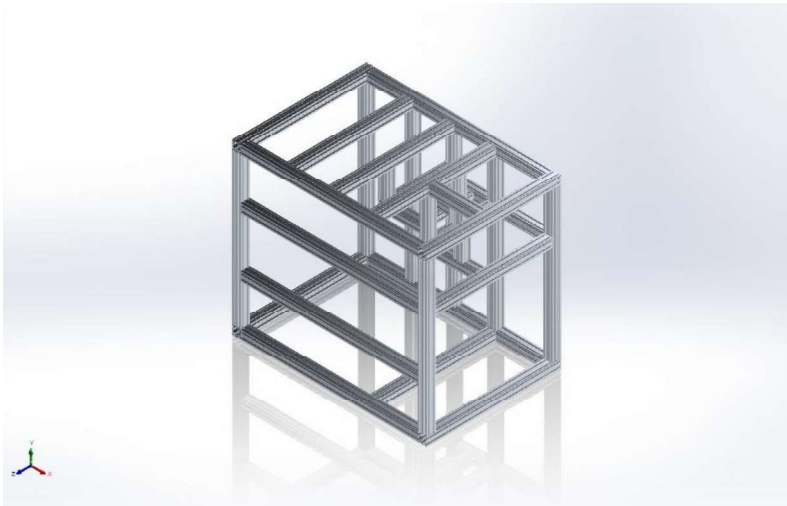
Model name: braco de suporte
Study name: Malha 5(-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 9.751,13



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

braco de suporte-Malha 5-Displacement-Displacement1

Conclusion



Simulation of Estrutura 1.0

Date: 20 de setembro de 2024
Designer: Solidworks
Study name: Teste 1
Analysis type: Static

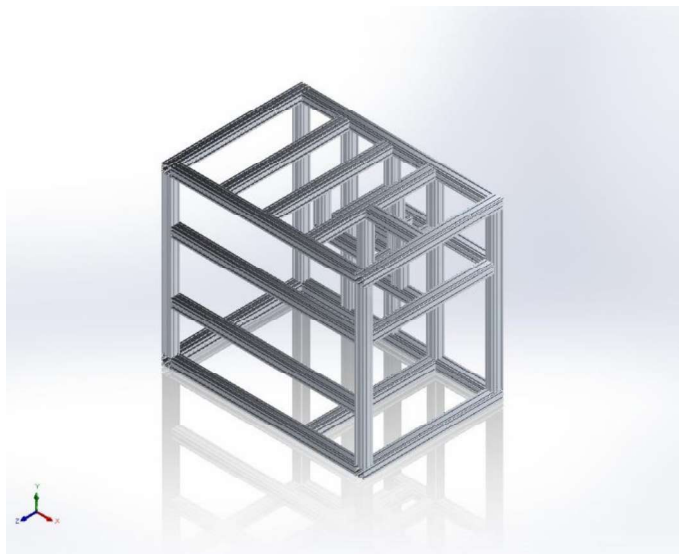
Description

No Data

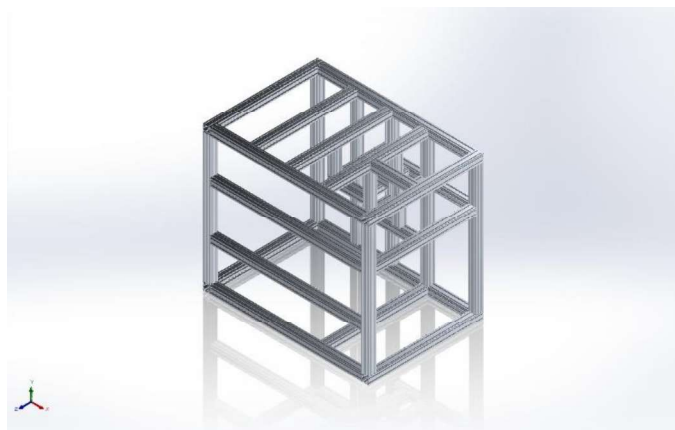
Table of Contents

Description	118
Assumptions.....	119
Model Information	120
Study Properties.....	129
Units	129
Material Properties	130
Loads and Fixtures	132
Connector Definitions	133
Interaction Information	134
Mesh information.....	134
Sensor Details.....	134
Resultant Forces	135
Beams.....	136
Study Results	141
Conclusion.....	144

Assumptions

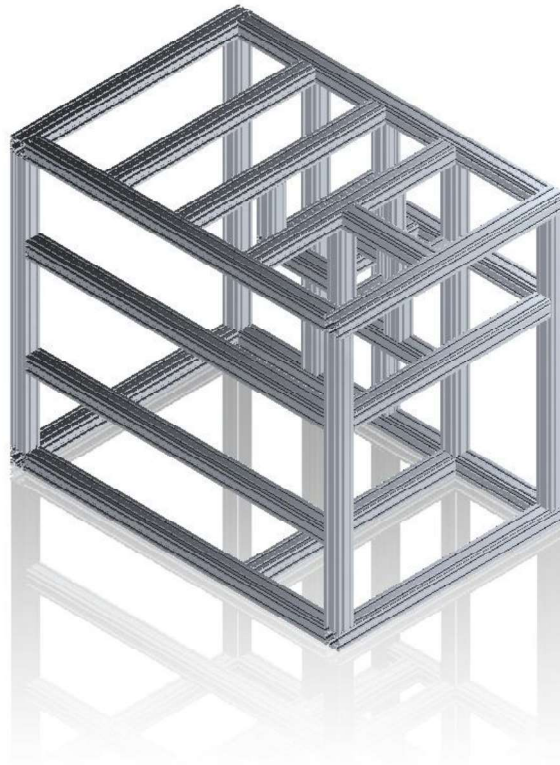


Original Model



Model Analyzed

Model Information



Model name: Estrutura 1.0
Current Configuration: Default

Beam Bodies:

Document Name and Reference	Formulation	Properties	Document Path/Date Modified
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 560mm Volume:0,00282545m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:7,62871kg Weight:74,7614N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\X1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 560mm Volume:0,00282545m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:7,62871kg	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\X1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024

		Weight:74,7614N	
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 560mm Volume:0,00282545m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:7,62871kg Weight:74,7614N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\X1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 560mm Volume:0,00282545m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:7,62871kg Weight:74,7614N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\X1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 560mm Volume:0,00282545m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:7,62871kg Weight:74,7614N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\X1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 560mm Volume:0,00282545m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:7,62871kg Weight:74,7614N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\X1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:420mm Volume:0,000760698m ³	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\X2.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024

		<p>Mass Density:2 700kg/m³ Mass:2,05388kg Weight:20,1281N</p>	
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m² Length:420mm Volume:0,000760698 m³ Mass Density:2 700kg/m³ Mass:2,05388kg Weight:20,1281N</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\X2.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m² Length:420mm Volume:0,000760698 m³ Mass Density:2 700kg/m³ Mass:2,05388kg Weight:20,1281N</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\X2.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m² Length:1 330mm Volume:0,00240888m³ Mass Density:2 700kg/m³ Mass:6,50397kg Weight:63,7389N</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Y1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m² Length:1 330mm Volume:0,00240888m³ Mass Density:2 700kg/m³ Mass:6,50397kg Weight:63,7389N</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Y1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m²</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Y1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>

		Length:1 330mm Volume:0,00240888m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:6,50397kg Weight:63,7389N	
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 330mm Volume:0,00240888m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:6,50397kg Weight:63,7389N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\Y1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 330mm Volume:0,00240888m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:6,50397kg Weight:63,7389N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\Y1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 330mm Volume:0,00240888m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:6,50397kg Weight:63,7389N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\Y1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 330mm Volume:0,00240888m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:6,50397kg Weight:63,7389N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\Y1.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024

SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 190mm Volume:0,00215531m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:5,81934kg Weight:57,0295N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z1.s tp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 190mm Volume:0,00215531m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:5,81934kg Weight:57,0295N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z1.s tp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 190mm Volume:0,00215531m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:5,81934kg Weight:57,0295N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z1.s tp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 190mm Volume:0,00215531m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:5,81934kg Weight:57,0295N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z1.s tp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 030mm Volume:0,00186552m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:5,03691kg	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z2.s tp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024

		Weight:49,3617N	
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 030mm Volume:0,00186552m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:5,03691kg Weight:49,3617N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z2.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 030mm Volume:0,00186552m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:5,03691kg Weight:49,3617N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z2.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 030mm Volume:0,00186552m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:5,03691kg Weight:49,3617N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z2.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:1 030mm Volume:0,00186552m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:5,03691kg Weight:49,3617N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z2.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:596mm Volume:0,00107947m ³	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z3.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024

		<p>Mass Density:2 700kg/m³ Mass:2,91456kg Weight:28,5627N</p>	
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m² Length:596mm Volume:0,00107947m³ Mass Density:2 700kg/m³ Mass:2,91456kg Weight:28,5627N</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Z3.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m² Length:285mm Volume:0,000516188 m³ Mass Density:2 700kg/m³ Mass:1,39371kg Weight:13,6583N</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\X3.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m² Length:285mm Volume:0,000516188 m³ Mass Density:2 700kg/m³ Mass:1,39371kg Weight:13,6583N</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\X3.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m² Length:285mm Volume:0,000516188 m³ Mass Density:2 700kg/m³ Mass:1,39371kg Weight:13,6583N</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\X3.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m² Length:285mm Volume:0,000516188 m³ Mass Density:2 700kg/m³ Mass:1,39371kg Weight:13,6583N</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\X3.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	<p>Section Standard-Custom Section Area: 0,00181119m²</p>	<p>C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC~~\Y2.stp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024</p>

		Length:365mm Volume:0,000661083 m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:1,78492kg Weight:17,4922N	
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard- Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:365mm Volume:0,000661083 m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:1,78492kg Weight:17,4922N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\Y2.s tp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard- Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:365mm Volume:0,000661083 m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:1,78492kg Weight:17,4922N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\Y2.s tp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard- Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:245mm Volume:0,00044374m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:1,1981kg Weight:11,7414N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\Y3.s tp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024
SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)	Beam - Uniform C/S	Section Standard- Custom Section Area: 0,00181119m ² Length:334mm Volume:0,000604936 m ³ Mass Density:2 700kg/m ³ Mass:1,63333kg Weight:16,0066N	C:\Users\Utilizador\AppData\Local\Temp\swx16104\IC--\Z4.s tp.SLDPRT Sep 20 19:10:13 2024

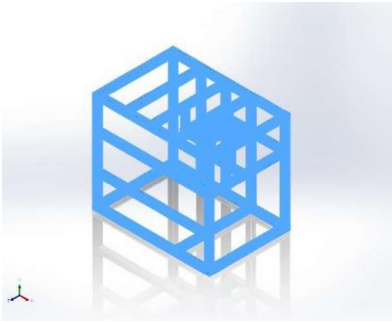
Study Properties

Study name	Teste 1
Analysis type	Static
Mesh type	Beam Mesh
Solver type	Automatic
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Result folder	SOLIDWORKS document (C:\Users\Utilizador\Desktop\Estrutura)

Units

Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m ²

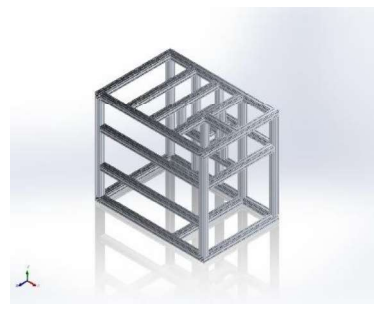
Material Properties

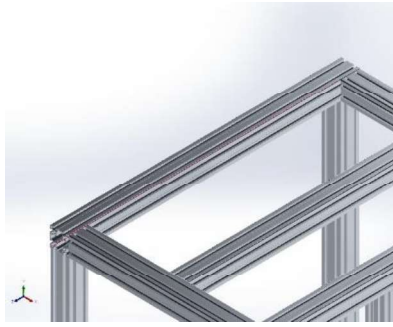
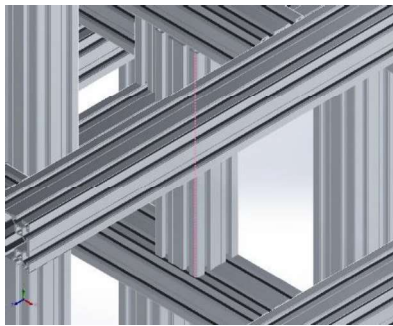

Model Reference	Properties	Components
	<p> Name: 6063-T6 Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 2,15e+08 N/m² Tensile strength: 2,4e+08 N/m² Elastic modulus: 6,9e+10 N/m² Poisson's ratio: 0,33 Mass density: 2 700 kg/m³ Shear modulus: 2,58e+10 N/m² Thermal expansion coefficient: 2,34e-05 /Kelvin </p>	<p> SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X1.stp-1), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X1.stp-2), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X1.stp-3), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X1.stp-4), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X1.stp-5), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X1.stp-6), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X2.stp-1), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X2.stp-2), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X2.stp-3), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X3.stp-1), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X3.stp-2), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/X3.stp-3), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y1.stp-1), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y1.stp-2), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y1.stp-3), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y1.stp-4), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y1.stp-5), </p>

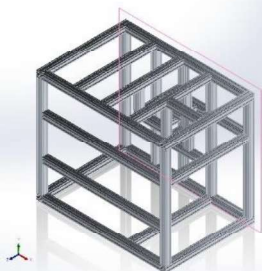
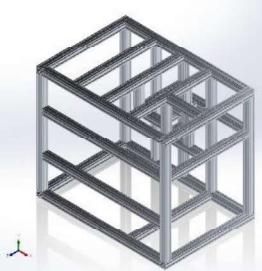
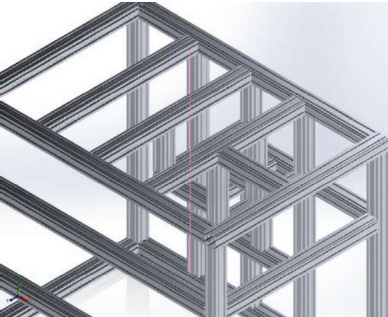
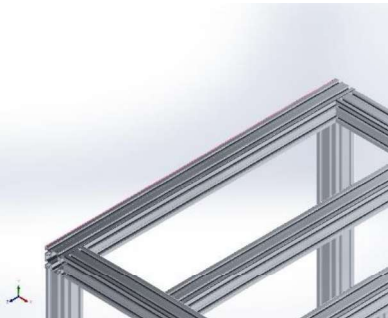
		SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y1.stp-6), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y1.stp-7), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y2.stp-1), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y2.stp-2), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y2.stp-3), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Y3.stp-1), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z1.stp-1), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z1.stp-2), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z1.stp-3), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z1.stp-4), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z2.stp-1), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z2.stp-2), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z2.stp-3), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z2.stp-4), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z2.stp-5), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z3.stp-1), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z3.stp-2), SolidBody 1(Estrutura 1.0.stp<1>)(Estrutura 1.0.stp-1/Z4.stp-1)
--	--	---

Curve Data:N/A

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-1		<p>Entities: 4 Joint(s) Type: Fixed Geometry</p>

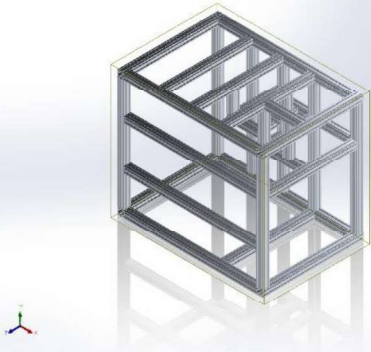
Load name	Load Image	Load Details
Force-1		<p>Entities: 6 Joint(s) Reference: Edge< 1 > Type: Apply force Values: ---; ---; - 150 N Moments: ---; ---; --- N.m</p>
Force-3		<p>Entities: 2 Joint(s) Reference: Edge< 1 > Type: Apply force Values: ---; ---; --- N Moments: ---; ---; 15 N.m</p>
Distributed Mass-1		<p>Type: Displacement (Direct transfer) Coordinate System: Global cartesian coordinates Translation Values: ---; ---; --- mm Rotation Values: ---; ---; --- deg Reference coordinates: 0 0 0 mm Remote Mass: 300 kg Moment of Inertia: 0;0;0;0;0;0 kg.m² Components transferred: NA</p>

Gravity-1		Reference: Front Plane Values: 0 0 -9,81 Units: m/s ²
Distributed Mass-2		Type: Displacement (Direct transfer) Coordinate System: Global cartesian coordinates Translation Values: ---; ---; --- mm Rotation Values: ---; ---; --- deg Reference coordinates: 0 0 0 mm Remote Mass: 100 kg Moment of Inertia: 0;0;0;0;0 kg.m ² Components transferred: NA
Force-4		Entities: 5 Joint(s) Reference: Edge< 1 > Type: Apply force Values: ---; ---; -75 N Moments: ---; ---; --- N.m
Force-5		Entities: 1 Joint(s) Reference: Edge< 1 > Type: Apply force Values: ---; ---; - 250 N Moments: ---; ---; --- N.m

Connector Definitions

No Data

Interaction Information

Interaction	Interaction Image	Interaction Properties
Global Interaction		Type: Bonded Components: 1 component(s) Options: Independent mesh

Mesh information

Mesh type	Beam Mesh
-----------	-----------

Mesh information - Details

Total Nodes	297
Total Elements	285
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:01:17
Computer name:	

Sensor Details

No Data

Resultant Forces

Reaction forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	0	375	6 036,54	6 048,17

Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	-193,203	74,125	2,19954	206,946

Free body forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	0	0	0	0

Free body moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	0

Beams

Beam Forces

Beam Name	Joints	Axial(N)	Shear1(N)	Shear2(N)	Moment1(N.m)	Moment2(N.m)	Torque(N.m)
Beam-1(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-39,7464	794,835	-63,2473	14,5009	248,468	3,84071
	2	-74,6805	371,907	-20,7068	-4,93984	-147,982	3,7138
	3	13,2983	454,563	-45,404	-8,38303	-17,4172	6,44866
	4	44,3567	-204,067	-37,7451	-5,39171	149,5	-7,22184
	5	39,7465	-775,166	63,2473	11,4305	73,3824	-3,84071
Beam-2(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	113,38	1 045,07	-59,8442	14,5091	270,607	-4,182
	2	-179,997	603,434	24,2613	1,71994	-199,339	-6,27542
	3	183,455	240,034	65,9937	11,3588	16,5499	-3,47706
	4	190,475	-504,402	6,03719	10,2545	167,805	7,37618
	5	-113,38	-1 025,4	59,8101	10,0219	153,84	4,1819
Beam-3(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	104,253	148,149	3,9976	1,93365	64,2518	-1,97889
	2	-46,5887	244,432	46,0329	16,037	-28,1481	-5,24929
	3	-104,253	-93,4596	-3,9976	-6,49091	73,4649	1,97889
Beam-4(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	237,676	649,055	-72,5588	23,3949	132,158	-0,304607
	2	-362,002	275,126	-99,9437	-30,1258	-68,3183	2,29283
	3	-237,676	-629,389	72,538	6,34989	129,923	0,304607
	4	-546,141	-512,315	77,3163	33,0904	152,617	-2,13841
	5	-595,196	313,538	-39,641	18,1629	-1,08034	1,24854
Beam-5(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-13,3544	44,31	-11,2084	8,99121	2,61189	0,596816
	2	13,3544	34,3655	11,2082	9,39038	5,54258	-0,596814
Beam-6(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-8,23775	39,0903	-3,65831	3,41112	-1,99736	-0,439657
	2	8,23775	39,5853	3,65732	2,5877	1,59145	0,439666
Beam-7(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	10,3464	369,181	-53,3303	-3,59929	-92,7751	25,8346
	2	-10,3464	-107,766	53,3303	-23,0659	-44,5902	22,2448
	3	10,3464	122,158	-53,3303	7,06677	10,1017	-22,2448
Beam-8(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-59,9861	196,71	34,9339	10,1084	-54,2163	0,0524107
	2	59,9861	-172,723	-34,9339	7,35854	-38,1418	-0,0524107
Beam-9(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	297,345	426,471	-114,627	-0,79669	-80,1311	-2,38237
	2	-297,346	-406,322	114,627	-47,3467	-94,7554	2,38235
Beam-13(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	2,74494e-06	33,8209	-2,29951e-14	5,89294e-15	7,9479	4,99583e-20
	2	2,74494e-06	33,8209	-3,16279e-14	-5,03166e-15	-7,9479	-4,58124e-20
Beam-14(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	64,2183	104,863	14,475	-2,2224	34,9767	-3,42886
	2	-49,3522	46,1786	-36,0672	-22,3378	5,19612	2,81426
	3	-64,2183	-83,5155	-14,475	-4,21898	6,93761	3,42886
	4	-53,01	-14,2596	-27,8294	-9,69907	21,4353	0,816947
Beam-15(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	6,94124	169,471	-35,02	14,9887	63,3283	4,77803
	2	15,0521	428,196	-142,925	-35,9393	-117,535	10,3614
	3	-6,94124	-123,177	35,02	18,8056	77,8746	-4,77803
Beam-16(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	130,292	154,179	47,0358	-15,9055	53,3914	-6,16834
	2	-148,755	185,528	102,866	32,8671	-23,0595	-5,36757

a 1.0.stp<1>	3	-130,292	-132,833	-47,0321	-5,02512	10,4686	6,16837
	4	-141,5	-73,5207	-33,679	-13,1479	54,5884	0,625774
Beam- 17(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	-74,7276	154,012	-30,3147	13,3081	45,5708	0,00891704
	2	155,637	184,938	-110,234	-22,2382	-24,814	1,36981
	3	74,7276	-107,718	30,3147	15,9456	80,7139	-0,00891704
Beam- 18(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	-67,3412	123,245	-31,0583	13,5811	13,6705	4,19764
	2	-6,17	412,572	-128,866	-24,2397	-57,4734	8,08284
	3	85,9243	453,336	-26,3931	16,9379	30,7269	13,9681
	4	67,3412	-76,9511	31,0583	16,3901	82,9241	-4,19764
Beam- 19(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	25,9925	35,7141	4,61031	-3,04525	-3,38113	1,5619
	2	-25,9925	31,9276	-4,61013	-3,45515	6,05063	-1,5619
Beam- 24(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	306,262	-118,728	-60,2207	33,8471	-64,1072	-0,28875
	2	-253,012	118,728	60,2207	32,9978	-67,6807	0,28875
Beam- 25(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	451,862	-0,444654	-84,2592	45,3853	-22,4733	0,13239
	2	-398,612	0,444654	84,2592	48,1424	21,9798	-0,13239
Beam- 26(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	748,485	-201,609	-23,1943	20,854	-94,4417	1,05456
	2	-695,235	201,609	23,1943	4,89162	-129,344	-1,05456
Beam- 27(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	1 049,38	-38,2093	-65,8158	36,0069	-49,7173	-3,53254
	2	-460,655	-259,136	-48,8113	-20,7668	62,9507	-2,74127
	3	-1 020,78	38,2093	65,8158	3,21928	26,9446	3,53254
Beam- 28(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	198,116	-128,307	3,59675	0,277405	4,40188	-2,34786
	2	-304,723	-117,96	56,9269	24,2632	31,2274	1,25145
	3	333,315	117,96	-56,9279	9,66561	39,0769	-1,25145
Beam- 29(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	-46,3134	-308,465	-4,77428	2,8564	-174,899	1,48188
	2	99,5633	308,465	4,77428	2,44305	-167,497	-1,48188
Beam- 30(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	-203,521	-121,846	128,781	-46,6202	-58,755	1,25515
	2	808,342	49,0552	-116,964	-3,38709	-42,4509	-0,459324
	3	232,113	121,846	-128,781	-30,133	-13,8654	-1,25514
Beam- 31(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	154,476	253,22	113,901	-22,0142	81,2018	0,4685
	2	-62,3983	-233,194	-60,3008	-1,04429	64,3286	1,6832
	3	22,3032	-248,535	-59,4303	-4,61422	60,1745	0,232395
	4	-138,453	-253,217	-113,908	-16,0288	3,37331	-0,468584
Beam- 32(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	-260,655	57,6641	-50,0305	48,3057	49,4009	0,488519
	2	313,905	-57,6641	50,0305	7,22818	14,6063	-0,488519
Beam- 33(Estrutur a 1.0.stp<1>	1	-574,231	102,473	167,094	-43,3519	5,88528	0,703914
	2	422,925	-191,636	-149,331	-50,9141	30,1218	-0,190668
	3	590,253	-102,474	-167,094	-12,4576	28,3408	-0,703898
Beam- 34(Estrutur	1	-66,0743	-173,507	-7,67954	3,33113	47,8979	0,473954
	2	165,234	257,986	-64,5603	26,071	71,6123	0,443601

a 1.0.stp<1>	3	-149,211	-257,986	64,5583	-4,50797	14,5548	-0,443632
Beam-36(Estrutura a 1.0.stp<1>)	1	57,4514	278,797	18,5832	3,06798	-34,8494	-1,85769
	2	-57,4514	6,65524	-18,5832	3,71488	-18,1657	1,85769
	3	57,4514	1,50015	18,5832	-0,55574	18,6039	-1,85769
Beam-37(Estrutura a 1.0.stp<1>)	1	-118,845	-104,944	161,148	-22,6706	-33,4931	3,52281
	2	118,845	122,454	-161,148	-36,1485	-8,0072	-3,5228
Beam-38(Estrutura a 1.0.stp<1>)	1	89,1625	-179,898	17,7631	0,513223	-48,4275	-0,668257
	2	-89,1625	197,408	-17,7631	-6,99675	-20,4308	0,668257
Beam-39(Estrutura a 1.0.stp<1>)	1	45,6508	64,8399	-163,161	22,5919	-18,9137	3,30778
	2	115,497	187,962	282,005	52,4905	-35,728	4,69939
	3	-45,6508	-59,0832	163,161	-3,01265	26,3491	-3,30778
Beam-40(Estrutura a 1.0.stp<1>)	1	4,81252e-05	-109	-1,51994e-12	-6,62274e-06	-2,37573e-10	-15
	2	5,67034e-05	128,429	3,51924e-12	-6,62273e-06	48,0794	15
Beam-41(Estrutura a 1.0.stp<1>)	1	-54,4751	148,188	-4,68355	0,700982	-26,9852	8,31507
	2	72,2382	70,5682	-84,479	0,917594	-9,85111	12,1157
	3	-72,2382	-64,8114	84,479	9,21989	17,9739	-12,1157
Beam-42(Estrutura a 1.0.stp<1>)	1	-11,8173	442,571	72,7927	0,796118	-86,8652	3,37126
	2	11,8167	-426,98	-72,7927	22,8615	-54,4369	-3,37123
Beam-43(Estrutura a 1.0.stp<1>)	1	-250	0,000119528	0,000119528	1,31245e-12	-3,31582e-12	-1,00094e-13
	2	267,942	0,000128107	0,000128106	-7,1295e-07	7,12964e-07	5,00942e-13

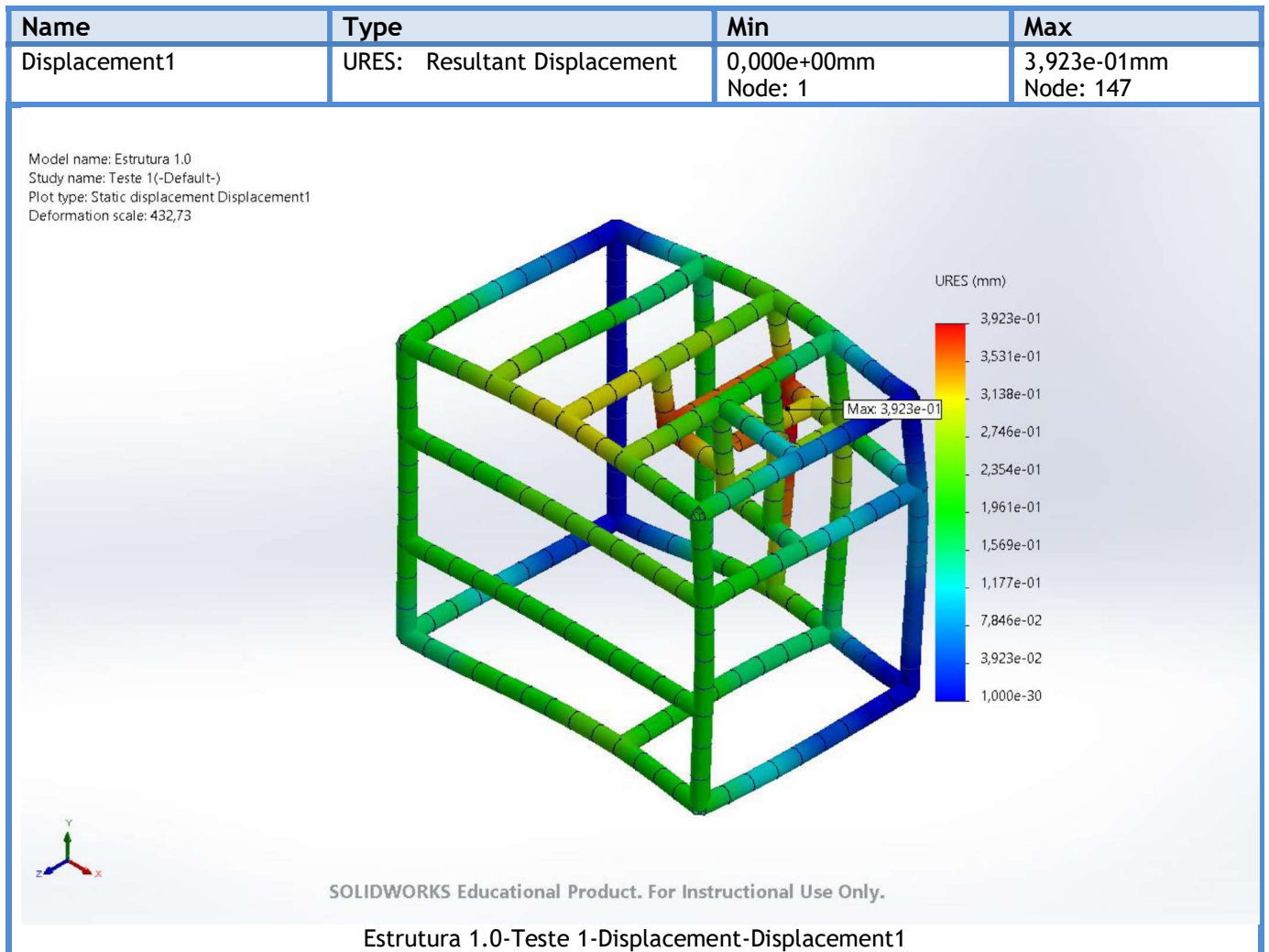
Beam Stresses

Beam Name	Joints	Axial(N/m^2)	Bending Dir1(N/m^2)	Bending Dir2(N/m^2)	Torsional (N/m^2)	Upper bound axial and bending(N/m^2)
Beam-1(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	21 945	-440 597	7,54948e+06	-327 648	8,01202e+06
	2	-41 232,9	-150 093	4,4963e+06	316 821	4,68763e+06
	3	7 342,34	-254 711	529 206	550 130	791 260
	4	24 490,4	-163 823	-4,54244e+06	-616 089	4,73076e+06
	5	21 945	347 307	-2,22966e+06	-327 648	2,59891e+06
Beam-2(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-62 599,9	-440 847	8,22216e+06	356 763	8,7256e+06
	2	-99 381	52 258,8	6,05675e+06	-535 351	6,20839e+06
	3	101 290	345 129	-502 855	-296 626	949 273
	4	105 166	311 576	-5,0986e+06	629 256	5,51534e+06
	5	-62 599,8	304 507	-4,67428e+06	356 755	5,04139e+06
Beam-3(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-57 560,6	-58 752,2	1,95224e+06	168 818	2,06855e+06
	2	-25 722,8	487 271	855 257	-447 813	1,36825e+06
	3	-57 560,6	-197 221	-2,23217e+06	168 818	2,48695e+06
Beam-4(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-131 227	-710 835	4,01551e+06	25 985,8	4,85757e+06
	2	-199 870	-915 346	2,07579e+06	195 600	3,19101e+06
	3	-131 227	192 936	-3,94759e+06	25 985,8	4,27176e+06
	4	-301 538	1,00542e+06	-4,63713e+06	-182 426	5,94409e+06

	5	-328 622	551 864	32 825,1	106 512	913 311
Beam-5(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	7 373,28	-273 190	79 360	-50 913,9	359 924
	2	7 373,29	285 319	-168 406	-50 913,7	461 098
Beam-6(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	4 548,26	-103 644	-60 688	37 506,7	168 880
	2	4 548,27	78 624,9	-48 354,8	37 507,5	131 528
Beam-7(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	5 712,51	-109 361	2,81889e+06	2,20393e+06	2,93397e+06
	2	5 712,51	700 837	-1,35483e+06	-	2,06138e+06
	3	5 712,51	214 718	-306 931	-	527 361
Beam-8(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-33 119,8	307 135	1,64732e+06	4 471,11	1,98757e+06
	2	-33 119,8	-223 583	-1,15891e+06	4 471,11	1,41561e+06
Beam-9(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	164 172	-24 206,7	2,43471e+06	-203 238	2,62309e+06
	2	164 172	1,43859e+06	-2,87906e+06	-203 237	4,48182e+06
Beam-13(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-0,00151555	-5,29893e-07	241 490	-4,2619e-15	241 490
	2	-0,00151555	-5,29867e-07	241 490	-3,90822e-15	241 490
Beam-14(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-35 456,5	67 525,6	1,06274e+06	292 514	1,16572e+06
	2	-27 248,6	-678 716	-157 880	240 082	863 844
	3	-35 456,5	-128 190	-210 793	292 514	374 440
	4	-29 268,1	-294 698	-651 295	69 693,1	975 261
Beam-15(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-3 832,43	-455 419	1,92418e+06	-407 610	2,38343e+06
	2	8 310,62	-1,09198e+06	3,57121e+06	883 921	4,67151e+06
	3	-3 832,43	571 392	-2,36615e+06	-407 610	2,94138e+06
Beam-16(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-71 937,5	483 275	1,62225e+06	526 216	2,17747e+06
	2	-82 131,3	998 639	700 643	-457 903	1,78141e+06
	3	-71 937,5	-152 684	-318 078	526 219	542 700
	4	-78 125,8	-399 489	-1,65862e+06	53 384,3	2,13624e+06
Beam-17(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	41 259	-404 354	1,38463e+06	-760,705	1,83024e+06
	2	85 931	-675 689	753 954	116 858	1,51557e+06
	3	41 259	484 494	-2,45242e+06	-760,705	2,97818e+06
Beam-18(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	37 180,7	-412 651	415 366	-358 098	865 198
	2	-3 406,61	-736 503	1,74628e+06	689 540	2,48619e+06
	3	47 440,9	514 642	-933 610	1,19161e+06	1,49569e+06
	4	37 180,7	498 001	-2,51958e+06	-358 098	3,05476e+06
Beam-19(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-14 351,1	92 527,5	-102 733	-133 244	209 611
	2	-14 351,1	-104 982	-183 843	-133 244	303 176
Beam-24(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-169 095	-1,02842e+06	-1,94784e+06	24 633,1	3,14535e+06
	2	-139 694	1,00261e+06	2,05642e+06	24 633,1	3,19872e+06
Beam-25(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-249 484	-1,37899e+06	-682 833	-11 294,1	2,31131e+06
	2	-220 083	1,46277e+06	-667 836	-11 294,1	2,35069e+06
Beam-26(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-413 257	-633 631	-2,86953e+06	-89 963,5	3,91642e+06
	2	-383 857	148 628	3,93001e+06	-89 963,5	4,4625e+06
Beam-27(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-579 386	-1,09404e+06	-1,51062e+06	301 358	3,18404e+06
	2	-254 339	-630 980	-1,9127e+06	-233 856	2,79802e+06
	3	-563 600	97 815,1	-818 687	301 358	1,4801e+06
	1	109 385	8 428,71	-133 747	-200 294	251 561
	2	-168 245	737 216	-948 817	106 760	1,85428e+06

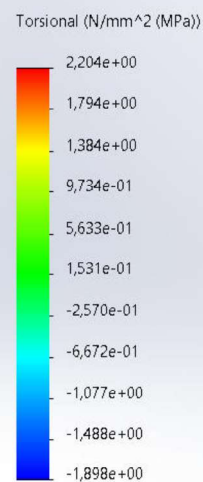
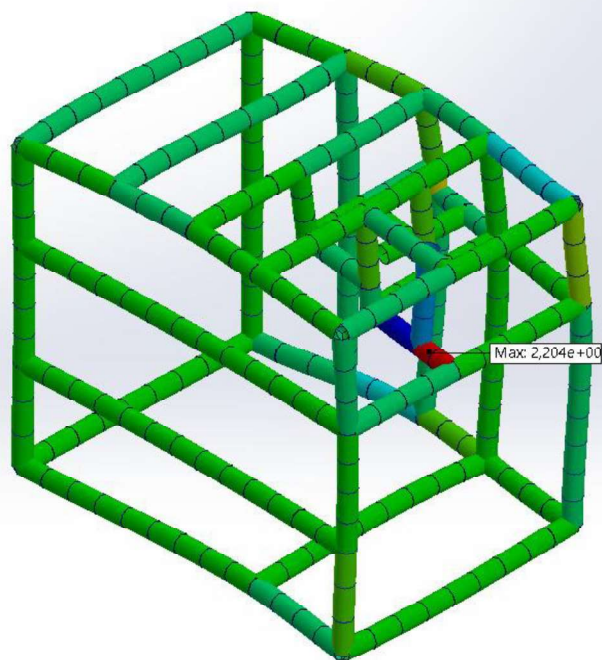
Beam-28(Estrutura 1.0.stp<1>)	3	-184 031	-293 681	1,18732e+06	106 760	1,66503e+06
Beam-29(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	25 570,8	-86 789,1	-5,31415e+06	-126 418	5,42651e+06
	2	54 971,3	74 230,1	5,08925e+06	-126 418	5,21845e+06
Beam-30(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	112 369	1,41652e+06	-1,78522e+06	-107 076	3,31411e+06
	2	446 306	-102 914	1,28984e+06	-39 184,6	1,83906e+06
	3	128 155	-915 566	421 287	-107 075	1,46501e+06
Beam-31(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-85 290	668 884	2,46725e+06	-39 967,4	3,22142e+06
	2	-34 451,6	-31 730	-1,95457e+06	143 592	2,02075e+06
	3	12 314,2	-140 199	-1,82835e+06	19 825,4	1,98086e+06
	4	-76 443,5	-487 020	-102 495	-39 974,5	665 959
Beam-32(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	143 914	-1,46773e+06	1,501e+06	-41 675,2	3,11265e+06
	2	173 315	219 622	-443 799	-41 675,2	836 735
Beam-33(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	317 047	1,31721e+06	178 819	-60 050,3	1,81308e+06
	2	233 507	-1,54698e+06	-915 226	-16 265,7	2,69572e+06
	3	325 893	-378 513	-861 110	-60 048,9	1,56552e+06
Beam-34(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-36 481,2	101 214	-1,45534e+06	40 432,6	1,59303e+06
	2	-91 229,9	-792 145	2,17588e+06	-37 843,3	3,05925e+06
	3	-82 383,2	-136 971	-442 236	-37 845,9	661 590
Beam-36(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	31 720,3	93 217,9	1,05887e+06	-158 478	1,18381e+06
	2	31 720,3	-112 873	-551 950	-158 478	696 544
	3	31 720,3	-16 885,7	-565 264	-158 478	613 870
Beam-37(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	65 617,1	688 828	-1,01766e+06	-300 528	1,7721e+06
	2	65 617	-1,09834e+06	243 292	-300 527	1,40725e+06
Beam-38(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-49 228,8	-15 593,8	-1,47143e+06	57 008,4	1,53625e+06
	2	-49 228,8	-212 590	620 772	57 008,4	882 591
Beam-39(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-25 204,9	-686 436	-574 676	-282 172	1,28632e+06
	2	63 769	1,59488e+06	1,08556e+06	400 884	2,74421e+06
	3	-25 204,9	-91 536,8	-800 594	-282 172	917 335
Beam-40(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	0,0265711	-0,201226	7,21846e-06	1,27958e+06	0,227805
	2	-0,0313074	0,201229	1,46085e+06	1,27958e+06	1,46085e+06
Beam-41(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-30 077,1	21 298,8	819 924	709 323	871 299
	2	-39 884,5	-27 880,3	-299 317	1,03354e+06	367 082
	3	-39 884,5	280 138	-546 121	1,03354e+06	866 144
Beam-42(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-6 524,61	24 189,4	2,63932e+06	287 588	2,67004e+06
	2	-6 524,3	-694 627	-1,65402e+06	287 585	2,35517e+06
Beam-43(Estrutura 1.0.stp<1>)	1	-138 031	3,98775e-08	1,00748e-07	-8,53857e-09	138 031
	2	-147 937	0,0216624	0,0216628	-4,27332e-08	147 937

Study Results



Name	Type	Min	Max
Stress5	Torsional	-1,898e+00N/mm ² (MPa) Element: 79	2,204e+00N/mm ² (MPa) Element: 81

Model name: Estrutura 1.0
 Study name: Teste 1(-Default-)
 Plot type: Torsional shear stress Stress5
 Deformation scale: 432,73

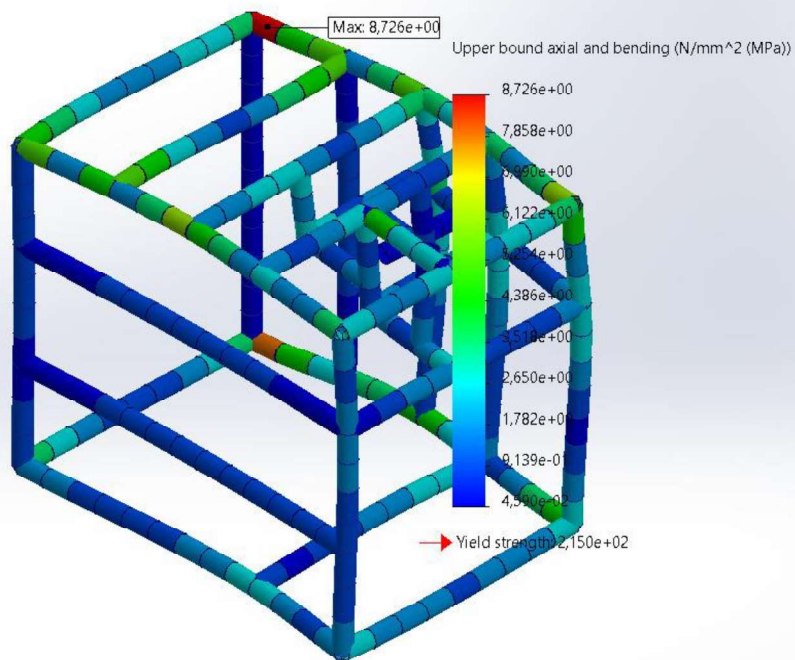


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Estrutura 1.0-Teste 1-Stress-Stress5

Name	Type	Min	Max
Stress8	Upper bound axial and bending	0,000e+00N/mm ² (MPa) Element: 284	8,726e+00N/mm ² (MPa) Element: 14

Model name: Estrutura 1.0
 Study name: Teste 1(-Default-)
 Plot type: Upper bound axial and bending Stress8
 Deformation scale: 432,73

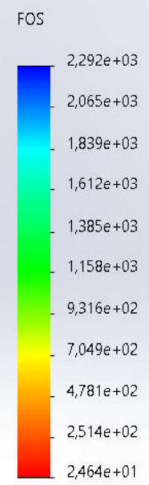
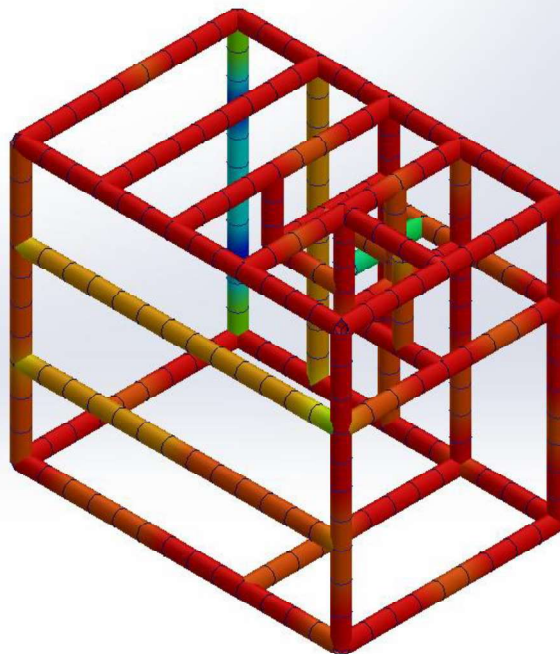


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Estrutura 1.0-Teste 1-Stress-Stress8

Name	Type	Min	Max
Factor of Safety1	Automatic	2,464e+01 Node: 15	2,292e+03 Node: 101

Model name: Estrutura 1.0
Study name: Teste 1(-Default-)
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1
Criterion : Automatic
Factor of safety distribution: Min FOS = 25



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Estrutura 1.0-Teste 1-Factor of Safety-Factor of Safety1

Conclusion