



# Otimização de um Equipamento CNC em Dinamica Sustentavel

LUÍS VALINHO PRÍNCIPE

julho de 2025

**Otimização de um Equipamento CNC em Dinâmica  
Sustentável**

**Luís Valinho Príncipe**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em  
Construções Mecânicas**

**Orientador: Armando Vilaça Campos**

**Júri:**

Presidente:

José Augusto de Sousa Ferreira Brandão

Arguente:

Pedro Miguel Teixeira Marques

Porto, junho 2025



# Agradecimentos

No âmbito da realização da presente dissertação e como forma de assinalar o encerramento deste ciclo de estudos, gostaria de expressar o meu profundo agradecimento às seguintes pessoas.

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão aos meus pais, pelo apoio incondicional ao longo dos cinco anos de percurso académico. O seu amor, dedicação e força foram essenciais para que pudesse continuar, superar os desafios e concluir esta etapa da minha vida.

Agradeço sinceramente ao Professor Armando Campos, orientador de estágio, por todo o tempo dedicado, pela orientação constante, pelas sugestões de melhoria e, sobretudo, pelo compromisso e disponibilidade demonstrados ao longo de todo o processo. O seu apoio foi determinante para a concretização deste trabalho.

Dirijo também um especial agradecimento ao Engenheiro Álvaro Gouveia, pela oportunidade de realizar o meu estágio na empresa CEI. Este período representou uma experiência extremamente enriquecedora, tanto a nível profissional como pessoal, e contribuiu de forma significativa para o meu desenvolvimento.

À equipa do Departamento de Engenharia e Produção da CEI - Gustavo, Bruno, Diogo, António, Nuno, Pedro, Marco e Miguel - agradeço pela colaboração, pela partilha de conhecimentos e pelo espírito de equipa com que sempre fui recebido. A vossa ajuda foi essencial no dia a dia e tornou esta experiência ainda mais gratificante.

Agradeço ainda à Maria Inês Nogueira, pela colaboração no desenvolvimento do capítulo relativo à gestão e otimização de materiais. O seu contributo foi fundamental para a qualidade e solidez do trabalho realizado nessa parte da dissertação.

Por fim, agradeço a todos os colaboradores da CEI que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o meu crescimento durante o estágio, demonstrando sempre disponibilidade e espírito de entreatajuda.

A todos, o meu sincero obrigado.



# Resumo

O presente trabalho teve como objetivo a otimização estrutural e energética de equipamentos CNC, com foco no modelo *StoneCUT Mill Master (SCMM)*, tendo em vista a redução da pegada de carbono e o aumento da eficiência durante o seu ciclo de vida. Através de uma abordagem multidisciplinar que integrou análise estrutural, avaliação ambiental e estudo energético, foram identificadas oportunidades significativas de melhoria no desempenho e sustentabilidade do equipamento.

A avaliação da integridade estrutural incluiu ensaios experimentais e simulações numéricas em três fases distintas, focando nos principais componentes móveis da estrutura. Paralelamente, foi realizada a quantificação da pegada de carbono com base numa análise *cradle-to-gate*, fornecendo dados concretos sobre o impacto ambiental associado à produção do equipamento. A análise energética permitiu identificar o consumo dos principais motores e sistemas auxiliares, identificando potenciais de otimização e estratégias para a regeneração de energia.

Com base nos dados obtidos, foi desenvolvido um modelo de otimização estrutural orientado à redução da massa dos componentes móveis, mantendo os níveis adequados de rigidez e desempenho dinâmico. O modelo incorporou variáveis de projeto críticas e recorreu a algoritmos híbridos para maximizar os ganhos energéticos e estruturais. A redução de massa alcançada traduziu-se numa melhoria das frequências naturais de vibração e numa redução estimada do consumo energético do sistema.

Por fim, o trabalho propôs ainda a criação de uma base de dados de materiais e o desenvolvimento de matrizes de seleção adaptadas aos processos produtivos da empresa, garantindo maior eficiência na escolha de materiais em futuros projetos. Os resultados obtidos demonstram o potencial da integração de critérios ambientais e estruturais na fase de desenvolvimento de produto, contribuindo para um fabrico mais sustentável e eficiente.

**Palavras-chave:** Otimização Estrutural, CNC, Eficiência Energética, Sustentabilidade, Pegada de Carbono, Simulação Numérica



# Abstract

This work aimed to optimize the structural and energy performance of a CNC equipment, the *StoneCUT Mill Master (SCMM)* model, with the goal of reducing its carbon footprint and improving efficiency throughout its life cycle. A multidisciplinary approach combining structural analysis, environmental assessment, and energy studies enabled the identification of significant improvement opportunities in the machine's performance and sustainability.

The structural integrity assessment included experimental testing and numerical simulations in three distinct phases, focusing on the main moving components of the machine. Additionally, a cradle-to-gate carbon footprint evaluation was conducted, providing concrete data on the environmental impact of equipment production. The energy analysis mapped the consumption of the main motors and auxiliary systems, highlighting optimization opportunities and strategies for energy recovery.

Based on the collected data, a structural optimization model was developed targeting mass reduction of the moving components while maintaining adequate stiffness and dynamic performance. The model integrated key design variables and applied hybrid optimization algorithms to maximize structural and energy efficiency. The resulting mass reduction led to improved natural frequencies of vibration and an estimated decrease in the system's energy consumption.

Finally, the work proposed the creation of a materials database and the development of tailored selection matrices aligned with the company's manufacturing processes, ensuring more efficient material choices in future projects. The results confirm the potential of integrating environmental and structural criteria during the product development stage, contributing to more sustainable and efficient manufacturing.

**KEYWORDS:** Structural Optimization, CNC, Energy Efficiency, Sustainability, Carbon Footprint, Numerical Simulation



# Índice

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Acrónimos e Símbolos.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e Motivação.....	1
1.2. Objetivos e Âmbito do Trabalho .....	3
1.3. Estratégia de Investigação.....	3
1.4. A Companhia de Equipamentos Industriais (CEI).....	5
1.5. Estrutura do Relatório .....	6
2. Revisão Bibliográfica .....	9
2.1. Sustentabilidade e Tipos de Economia .....	9
2.1.1. Dimensões da Sustentabilidade.....	9
2.1.2. Sustentabilidade na Indústria .....	11
2.1.3. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).....	12
2.1.4. Economia Linear.....	14
2.1.5. Economia Circular .....	15
2.2. Gases de Efeito de Estufa (GEE) .....	16
2.2.1. Definição de Gases de Efeito de Estufa .....	16
2.2.2. Principais Gases e as suas Fontes .....	17
2.2.3. Impactos Ambientais dos GEE e Políticas de Redução dos GEE .....	17
2.3. Análise de Ciclo de Vida (ACV) .....	19
2.3.1. Conceito e História.....	19
2.3.2. Metodologia de ACV .....	19
2.3.3. Aplicações da ACV – Casos de Estudo.....	22
2.3.4. Benefícios e Limitações da ACV .....	23
2.3.5. Ferramentas e <i>Softwares</i> para ACV .....	24
2.3.6. Normas e Padrões Internacionais para ACV .....	25
2.4. Pegada de Carbono (PC).....	25
2.4.1. Definição de Pegada de Carbono.....	25
2.4.2. Metodologias de Cálculo da Pegada de Carbono .....	26
2.4.3. A Pegada de Carbono na Indústria Metalomecânica.....	28
2.5. Equipamento em Estudo: <i>StoneCUT Mill Master (SCMM)</i> .....	29
2.5.1. Descrição do Equipamento .....	29
2.5.2. Ciclo de Vida e Pegada de Carbono de um Equipamento CNC: Etapas e Impactos Ambientais .....	30
2.5.3. Estratégias para Redução de Impactos Ambientais em Equipamentos CNC.....	31

3.	Avaliação de Sustentabilidade e Estado Operacional do Equipamento .....	33
3.1.	Avaliação da Pegada de Carbono do Equipamento .....	33
3.1.1.	Cálculo da Pegada de Carbono da SCMM .....	33
3.1.2.	Análise dos Dados Obtidos .....	40
3.2.	Estudo da Integridade Estrutural do Equipamento.....	41
3.2.1.	1ª Fase de Ensaios Experimentais.....	42
3.2.2.	2ª Fase de Ensaios Experimentais.....	52
3.2.3.	Principais Conclusões dos Ensaios Efetuados .....	66
3.3.	Eficiência Energética do Equipamento.....	67
3.3.1.	Monitorização do Consumo Energético do Equipamento.....	67
3.3.2.	Eficiência dos Motores e Movimentação dos Eixos.....	69
3.3.3.	Análise do Sistema de Ar Comprimido .....	74
3.3.4.	Desempenho Operacional e Limitações Práticas do Sistema de Corte com Disco Diamantado.....	75
3.4.	Gestão e Otimização de Materiais Utilizados .....	80
3.4.1.	Inventário de Materiais da Empresa.....	80
3.4.2.	Critérios de Seleção de Materiais em Função do Processo de Fabrico .....	81
3.4.3.	Análise e Caracterização das Propriedades de Materiais.....	83
3.4.4.	Desenvolvimento de Matrizes de Seleção por Processo .....	84
3.4.5.	Redução e Racionalização da Tabela de Materiais .....	85
4.	Otimização do Equipamento.....	87
4.1.	Estudo de Otimização da Estrutura da Cabeça do 5º Eixo .....	87
4.1.1.	Avaliação Inicial do Consumo Energético da Configuração de Referência.....	89
4.1.2.	Definição dos Parâmetros Geométricos de Funcionamento .....	91
4.1.3.	Análise Paramétrica e Simulações Numéricas .....	93
4.1.4.	Análise de Sensibilidade dos Parâmetros .....	93
4.1.5.	Metodologia de Superfícies de Resposta (RSM).....	95
4.1.6.	Aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA).....	96
4.1.7.	Construção da Função de Desempenho e Critérios de Otimização.....	97
4.1.8.	Modelo de Otimização.....	98
4.1.9.	Seleção, Validação e Resultados da Solução Otimizada .....	100
4.2.	Tecnologia de Proteção de <i>Spindles</i> em Colisões .....	102
4.2.1.	Fatores Operacionais e Técnicos Associados a Colisões em <i>Spindles</i> .....	103
4.2.2.	Arquitetura Funcional do Sistema MS <sup>3</sup> : Mecanismos de Desacoplamento e Monitorização .....	105
4.2.3.	Comportamento do Sistema de Proteção em Condições de Colisão .....	106
4.2.4.	Estratégias de Integração do MS <sup>3</sup> e Compatibilidade com <i>Spindles</i> Comerciais .....	108
5.	Conclusão.....	111

5.1. Conclusões finais.....	111
Referências.....	113
Declaração de Integridade .....	119
Apêndice A – 1ª Fase de Ensaios Experimentais.....	121
Apêndice B – 2ª Fase de Ensaios Experimentais.....	141
Apêndice C – Gestão e Otimização de Materiais .....	171
Apêndice D – Seleção de Parâmetros Estruturais.....	207
Apêndice E – Programação Desenvolvida em <i>Software Octave</i> .....	211
Apêndice F – Simulações da Otimização e Parâmetros Estruturais.....	217
Anexo A – Catálogos de Componentes Normalizados Utilizados ou Estudados .....	221



# Lista de Figuras

Figura 1 - Metas de Valores Limite de Aumento de Temperatura [2] .....	2
Figura 2 - Ciclo de Investigação da <i>Action Research</i> [4] .....	4
Figura 3 - Logótipo CEI [6] .....	5
Figura 4 - As Três Dimensões da Sustentabilidade [8] .....	9
Figura 5 - Quantidade de Materiais Necessários para Satisfazer a Procura Global [9] .....	10
Figura 6 - População com Acesso a Recursos Básicos em Portugal e Angola [10] .....	10
Figura 7 - Coeficiente de Gini Global, 2022 [11] .....	11
Figura 8 - Princípios de Aplicação dos 17 ODS [13] .....	12
Figura 9 - Objetivos Desenvolvimento Sustentável [13] .....	13
Figura 10 - Impacto Potencial dos ODS [15] .....	14
Figura 11 - Modelo de Economia Linear [17] .....	14
Figura 12 - Fases do Modelo de Economia Circular [19] .....	15
Figura 13 - Fases do Ciclo de Vida de um Produto [32] .....	20
Figura 14 - Abordagens de Estudo de ACV [26] .....	20
Figura 15 - Fases de uma ACV [32] .....	21
Figura 16 - Âmbitos de Emissões de GEE [26] .....	27
Figura 17 - Disponibilidade de Sucata em Várias Regiões do Mundo [43] .....	29
Figura 18 - SCMM .....	30
Figura 19 - Visão Geral do CAD do Equipamento .....	34
Figura 20 - Paralelo Lateral .....	35
Figura 21 - Ponte Equipamento .....	35
Figura 22 - Cabeça Eixo Z .....	35
Figura 23 - Suporte Cabeça Eixo Z .....	36
Figura 24 - Suporte Cabeça Eixo X .....	36
Figura 25 - Exemplo de Caixa Parcial .....	37
Figura 26 - Distribuição da PC .....	39
Figura 27 - Distribuição da PC segundo os Âmbitos de Emissão .....	40
Figura 28 - Equipamentos CNC de Porte Semelhante à SCMM .....	41
Figura 29 - Designação Técnica dos Componentes em Estudo .....	42
Figura 30 - <i>Setup</i> de Carga I .....	43
Figura 31 - <i>Setup</i> de Carga II .....	43
Figura 32 - <i>Setup</i> de Carga III .....	44
Figura 33 - Situação de Carga Inicial <i>Setup</i> I .....	44
Figura 34 - Relógio Comparador Instalado na Ponte (Deslocamento Vertical) .....	45
Figura 35 - Relógio Comparador Instalado no Cabeçote (Deslocamento Vertical) .....	45
Figura 36 - Relógio Comparador Instalado na Ponte (Deslocamento Transversal) .....	46
Figura 37 - Relógio Comparador Instalado no Cabeçote (Deslocamento Transversal) .....	47
Figura 38 - Ilustração da Situação de Carga Inicial <i>Setup</i> II no Montante Esquerdo .....	48
Figura 39 - Relógio Comparador Instalado no Montante Esquerdo .....	48
Figura 40 - Relógio Comparador Instalado no Montante Direito .....	49

Figura 41 - Ilustração da Situação de Carga Inicial <i>Setup</i> II no Montante Direito .....	49
Figura 42 - Elevação da Ponte .....	50
Figura 43 - Valores de Deslocamento Experimental vs Deslocamento Teórico (1ª Fase) .....	51
Figura 44 - Sistema de Carga 1 .....	53
Figura 45 - Sistema de Carga 2 .....	53
Figura 46 - Sistema de Carga 2 (cont.) .....	53
Figura 47 - Representação do Esquema de Ensaio Ideal .....	54
Figura 48 - Espaço dos Ensaio Experimentais.....	54
Figura 49 - Representação do <i>Setup</i> I e <i>Setup</i> II.....	55
Figura 50 - Representação do <i>Setup</i> I e <i>Setup</i> II (cont.).....	55
Figura 51 - Representação do <i>Setup</i> III .....	57
Figura 52 - Representação do <i>Setup</i> III (cont.).....	57
Figura 53 - Representação do <i>Setup</i> IV .....	57
Figura 54 - Representação do <i>Setup</i> V .....	58
Figura 55 - Representação do <i>Setup</i> VI .....	59
Figura 56 - Representação do <i>Setup</i> VI (cont.).....	59
Figura 57 - Representação do <i>Setup</i> VII .....	60
Figura 58 - Representação do <i>Setup</i> VII (cont.) .....	60
Figura 59 - Representação do <i>Setup</i> VIII .....	61
Figura 60 - Representação do <i>Setup</i> VIII .....	62
Figura 61 - Valores de Deslocamento Experimental vs Deslocamento Teórico (2ª Fase) .....	63
Figura 62 - Ilustração de um Servomotor [64] .....	69
Figura 63 - Sistema de <i>Inodrives</i> (à esquerda) vs Sistema de Resistências (à direita) .....	72
Figura 64 - Fluxo de Energia entre <i>InoDrives</i> .....	73
Figura 65 - Disco Diamantado .....	75
Figura 66 - Tipos de Discos Diamantados .....	76
Figura 67 - Processo de Fissuração de um Material Frágil.....	77
Figura 68 - Etapas de Desgaste dos Cristais de Diamante .....	79
Figura 69 - Matriz de Seleção do Processo de Quinagem para Aços Inoxidáveis.....	84
Figura 70 - Estrutura da Cabeça do 5º Eixo.....	87
Figura 71 - Exemplificação do Sistema de Acionamento [70].....	89
Figura 72 - Representação Cinemática do Sistema de Acionamento [70].....	89
Figura 73 - Representação Gráfica dos Coeficientes de Correlação .....	94
Figura 74 - Interface <i>Octave</i> .....	99
Figura 75 - Variação da Energia Consumida em Função do Aumento de Massa da Estrutura	102
Figura 76 - Causas de Avaria e Danos Comuns em <i>Spindles</i> [75], [76] .....	103
Figura 77 – Cadeia Clássica vs Cadeia Funcional de Colisões de <i>Spindles</i> [75], [76].....	104
Figura 78 - Comportamento dos Sistemas de Proteção de <i>Spindles</i> [75], [76] .....	105
Figura 79 - Sistema Mecânico de Proteção.....	106
Figura 80 - Comportamento Dinâmico e Estático do Equipamento .....	107
Figura 81 - Cone HSK-63 (à esquerda) e Cone ISO 50 (à direita) .....	108
Figura 82 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical da Ponte.....	121
Figura 83 - 1ª Medição (Variação de Carga 250 kg).....	122

Figura 84 - 2ª Medição (Variação de Carga 1000 kg).....	122
Figura 85 - 3ª Medição (Variação de Carga 500 kg).....	123
Figura 86 - Condição Inicial Medições Deslocamento Transversal da Ponte.....	123
Figura 87 - 1ª Medição (Variação de Carga 500 kg).....	124
Figura 88 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical do Cabeçote.....	124
Figura 89 - 1ª Medição (Variação de Carga 250 kg).....	125
Figura 90 - 2ª Medição (Variação de Carga 1000 kg).....	125
Figura 91 - 3ª Medição (Variação de Carga 500 kg).....	126
Figura 92 - Condição Inicial Medições Deslocamento Transversal do Cabeçote.....	126
Figura 93 - 1ª Medição (Variação de Carga 500 kg).....	127
Figura 94 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical do Montante Esquerdo.....	127
Figura 95 - 1ª Medição (Variação de Carga 500 kg).....	128
Figura 96 - 2ª Medição (Variação de Carga 1000 kg).....	128
Figura 97 - 3ª Medição (Variação de Carga 750 kg).....	129
Figura 98 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical do Montante Direito.....	129
Figura 99 - 1ª Medição (Variação de Carga 750 kg).....	130
Figura 100 - 2ª Medição (Variação de Carga 1000 kg).....	130
Figura 101 - 3ª Medição (Variação de Carga 500 kg).....	131
Figura 102 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical do Montante Esquerdo.....	131
Figura 103 - 4ª Medição (Peso Próprio da Ponte).....	132
Figura 104 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical do Montante Direito.....	132
Figura 105 - 4ª Medição (Peso Próprio da Ponte).....	133
Figura 106 - Cargas e Condições de Fronteira do <i>Setup I</i> .....	134
Figura 107 - Tensão de von Mises <i>Setup I</i> [MPa].....	135
Figura 108 – Deslocamento <i>Setup I</i> [mm].....	135
Figura 109 - Fator de Segurança <i>Setup I</i> .....	135
Figura 110 - Cargas e Condições de Fronteira do <i>Setup II</i> .....	136
Figura 111 - Tensão de von Mises <i>Setup II</i> [MPa].....	137
Figura 112 - Deslocamento <i>Setup II</i> [mm].....	137
Figura 113 - Fator de Segurança <i>Setup II</i> .....	138
Figura 114 - Tensão de von Mises <i>Setup III</i> [MPa].....	138
Figura 115 - Deslocamento <i>Setup III</i> [mm].....	139
Figura 116 - Fator de Segurança <i>Setup III</i> .....	139
Figura 117 - Tensão de von Mises <i>Setup I</i> [MPa].....	142
Figura 118 - Deslocamento <i>Setup I</i> [mm].....	142
Figura 119 - Fator de Segurança <i>Setup I</i> .....	143
Figura 120 - Tensão de von Mises <i>Setup II</i> [MPa].....	143
Figura 121 - Deslocamento <i>Setup II</i> [mm].....	144
Figura 122 - Fator de Segurança <i>Setup II</i> .....	144
Figura 123 - Tensão de von Mises <i>Setup III</i> [MPa].....	145
Figura 124 - Deslocamento <i>Setup III</i> [mm].....	145
Figura 125 - Fator de Segurança <i>Setup III</i> .....	146
Figura 126 - Tensão de von Mises <i>Setup V</i> [MPa].....	146

Figura 127 - Deslocamento <i>Setup V</i> [mm] .....	147
Figura 128 - Fator de Segurança <i>Setup V</i> .....	147
Figura 129 - Tensão de von Mises <i>Setup VI</i> [MPa] .....	148
Figura 130 - Deslocamento <i>Setup VI</i> [mm] .....	148
Figura 131 - Fator de Segurança <i>Setup VI</i> .....	149
Figura 132 - Tensão de von Mises <i>Setup VII</i> [MPa] .....	149
Figura 133 - Deslocamento <i>Setup VII</i> [mm] .....	150
Figura 134 - Fator de Segurança <i>Setup VII</i> .....	150
Figura 135 - Tensão de von Mises <i>Setup VIII</i> [MPa] .....	151
Figura 136 - Deslocamento <i>Setup VIII</i> [mm] .....	151
Figura 137 - Fator de Segurança <i>Setup VIII</i> .....	152
Figura 138 - Componente MCO...438648_12_AF1 (Espessura - $x_1$ ) .....	207
Figura 139 - Componente MCO...438648_16_AF2 (Espessura - $x_2$ ) .....	207
Figura 140 - Componente MCO...438648_17_AF0 (Espessura - $x_3$ ) .....	208
Figura 141 - Componente MCO...438648_9_AF1 (Espessura - $x_4$ ) .....	208
Figura 142 - Componentes MC...438648_8_AF1 e MC...438648_7_AF1 (Espessura - $x_5$ ) .....	208
Figura 143 - Componente MCO...438648_12_AF1 (Comprimento Rasgo Interno - $x_6$ ) .....	209
Figura 144 - Componente MCO...438648_12_AF1 (Comprimento Rasgos - $x_7$ ) .....	209
Figura 145 - Componente MCO...438648_16_AF2 (Comprimento Rasgo Interior - $x_8$ ) .....	209
Figura 146 - 1ª Frequência Natural de Vibração (Estrutura Original) .....	217
Figura 147 - 1ª Frequência Natural de Vibração (Estrutura Otimizada) .....	218
Figura 148 - Tensão de von Mises Otimização [MPa] .....	218
Figura 149 - Deslocamento Otimização [mm] .....	219
Figura 150 - Fator de Segurança Otimização .....	219

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Diferenças entre <i>Action Research</i> e Investigação Tradicional [5] .....	4
Tabela 2 - Estratégias de Sustentabilidade Empresarial [12].....	12
Tabela 3 - Desvantagens Modelo Linear [18].....	14
Tabela 4 - GEE e o seu PAG [26].....	17
Tabela 5 - Impactos Ambientais [26] .....	17
Tabela 6 - Protocolos e Acordos para combater as Alterações Climáticas.....	18
Tabela 7 - Ferramentas e <i>Softwares</i> para ACV.....	24
Tabela 8 - Normas e Padrões para ACV .....	25
Tabela 9 - Características do Equipamento em Estudo [44].....	30
Tabela 10 - Processos de Fabrico .....	37
Tabela 11 - Fatores de Emissão.....	38
Tabela 12 - Exemplo de Recolha de Dados dos Subconjuntos.....	38
Tabela 13 - Dados do Transporte das Estruturas Subcontratadas.....	38
Tabela 14 - PC das Categorias .....	39
Tabela 15 - PC em Função dos Âmbitos de Emissões .....	39
Tabela 16 - Estimativa da PC de Equipamentos CNC.....	41
Tabela 17 - Leituras de Deslocamento Vertical do <i>Setup</i> I .....	46
Tabela 18 - Leituras de Deslocamento Transversal do <i>Setup</i> I .....	47
Tabela 19 - Leituras de Deslocamento Vertical do <i>Setup</i> II (Montante Esquerdo).....	49
Tabela 20 - Leituras de Deslocamento Vertical do <i>Setup</i> II (Montante Direito).....	50
Tabela 21 - Leituras de Deslocamento Vertical do <i>Setup</i> III .....	50
Tabela 22 - Comparação de Resultados 1ª Fase .....	51
Tabela 23 - Deslocamentos Registados do <i>Setup</i> I e <i>Setup</i> II.....	56
Tabela 24 - Valores de Amperagem do Motor do Eixo A para o <i>Setup</i> I.....	56
Tabela 25 - Deslocamentos Registados dos <i>Setup</i> III, <i>Setup</i> IV e <i>Setup</i> V.....	58
Tabela 26 - Deslocamentos Registados do <i>Setup</i> VI .....	59
Tabela 27 - Deslocamentos Registados do <i>Setup</i> VII .....	61
Tabela 28 - Deformações Registadas do <i>Setup</i> VIII.....	62
Tabela 29 - Comparação de Resultados 2ª Fase .....	63
Tabela 30 - Consumo Energético dos Eixos em Vazio.....	68
Tabela 31 - Emissões Associadas à Movimentação dos Eixos em Vazio.....	68
Tabela 32 - Características dos Conjuntos de Motorreductores dos Eixos do Equipamento .....	71
Tabela 33 - Arquiteturas de Gestão de Energia [67].....	73
Tabela 34 - Dados Registados do Consumo de Ar Comprimido .....	74
Tabela 35 - Tipos de Discos Diamantados [68] .....	77
Tabela 36 - Parâmetros do Processo de Corte com Disco Diamantado [68] .....	78
Tabela 37 - Espessuras de Corte para Diferentes Diâmetros de Disco .....	79
Tabela 38 - Listagem de Materiais CEI .....	80
Tabela 39 - Critérios de Seleção para Maquinação.....	81
Tabela 40 - Critérios de Seleção para Corte por Jato de Água.....	82

Tabela 41 - Critérios de Seleção para Quinagem .....	82
Tabela 42 - Critérios de Seleção para Soldadura (Aço ao Carbono) .....	82
Tabela 43 - Critérios de Seleção para Soldadura (Aço Inoxidável).....	82
Tabela 44 - Critérios de Seleção para Soldadura (Alumínio).....	83
Tabela 45 - Propriedades em Análise.....	83
Tabela 46 - Parâmetros e Resultado da Avaliação de Consumo de Energia do Eixo Z .....	90
Tabela 47 - Iterações com Parâmetros Geométricos Variados.....	91
Tabela 48 - Massa e Energia Consumida por Iteração .....	92
Tabela 49 - Resultados da Análise Paramétrica .....	93
Tabela 50 - Coeficientes de Correlação dos Parâmetros com as Variáveis de Desempenho ....	94
Tabela 51 - Componentes Principais (PC) .....	96
Tabela 52 - Coeficientes de Carga dos Componentes.....	97
Tabela 53 - Comparação Solução Original com a Otimizada .....	100
Tabela 54 - Diferentes Tipos de Prevenção de Colisão [75], [76] .....	104
Tabela 55 - Limitações das Prevenções Identificadas .....	104
Tabela 56 - Especificações Técnicas do Sistema de Proteção MS <sup>3</sup> .....	108
Tabela 57 - Parâmetros de Malha da 1ª Fase .....	133
Tabela 58 - <i>Mesh Control</i> aplicado no <i>Setup I</i> .....	134
Tabela 59 - Componentes Removidos na Análise ao <i>Setup I</i> .....	134
Tabela 60 - Componentes Removidos na Análise ao <i>Setup II</i> .....	136
Tabela 61 - Componentes Removidos na Análise ao <i>Setup III</i> .....	138
Tabela 62 - Parâmetros de Malha da 2ª Fase .....	141
Tabela 63 - Componentes Removidos na Análise ao <i>Setups</i> da 2ª Fase.....	141

# Acrónimos e Símbolos

## Lista de Acrónimos

ACV	Análise de Ciclo de Vida
AMS	<i>Acquisition and Monitoring System</i>
AR6	<i>Sixth Assessment Report</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CEI	Companhia de Equipamentos Industriais
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DPEST	Dissertação/Projeto/Estágio
EUA	Estados Unidos da América
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GHG	<i>Greenhouse Gas</i>
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MS <sup>3</sup>	<i>Motor Spindle Safety System</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PC	Pegada de Carbono
PCA	Análise de Componentes Principais
PSO	Otimização por Enxame de Partículas
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RSM	Metodologia de Superfícies de Resposta
SCMM	<i>StoneCUT Mill Master</i>
SREA	Sistema de Recuperação de Energia com Armazenadores de Energia

## Lista de Símbolos

<i>DA</i>	Dado de Atividade	kg, kWh, m <sup>3</sup> , ...
<i>FE</i>	Fator de Emissão	kgCO <sub>2</sub> e/(kg, kWh, m <sup>3</sup> , ...)
<i>PC</i>	Pegada de Carbono	kgCO <sub>2</sub> e



# 1. Introdução

Este capítulo introduz o tema da dissertação, destacando a importância da sustentabilidade na indústria e a necessidade de reduzir os impactos ambientais. Apresentam-se os objetivos do trabalho, focados na análise e otimização do equipamento CNC *StoneCUT Mill Master* (SCMM), seguidos das opções metodológicas utilizadas na realização do trabalho. Segue-se um breve enquadramento da empresa CEI Solutions e a estrutura do trabalho.

## 1.1. Enquadramento e Motivação

A crescente degradação ambiental causada pelas atividades industriais e consumo de recursos naturais, tem levantado questões relativas à sustentabilidade do planeta e às alterações climáticas. A exploração excessiva destes recursos naturais, o aumento das emissões de gases de efeito estufa e o inadequado tratamento de fim de vida de resíduos são alguns dos impactos ambientais que ameaçam a qualidade de vida e a biodiversidade do planeta. Neste contexto, a redução dos impactos ambientais na indústria e no dia a dia torna-se uma necessidade urgente, à medida que o modelo de desenvolvimento atual mostra-se insustentável a longo prazo [1].

Segundo o último relatório do *IPCC Sixth Assessment Report (AR6)*, as atividades humanas provocaram um aumento da temperatura média da superfície global em cerca de 1,1°C relativamente aos níveis de temperatura de 1850 a 1900, no período de 2011 a 2020. O fator crítico deste aumento verifica-se uma vez que a temperatura média da superfície global aumentou mais rapidamente desde 1970 do que em qualquer outro período de 50 anos nos últimos 2000 anos. Relativamente ao nível médio do mar, este aumentou cerca de 0,20 m entre 1901 e 2018 sendo que a taxa média de elevação variou entre determinados períodos. Entre 1901 e 1971 aumentou cerca de 1,3 mm ao ano, entre 1971 e 2006 aumentou cerca de 1,9 mm ao ano e entre 2006 e 2018 aumentando ainda mais para cerca de 3,7 mm ao ano. A influência humana provocou desde 1950 um aumento da probabilidade de eventos climáticos extremos, incluindo um aumento de secas e ondas de calor, o que se transmite também num aumento do nível médio do nível do mar [2].

A continuidade das emissões de gases de efeito estufa resultará num aumento do aquecimento global, com uma estimativa de que o limite de 1,5°C será atingido em breve nos cenários e trajetórias modelados. Cada incremento de aquecimento intensifica os riscos, o que torna essencial reduzir rapidamente as emissões para desacelerar o aquecimento em poucas décadas. Alguns impactos futuros são inevitáveis ou irreversíveis, mas podem ser limitados com reduções profundas, rápidas e sustentadas das emissões globais. A mitigação do aquecimento

## Introdução

causado pelo homem exige emissões líquidas de CO<sub>2</sub> iguais a zero, sendo os níveis de emissões nesta década cruciais para limitar o aquecimento a 1,5°C ou 2°C (Figura 1). No entanto, as emissões projetadas da infraestrutura de combustíveis fósseis existente superam o orçamento de carbono remanescente para limitar o aquecimento a 1,5°C, a menos que sejam implementadas medidas de redução adicionais [2].

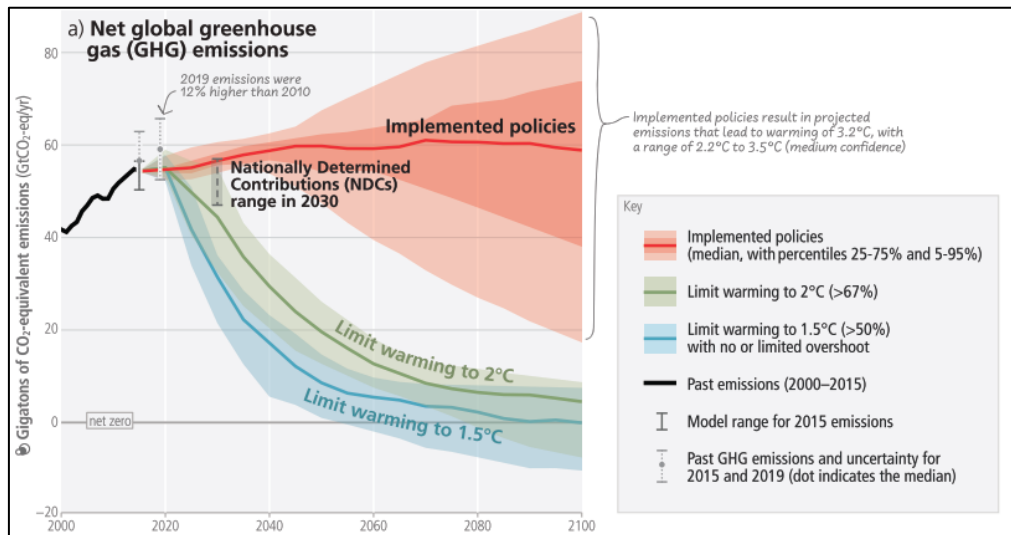


Figura 1 - Metas de Valores Limite de Aumento de Temperatura [2]

A procura por um equilíbrio entre crescimento económico e preservação ambiental é, portanto, um dos grandes desafios da atualidade. A indústria, como um dos principais setores responsáveis pela geração de impactos, deve adotar uma postura proativa na procura por soluções inovadoras que promovam um desenvolvimento mais responsável e sustentável. Existem diversas ferramentas eficazes para analisar os impactos ambientais de processos industriais, permitindo uma avaliação detalhada das suas consequências para o meio ambiente. Entre elas, destaca-se a Análise de Ciclo de Vida (ACV), que considera todo o ciclo de um produto ou serviço, desde a extração de matérias-primas até à gestão dos resíduos produzidos. Outra ferramenta importante é a Pegada de Carbono (PC), que pode medir a quantidade total de gases de efeito estufa (GEE) emitidos direta ou indiretamente por um processo ou atividade [3].

A transição para alternativas mais sustentáveis, como o uso de fontes de energia renovável, a implementação de processos de produção mais eficientes e o incentivo à economia circular, é fundamental para garantir a preservação dos recursos naturais e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Além disso, práticas sustentáveis não só contribuem para a proteção ambiental, como também oferecem benefícios económicos a longo prazo, como a redução de custos de operação e o aumento da competitividade [3].

## 1.2. Objetivos e Âmbito do Trabalho

O presente trabalho foi desenvolvido na empresa CEI – Companhia de Equipamentos Industriais sediada em São João da Madeira, no âmbito da Unidade Curricular de DPEST, de modo à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no ramo de Construções Mecânicas.

Este trabalho tem como principal objetivo o estudo do equipamento CNC **SCMM**, com foco na sustentabilidade do produto, por meio de um cálculo inicial da PC. A análise será realizada utilizando a metodologia *cradle-to-gate*, permitindo identificar os impactos ambientais do equipamento. Com base nos resultados obtidos, serão implementadas melhorias que visam a redução da PC, o aumento da eficiência do equipamento e a resolução de problemas operacionais.

Entre as melhorias previstas, destaca-se a diminuição do peso de componentes estruturais para aumentar a eficiência energética e diminuir a PC, a aceleração dos eixos para aprimorar o desempenho e a solução de problemas com a colisão de ferramentas de trabalho do equipamento. Estas ações têm como finalidade não apenas reduzir os impactos ambientais, mas também elevar a eficiência operacional e prolongar a vida útil do equipamento.

## 1.3. Estratégia de Investigação

Este subcapítulo apresenta a metodologia utilizada ao longo do desenvolvimento da presente investigação, a qual se enquadra na abordagem de **Action Research**. Esta escolha metodológica justifica-se pela natureza aplicada do trabalho, desenvolvido em contexto real de produção, com o envolvimento direto do investigador no diagnóstico de problemas, recolha e análise de dados, e implementação de propostas de melhoria com a colaboração ativa dos vários departamentos da empresa. A metodologia adotada permite responder aos objetivos definidos para a otimização estrutural, energética e ambiental do equipamento CNC **SCMM**, promovendo simultaneamente a melhoria contínua da prática empresarial e a produção de conhecimento técnico-científico.

A **Action Research** caracteriza-se por ser um método de estudo que procura simultaneamente investigar e resolver um determinado problema através de ciclos iterativos de **planeamento, ação, observação e reflexão**, sendo particularmente adequada a contextos industriais onde se pretende intervir, testar e validar soluções em ambiente real [4], [5].

- 1) **Planeamento**: Identificação do problema e elaboração de um plano de ação;
- 2) **Ação**: Implementação das mudanças propostas;
- 3) **Observação**: Recolha de dados e monitorização dos efeitos das ações;
- 4) **Reflexão**: Análise dos resultados e reflexão sobre o processo, levando a ajustes e novos ciclos.

Este ciclo é frequentemente representado como uma espiral, indicando a natureza contínua e evolutiva do processo (Figura 2).

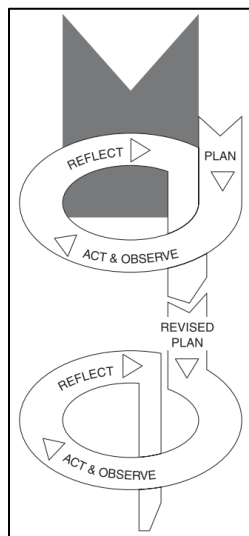


Figura 2 - Ciclo de Investigação da *Action Research* [4]

A **Action Research** tem como propósito central promover melhorias significativas nas práticas existentes, por meio da intervenção direta em contextos reais. Os seus principais objetivos incluem a resolução de problemas reais no ambiente de trabalho, a otimização contínua de métodos e processos, o envolvimento ativo dos participantes nas decisões e mudanças, e a promoção de uma cultura de reflexão e aprendizagem constante. Esta abordagem valoriza a colaboração e integra teoria e prática em ciclos sucessivos de investigação, ação e aperfeiçoamento. Na Tabela 1 são comparadas as principais características de um estudo seguindo uma investigação focada na ação com uma investigação tradicional.

Tabela 1 - Diferenças entre *Action Research* e Investigação Tradicional [5]

	<b>Action Research</b>	<b>Investigação Tradicional</b>
<b>Objetivo</b>	Resolver problemas imediatos	Contribuir para o conhecimento teórico
<b>Abordagem</b>	Interativa e prática	Analítica e teórica
<b>Participação</b>	Envolvimento ativo dos participantes	Observação externa
<b>Resultados</b>	Aplicáveis e contextuais	Generalizáveis e abstratos
<b>Flexibilidade</b>	Alta, adaptando-se ao contexto	Estrutura rígida e pré-definida

No presente trabalho:

- O **problema** identificado prendeu-se com a necessidade de tornar o equipamento CNC mais eficiente do ponto de vista estrutural e ambiental;
- A **ação** incluiu a realização de ensaios, recolha de dados energéticos, análise de materiais e implementação de melhorias;
- A **observação** deu-se com o acompanhamento dos resultados e validação experimental;
- A **reflexão** foi feita em colaboração com os departamentos de engenharia e produção, ajustando decisões e estratégias.

Este processo repetiu-se em várias fases do projeto, promovendo uma evolução sustentada das soluções propostas.

## 1.4. A Companhia de Equipamentos Industriais (CEI)

Fundada em 1995 em São João da Madeira, Portugal, a Companhia de Equipamentos Industriais (CEI) posiciona-se como uma empresa de tecnologia, pioneira na criação de soluções inteligentes para corte de materiais. Inicialmente dedicada ao desenvolvimento de tecnologias de corte para peles na indústria do calçado, a CEI expandiu rapidamente as suas operações, consolidando-se em 1998 no corte por jato de água, que se tornou uma inovação chave nos setores de calçado e couro [6].

Em 1997, a ZIPOR SA iniciou a internacionalização das soluções da CEI, fortalecendo a sua presença a nível global. Posteriormente, em 2001, a INOCAM Lda. passou a desenvolver *hardware* e *software* complementares, aprimorando as operações da CEI em digitalização e controlo de máquinas CNC. Com a entrada no mercado de pedras ornamentais em 2003, a empresa trouxe tecnologias avançadas para o corte e processamento, introduzindo inovação no tratamento e personalização do corte de pedras [6].

Atualmente, a CEI integra soluções baseadas na Indústria 4.0, destacando-se pela utilização de inteligência artificial (IA) em processos industriais. As tecnologias utilizadas para o setor de pedras incluem sistemas que detetam perfis e defeitos em lajes, otimizam o corte com precisão e realizam tratamentos como polimento e aplicação de resinas de forma automatizada e inteligente. Equipamentos como máquinas que combinam jato de água, disco de diamante e ferramentas de maquinação, possibilitam a produção de produtos personalizados e a identificação de fissuras com a aplicação de resina robotizada sobre as áreas identificadas [6].

A organização também investiu na criação de linhas de produção para outras indústrias, com equipamentos flexíveis que realizam operações combinadas de flamejamento, texturização e cortes variados, adaptando-se às necessidades específicas de cada setor. Com cerca de 2500 equipamentos produzidos, a CEI oferece soluções que agregam inteligência artificial e automação para otimizar processos industriais complexos [6].



Figura 3 - Logótipo CEI [6]

## 1.5. Estrutura do Relatório

O presente relatório está organizado em cinco capítulos principais, complementados por apêndices, anexos e elementos auxiliares como listas de figuras e tabelas e a declaração de integridade. A estrutura adotada visa acompanhar de forma lógica e progressiva o desenvolvimento do trabalho, desde a contextualização inicial até às conclusões finais.

### Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo inicial visa apresentar o contexto do trabalho, a sua motivação e os objetivos a alcançar, bem como a estratégia de investigação seguida. Além disso, é feito um enquadramento da empresa onde o estágio foi realizado e é descrita a organização do relatório. Está dividido nas seguintes secções:

- **1.1. Enquadramento e Motivação:** Apresenta a problemática abordada, a sua relevância no contexto atual da sustentabilidade industrial e os motivos que conduziram à realização deste trabalho;
- **1.2. Objetivos e Âmbito do Trabalho:** Define os objetivos principais e específicos do projeto, bem como os limites do seu âmbito de aplicação;
- **1.3. Estratégia de Investigação:** Descreve a metodologia e as abordagens técnicas utilizadas na recolha e análise dos dados, bem como os métodos de investigação adotados;
- **1.4. A Companhia de Equipamentos Industriais (CEI):** Introduce a empresa de acolhimento, o seu setor de atuação, principais atividades e relevância para o projeto;
- **1.5. Estrutura do Relatório:** Apresenta a organização do documento, descrevendo de forma sistemática os capítulos que o compõem (a presente secção).

### Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são revistos os conceitos teóricos essenciais ao desenvolvimento do trabalho. A análise contempla a sustentabilidade na indústria, a economia circular, os gases de efeito de estufa, a análise do ciclo de vida e a pegada de carbono. Este capítulo está dividido em:

- **2.1. Sustentabilidade e Tipos de Economia:** Aborda as diferentes dimensões da sustentabilidade, bem como os modelos económicos linear e circular. Inclui ainda a referência aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS);
- **2.2. Gases de Efeito de Estufa (GEE):** Define os GEE, identifica os principais tipos e as suas fontes, e descreve os impactos ambientais associados, bem como as políticas de mitigação existentes;
- **2.3. Análise de Ciclo de Vida (ACV):** Apresenta o conceito, evolução e metodologia da ACV, as suas aplicações práticas, benefícios e limitações, ferramentas utilizadas e principais normas internacionais;
- **2.4. Pegada de Carbono (PC):** Introduce o conceito de pegada de carbono, métodos de cálculo e a sua aplicação no setor industrial, com foco na indústria metalomecânica;
- **2.5. Equipamento em Estudo: StoneCUT Mill Master (SCMM):** Descreve o equipamento alvo de análise, o seu funcionamento, ciclo de vida e impactos ambientais associados.

### Capítulo 3 – Avaliação de Sustentabilidade e Estado Operacional do Equipamento

Este capítulo apresenta a avaliação técnica e ambiental do equipamento em estudo, com foco na pegada de carbono, integridade estrutural e eficiência energética. Divide-se nas seguintes secções:

- **3.1. Avaliação da Pegada de Carbono do Equipamento:** Apresenta o cálculo da pegada de carbono associada ao ciclo de vida do SCMM, com base em dados reais e métodos reconhecidos de Análise do Ciclo de Vida (ACV);
- **3.2. Estudo da Integridade Estrutural do Equipamento:** Descreve os ensaios experimentais realizados ao equipamento para avaliar o comportamento estrutural do mesmo em condições estáticas;
- **3.3. Eficiência Energética do Equipamento:** Avalia o consumo energético do equipamento nas diferentes fases de operação;
- **3.4. Gestão e Otimização de Materiais Utilizados:** Apresenta o levantamento e análise dos materiais aplicados na produção de equipamentos na empresa, com foco nos metais utilizados em estruturas e componentes funcionais.

### Capítulo 4 – Otimização do Equipamento

Este capítulo foca-se na aplicação de ferramentas analíticas e computacionais para otimização estrutural e funcional do equipamento, com especial destaque para a estrutura da cabeça do 5º eixo e o sistema de proteção de colisões de *Spindles*.

- **4.1. Estudo de Otimização da Estrutura da Cabeça do 5º Eixo:** Análise e aperfeiçoamento estrutural com recurso a simulações, estudos paramétricos e técnicas de otimização avançadas, visando melhorar o desempenho e a eficiência do componente;
- **4.2. Tecnologia de Proteção de *Spindles* em Colisões:** Analisa os fatores de risco, descreve a arquitetura do sistema MS<sup>3</sup> e os testes realizados para validação funcional;

### Capítulo 5 – Conclusão

Este capítulo final sintetiza os resultados obtidos ao longo do trabalho, reflete sobre as limitações encontradas e propõe linhas de investigação futura.

## Introdução

## 2. Revisão Bibliográfica

Nos subcapítulos seguintes, apresenta-se a revisão bibliográfica com foco na Sustentabilidade, Gases de Efeito de Estufa (GEE), Análise do Ciclo de Vida (ACV) e Pegada de Carbono (PC), culminando com a contextualização e análise do equipamento CNC em estudo. Esta revisão tem como objetivo fundamentar teoricamente as decisões tomadas ao longo do trabalho, bem como sustentar a metodologia adotada para a otimização ambiental e estrutural do equipamento.

### 2.1. Sustentabilidade e Tipos de Economia

Os próximos subcapítulos abordam os fundamentos e valores essenciais da sustentabilidade, comparando os conceitos de economia linear e circular. Além disso, são apresentados os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que orientam ações globais em prol de um futuro mais equilibrado e sustentável.

#### 2.1.1. Dimensões da Sustentabilidade

A sustentabilidade é definida como “a capacidade de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer os recursos e a capacidade das futuras gerações de satisfazerem as suas próprias necessidades”. O desenvolvimento sustentável é necessário tanto para assegurar a qualidade de vida das atuais e futuras gerações, como para a sobrevivência das organizações de modo que estas sejam competitivas a nível empresarial e que possam prosperar e crescer a curto, médio e longo prazo. Os impactos das atividades humanas no ecossistema, o consumo excessivo de recursos e a falta de ética e formação de gestão corporativa são os principais entraves a um modelo de desenvolvimento sustentável [7]. A Figura 4 apresenta as três dimensões da sustentabilidade.

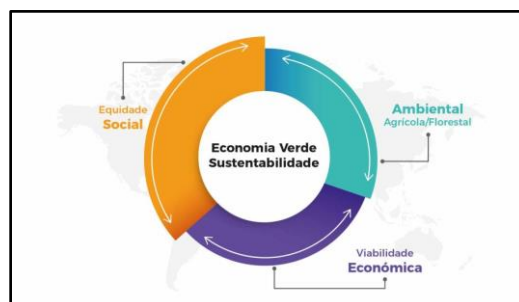


Figura 4 - As Três Dimensões da Sustentabilidade [8]

### Dimensão Ambiental

Esta dimensão refere a necessidade de desenvolver e praticar estratégias que procuram conservar os recursos naturais, especialmente aqueles que não são renováveis e cruciais ao suporte das atividades humanas. As estratégias adotadas devem ir de encontro à redução dos impactos negativos no ar, água e solo, proteger a biodiversidade, melhorar a qualidade ambiental e incentivar à formação da sociedade para um consumo responsável e sustentável [7]. A Figura 5 apresenta a evolução na quantidade de materiais necessários para satisfazer a procura global, no período de 2000 a 2022, sendo visível um aumento da necessidade de materiais a nível global [9].

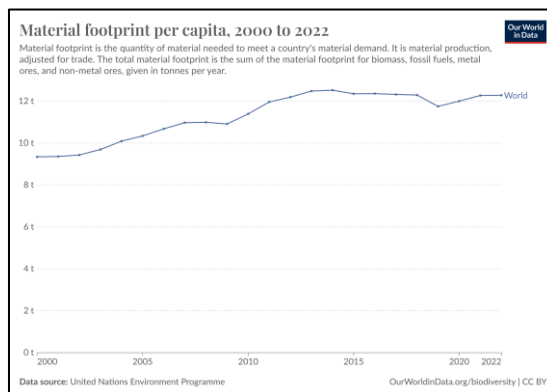


Figura 5 - Quantidade de Materiais Necessários para Satisfazer a Procura Global [9]

### Dimensão Social

A dimensão social engloba um conjunto de direitos humanos e objetivos fundamentais de igualdade e respeito onde sem eles as dimensões ambiental e económica não têm base e apoio para se desenvolverem. As sociedades modernas devem procurar a inclusão social e a distribuição equitativa de recursos como foco na erradicação da pobreza. A dimensão social nas empresas refere-se ao impacto das suas atividades nas pessoas, tanto internamente, com foco no bem-estar, saúde e segurança dos colaboradores, quanto externamente, abrangendo comunidades e consumidores [7]. A Figura 6 avalia a percentagem da população de dois países ao acesso a recursos básicos. Verifica-se que em Portugal, um país da União Europeia desenvolvido, o acesso a estes recursos é de praticamente 100%, coisa que não se verifica no caso de Angola, um país subdesenvolvido, onde o acesso chega a apenas 48% da população.

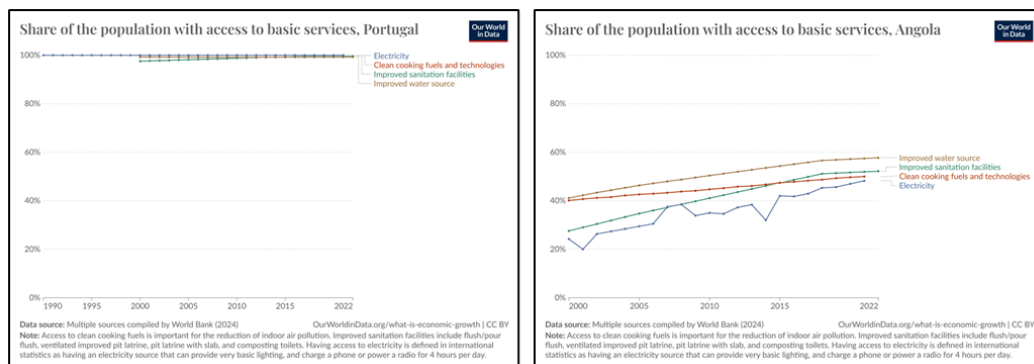


Figura 6 - População com Acesso a Recursos Básicos em Portugal e Angola [10]

### Dimensão Económica

Por fim, a dimensão económica procura fortalecer a prosperidade em todos os setores da sociedade bem como a eficiência da atividade económica. As organizações vivem da geração de riqueza e é necessário viabilizar ações para sustentar essa riqueza ao longo do tempo de modo a promover empregos justos para a comunidade envolvente [7]. A Figura 7 apresenta a distribuição global do Coeficiente de Gini, este mede a desigualdade numa escala de 0 a 1, dos rendimentos antes de impostos e benefícios. É possível verificar que este coeficiente se mostra aumentado em zonas de África, da América Central e América do Sul, áreas do planeta com países em situações mais subdesenvolvidas.

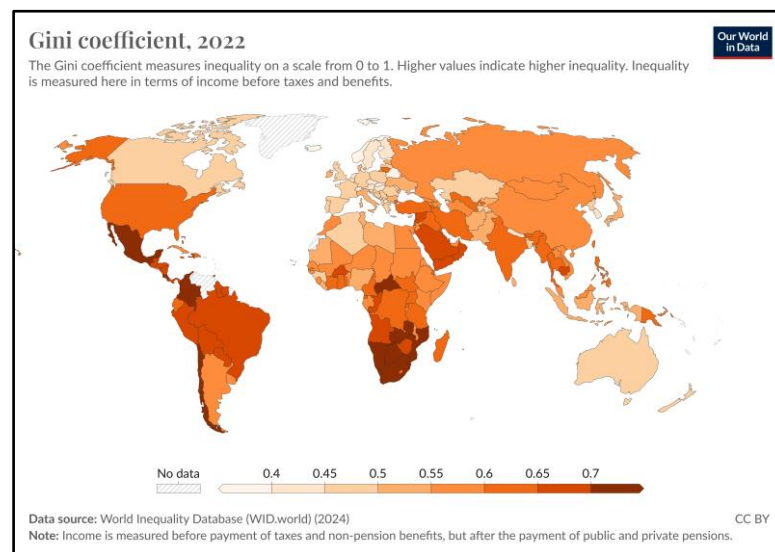


Figura 7 - Coeficiente de Gini Global, 2022 [11]

#### 2.1.2. Sustentabilidade na Indústria

O desenvolvimento sustentável na indústria é essencial para garantir que o crescimento económico de uma organização seja alcançado de maneira responsável, minimizando os impactos negativos no meio ambiente e promovendo benefícios sociais para os seus *stakeholders*. No contexto empresarial, o desenvolvimento sustentável era inicialmente visto como um custo financeiro para a organização, dada a necessidade de introduzir novos requisitos legais onde estes não trariam retorno financeiro a curto prazo. Com a crescente implementação do conceito verificou-se que era possível criar valor económico e novas oportunidades de negócio, além de fortalecer a reputação corporativa e fortalecer a eficiência dos processos de produção. Hoje, o desenvolvimento sustentável é visto como um diferencial competitivo, permitindo às organizações não apenas responder às regulações impostas, mas também conquistar a preferência de consumidores e investidores que valorizam práticas responsáveis e éticas [7]. Na Tabela 2 estão presentes algumas estratégias e ações que podem contribuir para uma melhoria no desenvolvimento sustentável.

Tabela 2 - Estratégias de Sustentabilidade Empresarial [12]

Ações para Promover a Sustentabilidade na Empresa	Descrição
<b>Criar Transparência nos Processos</b>	Tornar os processos produtivos claros e acessíveis para colaboradores, clientes e parceiros
<b>Adotar uma Documentação Eletrônica</b>	Reduzir o uso de papel e migrar para sistemas digitais para armazenar e compartilhar dados
<b>Conferir a Infraestrutura</b>	Garantir que as instalações e os equipamentos estejam otimizados para eficiência energética
<b>Gerir os Resíduos</b>	Implementar práticas de reciclagem e garantir a adequada destinação de resíduos
<b>Ter Fornecedores Sustentáveis</b>	Priorizar fornecedores que adotem práticas ambientais e sociais responsáveis
<b>Diminuir o Consumo de Descartáveis</b>	Substituir itens descartáveis por alternativas reutilizáveis ou biodegradáveis
<b>Incentivar a Redução do Consumo de Energia e Água</b>	Adotar tecnologias e práticas que promovam o uso eficiente de recursos
<b>Estimular o uso de Transporte Coletivo e Alternativo</b>	Promover boleias, transporte público e uso de meios de transporte não poluentes entre os colaboradores
<b>Analisar os Dados de Consumo</b>	Monitorizar e avaliar o consumo de energia, água e outros recursos para identificar melhorias
<b>Implementar Políticas de Conscientização</b>	Criar programas e campanhas que eduquem sobre a importância da sustentabilidade
<b>Treinar as Lideranças</b>	Capacitar gestores para que liderem pelo exemplo e promovam práticas sustentáveis
<b>Envolver a Equipa</b>	Incentivar a participação ativa de todos os colaboradores nas iniciativas de sustentabilidade

### 2.1.3. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) foram estabelecidos como prioridades globais da Agenda 2030, que visam promover as melhores práticas económicas, sociais e ambientais para o futuro do nosso planeta. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável é constituída por 17 ODS aprovados pelos 193 países das Nações Unidas em 2015, cujo propósito é priorizar as estratégias necessárias ao desenvolvimento sustentável global para 2030. Na Figura 8 são apresentados os cinco princípios em que os ODS atuam [13].



Figura 8 - Princípios de Aplicação dos 17 ODS [13]

Os 17 ODS em conjunto com as metas definidas orientam as organizações, comunidades e governos para a necessidade de desenvolver estratégias de acordo com estes cinco princípios, de modo a construir um futuro sem pobreza, com melhores condições de saúde e educação, com menos desigualdades, com capacidade de crescimento económico e preservando o ecossistema [13]. Na Figura 9 são visíveis os 17 ODS da Agenda 2030.



Figura 9 - Objetivos Desenvolvimento Sustentável [13]

O setor empresarial precisa de acompanhar as tendências dos ODS. Uma organização mostra-se cada vez mais forte, resiliente e competitiva se esta se mostrar capaz de evoluir com um impacto sustentável a nível ambiental, social e de *governance*. É importante gerir este impacto sustentável uma vez que com a aproximação ao prazo dos ODS (2030), muitos governos podem decidir aplicar legislação para garantir o cumprimento destes objetivos. Os objetivos deverão ser implementados e tidos em consideração o mais cedo possível pois preparará as organizações para os seus projetos futuros e para as suas estratégias e ações futuras [14].

Os ODS devem ser utilizados para benefício das empresas, funcionando como guia para orientar as suas estratégias permitindo-lhes obter um leque de opções tais como:

- Explorar oportunidades de negócios em mercados emergentes, aproveitando soluções inovadoras para responder às suas necessidades;
- Maximizar o valor da sustentabilidade corporativa por meio de incentivos económicos, promovendo o uso eficiente de recursos;
- Fortalecer o relacionamento com *stakeholders*, alinhando-se ao desenvolvimento de políticas públicas e antecipando a gestão de riscos legais;
- Contribuir para a estabilidade de sociedades e mercados, garantindo o sucesso em ambientes com regulamentação clara, sistemas financeiros transparentes e instituições íntegras e bem geridas;
- Adotar uma linguagem comum e um propósito unificado para comunicar de forma eficaz os impactos e o desempenho da organização aos *stakeholders* [14].

A Figura 10 apresenta a capacidade de cada um dos ODS de contribuir com oportunidades para a sociedade e com oportunidades de negócios para as organizações.

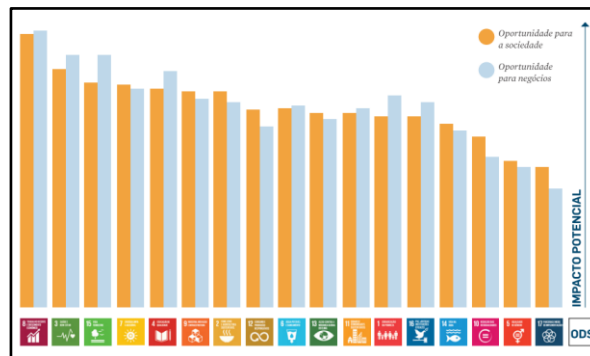


Figura 10 - Impacto Potencial dos ODS [15]

### 2.1.4. Economia Linear

A economia linear é uma economia em extinção uma vez que desperdiça o potencial de reciclabilidade dos recursos aplicados. Segue uma abordagem de extração, produção e desperdício (Figura 11) o que contribui vivamente para a degradação dos ecossistemas naturais e o aumento da necessidade de extração de recursos o que é altamente poluente. Verifica-se que a utilização deste tipo de economia provoca um aumento da escassez de recursos pois prejudica o planeta diminuindo a sua capacidade regenerativa [16].



Figura 11 - Modelo de Economia Linear [17]

Para além de se mostrar um sistema económico insustentável apresenta ainda algumas desvantagens ilustradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Desvantagens Modelo Linear [18]

<b>Limite de Recursos</b>	A incerteza sobre a disponibilidade de recursos cresce devido aos limites planetários e ao aumento populacional
<b>Volatilidade de Preços</b>	Flutuações nos preços das <i>commodities</i> tornam o mercado mais arriscado, desestimulando investimentos e elevando os custos a longo prazo
<b>Materiais Críticos</b>	Indústrias de metalurgia e semicondutores dependem de materiais raros e escassos, o que aumenta o risco de paralisações por falta de recursos
<b>Interdependência</b>	A produção global conecta recursos (como água e petróleo), tornando a escassez de um material capaz de afetar amplamente os preços e a disponibilidade de outros
<b>Aumento de Externalidades</b>	A redução da vida útil dos produtos, os impactos ambientais e a falta de alinhamento com a procura por produtos sustentáveis são problemas do modelo linear

### 2.1.5. Economia Circular

A economia circular veio renovar o modelo de economia linear, acabando por contrariar completamente a estratégia anterior. Neste novo modelo o grande objetivo passa por não desperdiçar qualquer potencial dos recursos utilizados, isto é, procurar dar um fim de vida prolongado a produtos e materiais, mantendo a qualidade dos mesmos. Na prática, esta estratégia está focada na redução, reutilização, restauração, recuperação e reciclagem de materiais e energia [19].

A essência de um modelo circular passa por projetar e gerir os resíduos. Com o objetivo de minimizar qualquer desperdício é necessário estudar e perceber em fase de projeto, quais as oportunidades de melhoria na fase de produção, distribuição, uso e recolha (Figura 12). É visível que a economia circular atua na vertente empresarial, com impactos relevantes nas decisões de uma organização relativamente à sua imagem corporativa. Para acompanhar este modelo é necessário que os produtos e serviços sejam não só economicamente viáveis mas também sustentáveis, diminuindo o conceito de obsolescência programada, uma prática em que os produtos são projetados para ter uma vida útil limitada com o intuito de estimular o consumo recorrente [18], [20].



Figura 12 - Fases do Modelo de Economia Circular [19]

Quando bem aplicado o modelo circular pode trazer várias vantagens para uma organização [21]:

- Manter os produtos e os materiais em circulação pelo maior período possível, aproveitando ao máximo o seu valor e utilidade;
- Inovar, estimular a criatividade e melhorar processos empresariais;
- Alterar pensamentos na população, no sentido do consumo consciente;
- Eliminar desperdícios;
- Contribuir para a conservação da natureza;
- Evitar a poluição em todas as fases do ciclo de produção;
- Reduzir custos com uma extração de matérias-primas menor;
- Aumentar o bem-estar e a motivação dos colaboradores;

- Melhorar a competitividade do negócio;
- Fortalecer a imagem corporativa da empresa;
- Fomentar novas relações com o cliente, com programas de retoma e novos modelos de negócio.

As normas internacionais ISO, oferecem diretrizes importantes para implementar práticas alinhadas aos princípios da economia circular. Apresentam-se de seguida algumas normas alinhadas a este conceito:

- **ISO 14001 – Sistema de Gestão Ambiental**

Fornece uma análise de risco ao longo da cadeia de produção e deteta os aspetos e impactos da sua atividade, de forma a que a empresa, tenha uma gestão mais sustentável e eficiente [21].

- **ISO 20400 – Compras Sustentáveis**

Estabelece novos procedimentos de gestão de compras para empresas, que agem de acordo com o conceito de Economia Circular [21].

- **ISO 50001 – Sistema de Gestão de Energia**

Tem como função definir processos de gestão que reduzam o consumo de energia. Esses processos podem incluir a redução da fatura da luz, a redução do consumo com a aquisição de novas tecnologias mais eficientes, e a escolha da origem da energia na empresa [21].

- **ISO 14006 – Sistema de Gestão do *Ecodesign***

É responsável por estabelecer diretrizes que definem, documentam, implementam e mantêm uma Gestão do *Ecodesign*. Engloba procedimentos de controlo em atividades profissionais relacionadas com o *design* de produtos e serviços, em que o objetivo é integrar a ACV nesses desenhos [21].

- **ISO 20121 – Sistema de Gestão de Eventos Sustentáveis**

Fornece requisitos para a implementação e certificação de um sistema de gestão de eventos sustentáveis, que permite a identificação de problemas importantes de sustentabilidade em diferentes etapas do ciclo de gestão de eventos [21].

## **2.2. Gases de Efeito de Estufa (GEE)**

Neste capítulo e subcapítulos abordam-se os gases de efeito de estufa, definindo o seu conceito e apresentando os demais gases. São referidos ainda os principais impactos ambientais que estes produzem e os protocolos e acordos internacionais que os procuram minimizar.

### **2.2.1. Definição de Gases de Efeito de Estufa**

Segundo a **ISO 14067:2018(E)** [22], um GEE é um constituinte gasoso da atmosfera, que pode ser tanto natural como antropogénico, que absorve e emite radiação em comprimentos de

onda específicos dentro do espectro da radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra, pela atmosfera e pelas nuvens [22]. É possível realizar uma analogia entre os GEE e o vidro de uma estufa. Estes têm a capacidade de absorver e manter o calor do sol que irradia a Terra contribuindo para o efeito de estufa. Este é um fenómeno natural que permite manter a temperatura na Terra em níveis adequados para existir vida [23]. Como resultado das atividades humanas o que se sucede é que existe um aumento deste tipo de gases o que contribui para a sua acumulação. Isto provoca então alteração ao nível de temperatura, sendo esta mais elevada, o que por sua vez pode despertar outras alterações climáticas como mudança nos padrões de precipitação e neve, secas, ondas de calor e inundações [23].

### 2.2.2. Principais Gases e as suas Fontes

Os vários tipos de GEE não possuem todos o mesmo Potencial de Aquecimento Global (PAG), este é definido como um indicador que compara a energia absorvida por uma tonelada de um determinado gás, tendo como referência a emissão de 1 tonelada de CO<sub>2</sub>. Um exemplo prático é a emissão de 1 tonelada de metano que equivale à emissão de 25 toneladas de CO<sub>2</sub>. Conclui-se assim que para efeitos do impacto sobre o aquecimento global o PAG do metano é de 25 [23]. Existem 7 tipos de gases abrangidos pelo Protocolo de Quioto [24] e Acordo de Paris [25]:

Tabela 4 - GEE e o seu PAG [26]

GEE	PAG	Fontes Principais
<b>Dióxido de Carbono</b>	1	Queima de materiais orgânicos - Ex: madeira, carvão, petróleo, gás natural, resíduos sólidos
<b>Metano</b>	28	Atividades humanas - Ex: aterros, agricultura, indústrias de gás natural
<b>Óxido Nitroso</b>	265	Agricultura e pecuária, fertilizantes, queima de resíduos agrícolas, queima de combustível
<b>Hidrofluorcarbonetos</b>	Na ordem dos milhares	Refrigerantes, fugas em equipamentos de refrigeração e climatização
<b>Perfluorcarbonetos</b>	Na ordem dos milhares	Refrigerantes em extintores de incêndio, produção de semicondutores
<b>Hexafluoreto de Enxofre</b>	Na ordem dos milhares	Isolantes utilizados na produção de energia elétrica
<b>Trifluoreto de Nitrogénio</b>	Na ordem dos milhares	Produção de algumas células fotovoltaicas para painéis solares, semicondutores e ecrãs planos LCD

### 2.2.3. Impactos Ambientais dos GEE e Políticas de Redução dos GEE

Os impactos ambientais podem ser definidos como a alteração das características físicas, químicas ou biológicas do ar, da água ou do solo que podem afetar a saúde, a sobrevivência ou as atividades humanas e de outros seres vivos [26]. Os principais impactos ambientais são descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Impactos Ambientais [26]

Impacte Ambiental	Efeito
<b>Aquecimento Global</b>	Aumento da concentração de GEE na atmosfera

Tabela 5 - Impactos Ambientais [26] (continuação)

<b>Depleção da Camada de Ozono</b>	Aumento da concentração de compostos orgânicos na atmosfera (COVs)
<b>Formação de Oxidantes Fotoquímicos</b>	Formação de O <sub>3</sub> a partir da degradação de compostos orgânicos na presença de radiação UV e NO <sub>x</sub>
<b>Acidificação</b>	Libertação de H <sup>+</sup> conseqüente da deposição ácida na água e no solo
<b>Eutrofização</b>	Enriquecimento dos ecossistemas aquáticos e terrestres em nutrientes, o que provoca o aumento de produção de biomassa e a diminuição da concentração de O <sub>2</sub> no meio
<b>Toxicidade Ecológica</b>	Emissão de substâncias tóxicas para a fauna e flora
<b>Toxicidade Humana</b>	Emissão de substâncias tóxicas para os humanos
<b>Depleção de Recursos Bióticos / Abióticos</b>	Ex. floresta, animais / Ex. reservas de petróleo, minérios
<b>Utilização do Solo</b>	Ex. área de solo utilizada, perda de biodiversidade, erosão

De modo a minimizar estes impactos e de estabelecer cuidados e regras para o futuro, a luta contra as mudanças climáticas envolve a cooperação global por meio de políticas e acordos internacionais que visam reduzir as emissões de GEE. Desde o Protocolo de Quioto (1997) até o Acordo de Paris (2015), diversos tratados estabelecem metas e mecanismos para mitigar os impactos climáticos e promover economias sustentáveis. Além disso, instrumentos como a Taxonomia da União Europeia (UE) e a Lei de Bases do Clima (Portugal) reforçam estratégias regionais e nacionais para ações climáticas (Tabela 6).

Tabela 6 - Protocolos e Acordos para combater as Alterações Climáticas

<b>Protocolo/Acordo</b>	<b>Ano</b>	<b>Objetivo Principal</b>	<b>Principais Características</b>
<b>Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre o Clima (UNFCCC) [27]</b>	1994	Estabilizar concentrações de GEE para evitar interferências perigosas no clima	Quase universal, com 197 países. Estabelece o quadro para acordos posteriores, como o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris.
<b>Protocolo de Quioto (KP) [24]</b>	1997	Limitar emissões de GEE em países desenvolvidos	Comércio de emissões e projetos de desenvolvimento limpo.
<b>Acordo de Paris [25]</b>	2015	Limitar o aumento da temperatura global	Promove esforços globais para descarbonização com metas voluntárias definidas pelos países (Contribuições Nacionalmente Determinadas - NDCs).
<b>Taxonomia da União Europeia (UE) [28]</b>	2020	Definir critérios para investimentos ecológicos e sustentáveis	Inclui objetivos como mitigação e adaptação às mudanças climáticas, economia circular, e proteção da biodiversidade.
<b>Lei de Bases do Clima (Portugal) [29]</b>	2021	Estabelecer princípios e obrigações para políticas climáticas em todos os níveis de governação	Criação de metas quinquenais, orçamentos de carbono, planos regionais e municipais, e incentivos económicos para transição sustentável.

## 2.3. Análise de Ciclo de Vida (ACV)

Este capítulo, juntamente com os seus subcapítulos, abordará de forma abrangente os aspetos relacionados à Análise do Ciclo de Vida (ACV). Será explorada a metodologia de análise, as suas aplicações através de casos de estudo, os benefícios e limitações da ACV, além de normas e padrões internacionais relativos à ACV.

### 2.3.1. Conceito e História

No mundo atual, a importância de minimizar os impactos ambientais é de máxima importância e o setor industrial já começou a incorporar aspetos ambientais nos seus processos de desenvolvimento de produtos. Identificar as principais questões ambientais de um produto é analisar todo o seu ciclo de vida desde a aquisição de matérias-primas até ao seu descarte. Assim, é necessária uma ferramenta analítica sistemática para a avaliação ambiental de todo o ciclo de vida de um produto. Esta ferramenta é a **Análise de Ciclo de Vida (ACV)** [30].

A ACV é segundo a **ABNT NBR ISO 14040:2009** [31], a compilação e análise das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. É considerada uma análise quantitativa de todos os impactos ambientais desse sistema, não tendo em conta aspetos económicos, sociais ou técnicos do produto/serviço. São fator de estudo as emissões libertadas para o ar, água e solo bem como o consumo de recursos renováveis e não renováveis e energia [30].

Historicamente, este tipo de análise já se desenvolvia nos EUA desde 1970 onde o estudo era designado por REPA "*Resource and Environmental Profile Analysis*". Só em 1990 é que o termo ACV ganha protagonismo e em 1992, a Organização Internacional para a Normalização (ISO) criou um comité técnico (TC 207/SC 5) para desenvolver um conjunto de estratégias e normas de gestão ambiental com inclusão da ACV [32].

Em resumo, a ACV tem um papel de análise crítica dos impactos ambientais que uma determinada organização ou produto possam ter sendo uma ferramenta que pode ajudar a minimizar esses impactos e atingir objetivos de desenvolvimento sustentável [32].

### 2.3.2. Metodologia de ACV

De modo a analisar as atividades do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas, fabrico, uso e manutenção até ao seu descarte final, é necessário perceber quais as entradas de recursos alocadas ao processo e quais as saídas associadas. A Figura 13 apresenta uma esquematização destas entradas e saídas típicas associadas [30], [32].

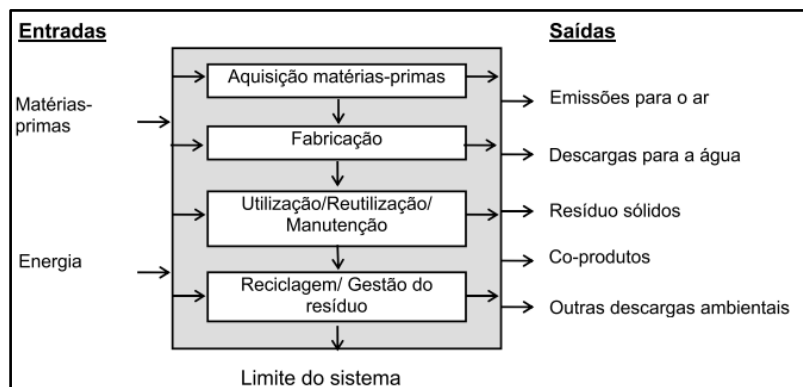


Figura 13 - Fases do Ciclo de Vida de um Produto [32]

O conteúdo de uma ACV pode variar significativamente dependendo dos objetivos do estudo. Esses objetivos determinam que aspetos e etapas do ciclo de vida do produto ou processo serão avaliados, bem como o nível de detalhe necessário. Existem duas abordagens bem caracterizadas e visíveis na Figura 14 [32]:

- **cradle-to-grave:** Perspetiva de análise que considera todas as etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço, desde a extração de matérias-primas até ao seu descarte final;
- **cradle-to-gate:** Perspetiva de análise que considera parte das etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço, desde a extração de matérias-primas até à saída do produto da fábrica, antes da distribuição, uso e descarte final. Embora mais limitada em abrangência, a abordagem *cradle-to-gate* é uma ferramenta importante para identificar oportunidades de melhorias ambientais dentro das fronteiras organizacionais de um fabricante.

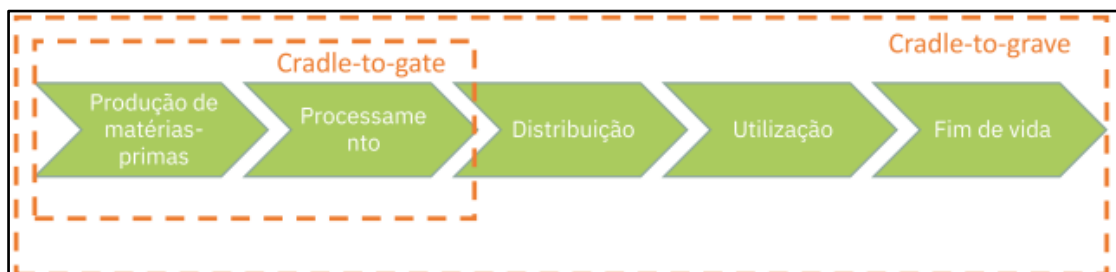


Figura 14 - Abordagens de Estudo de ACV [26]

Para se estruturar uma ACV é necessário identificar as suas fases de análise [30], [32]:

- Definição de Objetivos e Âmbito
- Análise de Inventário
- Análise de Impacto
- Interpretação de Resultados

A Figura 15, ilustra como estas fases se relacionam e quais as vantagens que se podem tirar da análise destes aspetos.

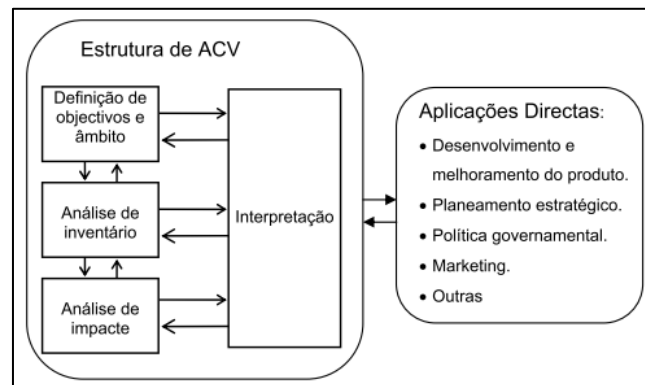


Figura 15 - Fases de uma ACV [32]

### Definição de Objetivos e Âmbito:

Numa primeira fase da análise são definidos os objetivos do estudo, isto é, as razões que motivaram a realização do estudo para a aplicação planeada com identificação da audiência a quem se pretende comunicar os resultados [30], [32], [33].

De seguida na definição do âmbito devem ser analisadas as funções do sistema do produto ou, no caso de estudos comparativos, os sistemas; a unidade funcional; o sistema de produto a ser estudado; os limites deste sistema; os procedimentos de afetação; as categorias de impacto e metodologias de análise de impacto e subsequentemente, a interpretação a ser utilizada; requisitos dos dados; pressupostos; limitações; requisitos iniciais de qualidade dos dados; tipo de revisão crítica, se necessário; tipo e formato do relatório requerido para o estudo [30], [32], [33].

A ACV sendo uma técnica iterativa, pode implicar mudanças na definição do âmbito à medida que nova informação é recolhida e atualizada [30], [32], [33].

### Análise de Inventário:

Nesta segunda fase, o objetivo destina-se a recolher dados para identificar e quantificar os fluxos de materiais e energia alocados ao produto ou processo. Estes fluxos podem incluir recursos e resíduos provenientes dos vários compartimentos do ecossistema e a partir deles podem depois ser elaboradas diferentes interpretações do significado desses dados, mediante os objetivos em vista. À medida que novos dados são inseridos no inventário e o sistema passa a ser mais bem conhecido, vão surgindo novas exigências e limitações no que respeita à recolha de dados e à qualidade dos mesmos [30], [32], [33].

A análise de inventário é de forma comum denominada de “tabela de inventário”, sendo que para se obter esta tabela recomenda-se as seguintes fases de processamento: construção da árvore do processo; definição dos limites do sistema; finalização dos limites do sistema; recolha de dados; procedimentos de cálculos [30], [32], [33].

### Análise de Impacto:

Após a recolha de dados, a fase de avaliação de impactos trata-se de um processo quantitativo e/ou qualitativo para avaliar os efeitos dos impactos determinados na análise de inventário. A avaliação do impacto torna os dados do inventário mais relevantes, ao aumentar o

entendimento sobre os potenciais impactos ambientais, além de facilitar a agregação e interpretação desses dados de forma a torná-los mais compreensíveis e significativos para o processo de tomada de decisão. Os impactos são definidos como consequências dos fluxos dos processos e que impactam negativamente a saúde humana e a disponibilidade futura de recursos naturais [30], [32].

Pode-se agora iniciar um processo iterativo de verificação do cumprimento dos objetivos iniciais propostos e concluir se estes foram atingidos ou não. Não existem ainda metodologias gerais para uma aplicação direta, pelo que a fase de avaliação dos impactos contém uma grande subjetividade [33].

#### **Interpretação de Resultados:**

Esta é a última fase do processo de ACV e combina os resultados da análise de inventário e da análise de impactos realizada anteriormente, de forma a aumentar a confiança no estudo realizado. Esta fase de interpretação tem como objetivo: identificar, qualificar, verificar, analisar os resultados, chegar a conclusões, esclarecer limitações, sugerir recomendações baseadas nas descobertas das fases precedentes do estudo e relatar os resultados da interpretação do ciclo de vida dum modo transparente com vista a encontrar os requisitos da aplicação como descrito nos objetivos e âmbito do estudo. Poderá, desta forma, despertar a necessidade de rever a qualidade dos dados, de forma a melhor refletir os resultados do estudo [30], [32], [33].

As informações reveladas por este estudo devem posteriormente ser comunicadas ao público pretendido de forma transparente, completa e precisa com objetivo de mostrar a sua relevância e aplicabilidade contabilizando todas as medidas adotadas e os resultados alcançados [30], [32], [33].

#### **2.3.3. Aplicações da ACV – Casos de Estudo**

A ACV é genérica a qualquer indústria ou produto e pode ser aplicada desde o setor alimentar ao setor metalomecânico e mesmo nas coisas mais simples do dia a dia. As suas mais valias passam por identificar os pontos críticos a nível ambiental de um determinado processo de modo a melhorar esses processos para se tornarem mais sustentáveis [33].

Os estudos de ACV datam desde os anos 70, através de empresas norte-americanas gigantes nos dias de hoje. No entanto, os estudos de ACV começaram a aparecer com magnitude na década de 90, com outra componente ambiental mais forte e presente. A análise deixou de se focar somente nos aspetos de construção e eficiência em termos de engenharia, mas ganhou um valor acrescentado na prevenção dos aspetos ambientais. O principal objetivo desta década era fazer mais com menos recursos e, ao mesmo tempo, com otimização de recursos energéticos [33].

A BMW e a Mercedes, duas construtoras de automóveis de renome alemãs, também realizam casos de estudo de ACV dos seus veículos. Analisando dois casos das empresas verifica-se que os casos de estudo são certificados sendo ambos referentes a veículos elétricos da marca. Os estudos seguem as fases de análise apresentadas anteriormente e na fase de interpretação de

resultados são descritos valores médios de emissões de GEE, emissões para a água, de consumo de energia elétrica e os recursos necessários à realização dos veículos [34], [35].

De seguida após a apresentação dos impactos ambientais presentes na construção do automóvel, são agora apresentadas as ações planeadas e as estratégias que foram implementadas para se minimizar os impactos obtidos. São visíveis medidas de foco na reciclabilidade dos veículos, no *design* dos veículos para a sua recolha após o fim de vida, no *design* para a sustentabilidade, na seleção de novos materiais e na necessidade de o processamento desses materiais utilizar energia limpa [34], [35].

Outro exemplo de medidas implementadas para redução de impactos ambientais é o caso da *Swire Beverages*, empresa que fabrica, vende e distribui produtos da Coca-Cola. A empresa identificou que a embalagem e a refrigeração pelos retalhistas são os maiores emissores de GEE nos produtos de pequeno e médio porte. Para mitigar esses impactos, introduziu frigoríficos energeticamente eficientes, reduzindo em 35-40% o consumo de eletricidade e o uso de HFC-134a, e calculou que isso pode diminuir entre 5-16% das emissões de GEE no ciclo de vida dos produtos. Além disso, lançou um novo *design* de garrafas de água, reduzindo o peso em 34% e as emissões de GEE em 11%, gerando também economia nos custos de embalagem [36].

#### **2.3.4. Benefícios e Limitações da ACV**

Os dados de um estudo de ACV, juntamente com outras informações, como dados de custos e desempenho, podem auxiliar os responsáveis pela tomada de decisão na escolha de produtos ou processos que resultem num menor impacto ambiental. A metodologia ACV é única na capacidade de identificar a transferência de impactos ambientais de um meio para outro e/ou de um estágio do ciclo de vida para outro, isto é, com a aplicação desta metodologia torna-se evidente em cada fase de vida do produto onde estão os recursos e as emissões alocados e de que forma se podem alterar os dados de uns em função de outros [32].

Por exemplo, ao escolher entre dois produtos concorrentes, pode parecer que uma 1ª opção é mais vantajosa para o ambiente porque utiliza menos matéria-prima na fase de fabricação do que a 2ª opção. No entanto, ao considerar todos os estágios do ciclo de vida, um estudo ACV pode revelar que a 1ª opção causa um maior impacto ambiental devido ao seu consumo elevado de eletricidade na fase de uso, em comparação com a 2ª opção. Sem a realização de um estudo ACV, estes aspetos não seriam detetados [32].

As principais vantagens de um estudo ACV são [32], [33]:

- Identificação de pontos críticos de impacto ambiental e de melhoria de produto nos seus estágios de evolução;
- Apoio à tomada de decisões estratégicas no que respeita a planificação estratégica, estabelecimento de prioridades, ou conceção do produto em causa, face a modificações do mercado ou devido a modificações tecnológicas;
- Melhoria da imagem corporativa e vantagem competitiva;
- Facilitar a escolha de indicadores pertinentes de eficiência ecológica;
- Otimização de recursos e redução de custos.

A realização de um estudo ACV geralmente requer muitos recursos e pode durar um longo período. Portanto, os recursos financeiros devem ser equilibrados com os benefícios esperados do estudo. O estudo ACV não determina qual produto ou processo é o mais caro ou o mais eficiente, por isso, a informação gerada deve ser usada como uma parte de um processo de decisão que inclua outras variáveis, como custo e desempenho [32].

As principais dificuldades de um estudo ACV são [32], [33]:

- Complexidade e qualidade dos dados;
- Relação custo e tempo de execução;
- Dificuldade em analisar aspetos sociais e económicos;
- Resultados dependem de hipóteses e definição de limites;
- Limitações na comparação de produtos diferentes.

### 2.3.5. Ferramentas e *Softwares* para ACV

As ferramentas e *softwares* para ACV são fundamentais para avaliar os impactos ambientais de produtos e processos ao longo do seu ciclo de vida. Esses recursos permitem recolher, organizar e interpretar dados complexos, auxiliando na tomada de decisões sustentáveis. Alguns incluem desde plataformas específicas para inventários até modelos de avaliação de impactos. A adoção dessas ferramentas facilita a identificação de melhorias ambientais e a conformidade com as regulamentações em vigor [37]. Existem inúmeros *softwares* disponíveis sendo que os apresentados de seguida são alguns dos mais citados e utilizados (Tabela 7).

Tabela 7 - Ferramentas e *Softwares* para ACV

Software/Ferramenta	Descrição	Principais Funcionalidades	Áreas de Uso
<b>SimaPro</b> [37]	<i>Software</i> líder para ACV que suporta a análise de impactos ambientais de produtos e processos	Base de dados integrada, modelagem flexível de sistemas, relatórios detalhados e acesso a diversos métodos de avaliação de impacto.	Indústria, pesquisa e ensino
<b>GaBi/Sphera</b> [37]	Ferramenta robusta para modelagem e otimização do ciclo de vida de produtos e sistemas	Grande biblioteca de dados, personalização de cenários, análise de hotspot e benchmarking ambiental.	Setor industrial e consultorias
<b>OpenLCA</b> [38]	Plataforma gratuita e de código aberto para análises de ciclo de vida	Compatível com bases de dados como o ecoinvent. Oferece acesso a vários métodos de avaliação de impacto.	Académico e pequenas empresas
<b>Umberto</b> [37]	<i>Software</i> para modelagem de fluxos de materiais e energia	Visualização de fluxos, integração com métodos de ACV e modelagem de cadeias de valor.	Indústria e consultorias
<b>Ecoinvent</b> [37]	Base de dados de inventários ambientais amplamente utilizado	Dados detalhados para uso em <i>softwares</i> como SimaPro, OpenLCA e GaBi.	Apoio para ACV

### 2.3.6. Normas e Padrões Internacionais para ACV

Para garantir que as avaliações de ACV sejam realizadas de forma consistente, transparente e comparável, diversas normas e padrões internacionais foram estabelecidos. Essas normas fornecem as diretrizes necessárias para conduzir estudos de ACV de maneira rigorosa, ajudando empresas e organizações a tomar decisões mais informadas e a melhorar a sustentabilidade dos seus produtos e serviços. Na Tabela 8, são apresentadas as principais normas e padrões internacionais relacionadas com a ACV.

Tabela 8 - Normas e Padrões para ACV

Norma/Padrão	Descrição
ISO 14040:2009 [31]	Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida - Princípios e enquadramento
ISO 14044:2009 [39]	Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida - Requerimentos e linhas guias, incluindo o inventário do ciclo de vida, avaliação dos impactos, interpretação dos resultados e natureza e qualidade dos dados
ISO 14047:2012 [40]	Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida - Exemplos de Aplicação
ISO 14048:2002 [40]	Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida - Formata da informação documental
ISO 14049:2012 [40]	Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida - Exemplos de aplicação dos objetivos, âmbito e inventário do ciclo de vida
ISO 14071:2014 [40]	Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida - Processo de revisão crítica
ISO 14072:2014 [40]	Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida - Requerimentos e linhas guia adicionais para a organização da ACV
PAS 2050:2011 [41]	Guia para a avaliação das emissões de gases com efeito de estufa ao longo do ciclo de vida de bens e serviços
GHG Protocol [36]	Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard

## 2.4. Pegada de Carbono (PC)

Neste capítulo e subcapítulos dar-se-á ênfase ao conceito de pegada de carbono inserido no âmbito anterior da ACV. Serão definidos o conceito, as várias metodologias de cálculo e o seu impacto na indústria metalomecânica.

### 2.4.1. Definição de Pegada de Carbono

Segundo a ISO 14067:2018(E) [22], a pegada de carbono de um produto é a soma das emissões de GEE da produção desse produto, expressa em unidades de dióxido de carbono equivalente ( $CO_2e$ ) e calculada com base numa avaliação do ciclo de vida (ACV), com foco na mudança climática.

Com base nessa definição é possível generalizar e dizer que a pegada de carbono mede a quantidade de gases de efeito de estufa emitidos para a atmosfera, causados diretamente ou indiretamente por um determinado processo, organização ou entidade. A unidade de dióxido

de carbono equivalente permite comparar a radioatividade dos vários GEE relativamente a uma unidade de dióxido de carbono. Este cálculo permite a uma organização perceber de onde provêm as suas fontes de maior emissão e desenvolver planos para diminuir essas fontes, ou mesmo substituí-las por outras mais sustentáveis. Interpretar a pegada de carbono pode significar identificar fontes de consumo que não estão a ser otimizadas, como por exemplo, a energia elétrica. Nos dias atuais, uma organização que se mostre preocupada em determinar as suas fontes de emissão pode convencer e atrair novos clientes e investidores e planejar ainda mais o seu futuro para se tornar numa organização Net Zero [42].

#### 2.4.2. Metodologias de Cálculo da Pegada de Carbono

Antes de se conhecer quais as várias metodologias existentes para se realizar o cálculo da PC, é necessário definir sobre que tipo de PC se pretende estudar. Os dois principais tipos de PC na indústria são os seguintes:

**Pegada de Carbono de uma Organização** – Mede as emissões de todos os GEE provenientes de todas as atividades da organização como por exemplo a energia consumida no edifício, os processos industriais e a frota de veículos da empresa [42].

**Pegada de Carbono de um Produto** – Mede todas as emissões de GEE durante todo o ciclo de vida de um produto ou serviço, desde a extração dos materiais e a sua produção até ao seu uso e fim de vida, reciclagem ou descarte [42].

Uma vez que um dos objetivos do trabalho passa por estudar a PC de um equipamento CNC, serão descritas de seguida com mais detalhe as possíveis metodologias de cálculo da PC de um produto.

Existem três metodologias disponíveis mais bem orientadas para o cálculo da PC de produtos [42]:

- PAS 2050
- ISO 14067
- *GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*

Todos estes guias e protocolos são aplicáveis a várias áreas de estudo que descrevem o tipo de âmbitos onde as emissões se devem inserir e a importância da recolha de bons dados de fatores de emissão de processos e materiais [42]. No presente trabalho foram consideradas como referência as linhas orientadoras das metodologias PAS 2050 e do *GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*. A metodologia geral do trabalho considera as cinco etapas de cálculo da PC da PAS 2050 e engloba o *GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*, na definição dos âmbitos das emissões mediante a sua origem.

##### **Etapas PAS 2050:**

#### **1. Construir um Mapa do Processo**

Identificar todas as atividades, materiais e processos que contribuam para cada fase da vida do produto que se pretende analisar.

## 2. Definir Fronteiras e Priorizar a Coleção de Dados em Áreas Chave

Definir quais as áreas de emissão que queremos estudar e excluir outras para tornar mais evidente os pontos de elevada emissão.

## 3. Recolher Dados

Recolher dados com qualidade, isto é, idealmente através de fontes primárias, ou seja, leituras reais de emissões. Quando não for possível, devem ser utilizados fatores de emissão de instituições reconhecidas e fidedignas de modo a tornar o cálculo mais credível.

## 4. Calcular a PC

Multiplicar o dado de consumo da atividade/material/processo pelo respetivo fator de emissão para cada fase de vida do produto a estudar.

$$PC = FE \times DA \quad (1)$$

onde,

*PC* – Pegada de carbono expressa em kgCO<sub>2</sub>e;

*FE* – Fator de emissão expresso em kgCO<sub>2</sub>e por unidade de consumo do bem/material;

*DA* – Dado de atividade expresso em unidade de consumo do bem/material.

## 5. Verificar os Cálculos Efetuados

Verificação de resultados através de entidades externas.

### Âmbito das Emissões:

As emissões de GEE ao longo de vida de um produto não podem ser contabilizadas todas de igual forma, isto é, cada tipo de emissão deve ser catalogada de acordo com o seu âmbito externo ou interno relativamente à empresa e ao produto em estudo. Existem três tipos de âmbitos de emissões (Figura 16)[36].

6

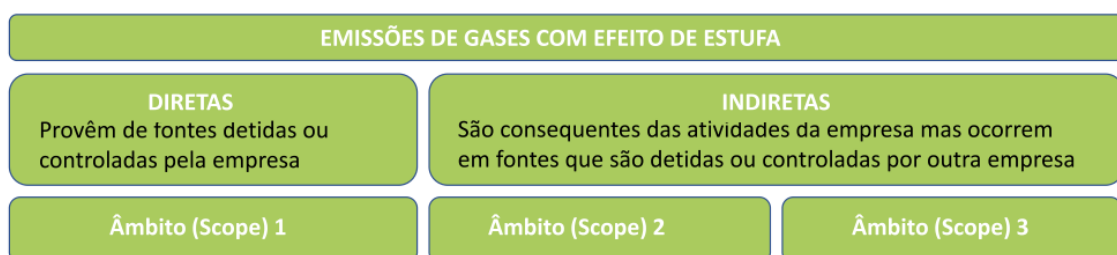


Figura 16 - Âmbitos de Emissões de GEE [26]

### Âmbito 1

São exemplos deste âmbito as emissões de combustão móvel (emissões do combustível utilizado na frota da organização), combustão estacionária (envolve combustão de combustíveis em equipamentos, como caldeiras, fornos, queimadores, turbinas, aquecedores, incineradores e motores) e fugitivas (emissões intencionais e não intencionais) [26].

## **Âmbito 2**

Neste âmbito são englobadas as fontes de emissão indireta da aquisição de energia (eletricidade, vapor, calor e frio). As emissões físicas deste âmbito, acontecem na instalação onde a eletricidade é gerada. A eletricidade comprada representa uma das maiores fontes de emissões de GEE e das mais significativas oportunidades de reduzir essas emissões [26].

## **Âmbito 3**

Por fim no âmbito 3 são reunidas as emissões resultantes da cadeia de valor, isto é, todas as emissões relacionadas com a aquisição de bens e serviços bem como as relacionadas com os bens e serviços vendidos. Exemplos destas emissões são o transporte e distribuição de produtos e serviços adquiridos pela empresa, uso de produtos e serviços vendidos e extração e produção de materiais adquiridos [26].

### **2.4.3. A Pegada de Carbono na Indústria Metalomecânica**

A indústria metalomecânica continua a ser uma atividade que requer um consumo energético muito alto e produz uma elevada PC. O aço, um material fundamental para a construção e a indústria, encontra-se num momento crucial de transformação. A procura global por aço continua a crescer, impulsionada pelo desenvolvimento de infraestruturas, veículos e produtos industrializados. No entanto, a produção tradicional de aço está associada a um alto consumo de energia e à emissão de grandes quantidades de GEE, principalmente dióxido de carbono [43].

Segundo a *worldsteel association* [43], em média, cada tonelada de aço produzida em 2020 resultou na emissão de 1,89 toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Foram produzidas 1860 milhões de toneladas de aço em 2020, o que resulta numa emissão direta do setor da ordem de 2,6 biliões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Essas emissões representaram entre 7% e 9% das emissões antrópicas globais de CO<sub>2</sub>. Não existe uma solução única para reduzir drasticamente as emissões de CO<sub>2</sub> da indústria, no entanto são propostos três princípios para se reduzirem os impactos.

#### **1. Step Up**

Trata-se de um processo de revisão de eficiência energética de modo a impulsionar a diminuição do uso de energia e matéria-prima e investir em tecnologias de economia de energia [43].

#### **2. Maximizar o Uso de Sucata**

A sucata desempenha um papel fundamental na redução das emissões da indústria e do consumo de recursos. Cada tonelada de sucata usada na produção de aço evita a emissão de 1,5 toneladas de CO<sub>2</sub> e o consumo de 1,4 toneladas de minério de ferro, 740 kg de carvão e 120 kg de calcário [43]. A Figura 17 ilustra a evolução prevista da disponibilidade de sucata até ao ano de 2050.

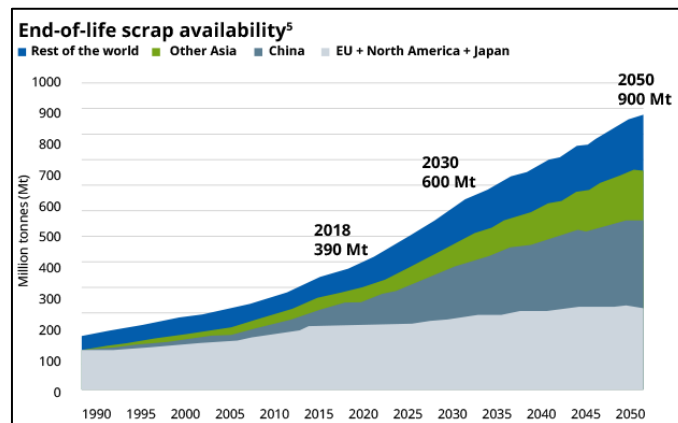


Figura 17 - Disponibilidade de Sucata em Várias Regiões do Mundo [43]

### 3. Tecnologia Inovadora

A produção de aço a partir de minério de ferro ainda depende de combustíveis fósseis, com a tecnologia de alto-forno a operar próximo dos seus limites de eficiência. Para reduzir emissões, são propostas soluções inovadoras tais como [43]:

1. Utilização do carbono como redutor, evitando simultaneamente a emissão de CO<sub>2</sub> fóssil, por exemplo, através da captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) e/ou de biomassa sustentável.
2. Substituição do carbono por hidrogênio, gerando H<sub>2</sub>O em vez de CO<sub>2</sub>.
3. Processos elétricos baseados em eletrólise.

## 2.5. Equipamento em Estudo: *StoneCUT Mill Master (SCMM)*

Por fim, neste capítulo e subcapítulos, é apresentado o equipamento em estudo para melhoria em dinâmica sustentável e abordam-se os vários critérios apresentados anteriormente para caracterizar o estado atual do equipamento.

### 2.5.1. Descrição do Equipamento

A SCMM (Figura 18) é um equipamento CNC de 5 eixos para corte, maquinação, furação, gravação e polimento de pedra, equipado com assistência de inteligência artificial (IA). A IA é utilizada por meio da digitalização de lajes de pedra, realizada por uma câmara, com o objetivo de otimizar o uso do material. O equipamento é projetado para processar lajes de diferentes materiais, como quartzo, granito, cerâmica e mármore. Na Tabela 9 são descritas as principais características do equipamento. De acordo com a experiência de clientes e em comparação com CNC's tradicionais o equipamento apresenta as seguintes vantagens[44]:

- **Produção Duplicada:** Graças à automação e à eficiência integrada, a produtividade pode ser duplicada.
- **Otimização de Materiais:** Redução de até 30% no desperdício das lajes devido à otimização das lajes por parte da IA.

- **Eficiência Energética:** Reduz o consumo de energia em cerca de 50%, indo de encontro a práticas sustentáveis.
- **Qualidade Superior:** Oferece cortes mais precisos e acabamento aprimorado, elevando o padrão de qualidade do produto final.

Tabela 9 - Características do Equipamento em Estudo [44]

Caraterística	Detalhes
Diâmetro da Serra (mm)	350-800
Opções de Área Útil de Corte (mm)	3600 x 2000 / 4000 x 2200 / 4000 x 2500 / 4000 x 2800
Eixo Z (mm)	500 - 900
Velocidade Máxima (m/min)	40
Potência do <i>Spindle</i> (CV)	20 - 35
Sistema de Visão	Para deteção e posicionamento
Sonda de Medição	Para medir ferramentas e espessura da laje
Porta-Ferramentas	BT 40 para ferramentas de serra e fresagem com troca automática
Encoders Absolutos	Sim
Lubrificação Centralizada/Assistida	Sim
Conceito Indústria 4.0	Ligação direta com escritório, smartphone e tablet
Sistema de Vácuo	Com ventosas na bancada de trabalho
Estações de Trabalho Duplas	Sim
Sistema Basculante	Para carregamento de lajes



Figura 18 - SCMM

### 2.5.2. Ciclo de Vida e Pegada de Carbono de um Equipamento CNC: Etapas e Impactos Ambientais

Utilizando os conceitos da ACV e da PC, é possível definir as várias etapas de vida de um equipamento CNC como o que se está a analisar. As etapas são as seguintes:

#### 1. Extração e Produção de Matérias-Primas

A extração de matérias-primas, como aço, alumínio, cobre, plásticos e outros materiais, é a etapa inicial que define uma parte significativa da PC.

## **2. Fabrico do Equipamento**

O fabrico do equipamento CNC inclui o processamento de metais, maquinaria, soldadura e integração de sistemas de automação.

## **3. Distribuição e Transporte**

Após o fabrico, o transporte dos equipamentos CNC para centros de distribuição ou clientes finais gera emissões substanciais.

## **4. Uso/Manutenção do Equipamento**

A fase de uso e manutenção é uma das mais significativas em termos de impacto ambiental, devido ao consumo contínuo de energia pelos equipamentos CNC.

## **5. Descarte e Fim de Vida**

No final da vida útil, o equipamento CNC pode ser descartado, reciclado ou reutilizado parcialmente.

Identificadas as fases de estudo e considerando uma análise *cradle-to-gate*, é possível proceder a um primeiro cálculo da PC do equipamento. Para se realizar o cálculo devem-se seguir as etapas da PAS 2050 identificadas anteriormente e o *GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*, na definição dos âmbitos das emissões mediante a sua origem.

Uma vez que o produto em estudo é um equipamento CNC, este possui inúmeras peças e componentes onde é necessário realizar a listagem desses componentes e definir o seu material, quantidade, peso próprio, comprimento, entre outros. A definição da unidade do bem/material para o cálculo da PC em  $kgCO_2e$ , dependerá das unidades do fator de emissão a utilizar. Após a identificação dos componentes e materiais do equipamento é necessário identificar os processos que serão alocados a esses recursos para a produção do equipamento. Os fatores de emissão presentes neste primeiro cálculo são fatores de emissão provenientes de entidades, instituições e empresas com grande magnitude o que aumenta a confiança nos dados utilizados. No **Subcapítulo 3.1** estão descritos os cálculos efetuados e os resultados obtidos, apresentando as fronteiras definidas para este primeiro cálculo.

### **2.5.3. Estratégias para Redução de Impactos Ambientais em Equipamentos CNC**

Os equipamentos CNC desempenham um papel crucial na indústria moderna, mas também geram impactos ambientais significativos. Para mitigar esses efeitos, é essencial adotar estratégias que promovam eficiência energética, redução de resíduos e o uso sustentável de recursos. A implementação dessas práticas contribui para a sustentabilidade sem comprometer a produtividade.

#### **Design Sustentável e Escolha de Materiais**

- Uso de materiais reciclados: incorporar metais e plásticos reciclados na fabricação reduz a dependência de extração de matérias-primas.

- Otimização do *design*: projetar equipamentos mais leves e eficientes reduz o consumo de materiais e energia ao longo da sua vida útil.
- Seleção de materiais duráveis: a escolha de materiais com maior resistência ao desgaste prolonga a vida útil do equipamento, reduzindo a necessidade de substituições frequentes.

### **Fabricação com Menor Impacto**

- Fontes de energia renováveis: utilizar energia solar, eólica, entre outras nas instalações de fabricação para diminuir as emissões de carbono associadas à produção.
- Processos eficientes: adotar tecnologias de produção avançada, como impressão 3D para protótipos e componentes, reduz o desperdício de material e energia.
- Minimização de resíduos: implementar programas de reaproveitamento de resíduos industriais, como aparas de metal, para uso em outras aplicações.

### **Operação e Eficiência Energética**

- Otimização do consumo energético: equipar máquinas CNC com motores de alta eficiência e sistemas de recuperação de energia para reduzir o consumo de eletricidade.
- Modos de operação inteligente: incorporar tecnologias de monitoramento para ajustar automaticamente o consumo de energia com base na carga de trabalho.
- Formação de operadores: capacitar operadores para usar os equipamentos de forma eficiente, evitando desperdício de energia e materiais.

### **Manutenção Preventiva e Extensão da Vida Útil**

- Monitorização proativa: utilizar sensores e *softwares* para prever falhas, permitindo uma manutenção preventiva que prolonga a vida útil do equipamento.
- Redução de substituições: escolher componentes de alta durabilidade e realizar inspeções regulares para evitar substituições desnecessárias.

### **Descarte Sustentável e Economia Circular**

- Reciclagem de materiais: garantir que os metais e outros componentes do equipamento sejam reciclados no final da sua vida útil.
- Reaproveitamento de componentes: desenvolver processos para desmontagem e reutilização de peças funcionais em novos equipamentos ou reparos.
- Parcerias com empresas de reciclagem: estabelecer parcerias para a destinação correta de materiais que não podem ser reaproveitados diretamente.

### **Tecnologias Avançadas e Digitalização**

- Indústria 4.0: adotar tecnologias digitais para melhorar o controle e a eficiência operacional, como monitoramento remoto, análise de dados em tempo real e inteligência artificial.
- *Softwares* de simulação: utilizar ferramentas que simulam processos de fabricação para otimizar o uso de materiais e energia antes da produção real.
- Automação inteligente: implementar sistemas que otimizem o uso de recursos automaticamente, reduzindo o consumo desnecessário.

## 3. Avaliação de Sustentabilidade e Estado Operacional do Equipamento

Este capítulo analisa a sustentabilidade do equipamento CNC em três vertentes complementares: ambiental, estrutural e organizacional. A avaliação ambiental será realizada através do cálculo da pegada de carbono e da análise da eficiência energética. No campo estrutural, serão apresentados ensaios experimentais que avaliam a durabilidade e o comportamento mecânico do equipamento. Por fim, será descrita a implementação de uma tabela otimizada de materiais, com vista à redução do consumo de recursos. Esta abordagem integrada visa reforçar a eficiência global e reduzir o impacto ambiental do equipamento.

### 3.1. Avaliação da Pegada de Carbono do Equipamento

Neste subcapítulo do trabalho procedeu-se à quantificação da PC associada à produção do equipamento CNC SCMM, com o objetivo de avaliar o seu impacto ambiental numa perspetiva *cradle-to-gate*.

#### 3.1.1. Cálculo da Pegada de Carbono da SCMM

A avaliação da PC do equipamento CNC SCMM foi realizada com base nas orientações estabelecidas pela norma **PAS 2050** e pelo **GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard**. Estas normas forneceram a estrutura para a definição dos âmbitos de emissões e para a contabilização das emissões ao longo do ciclo de vida do produto.

O cálculo efetuado seguiu uma abordagem *cradle-to-gate*, ou seja, considerou todas as emissões de carbono desde a extração das matérias-primas até à saída do equipamento da fábrica, sem incluir a fase de utilização e fim de vida. Este estudo preliminar teve como principal objetivo identificar as áreas de maior impacto ambiental, possibilitando o desenvolvimento de estratégias de otimização futura.

De modo a realizar o cálculo da PC do equipamento em estudo foram consideradas algumas fronteiras organizacionais e condições iniciais de modo a facilitar este primeiro cálculo. O objetivo inicial de calcular a PC do equipamento é de melhor revelar quais as áreas de maior impacto ambiental para posteriormente poderem ser otimizadas. As condições e considerações iniciais são as seguintes:

- Relativamente a emissões do âmbito 3 na secção de transporte e distribuição, foi considerado apenas o transporte das estruturas subcontratadas do equipamento. Estas estruturas realizam um transporte aproximado de 105 km, sendo o transporte realizado de Barcelos para São João da Madeira;
- Relativamente a emissões do âmbito 2 do consumo de recursos energéticos, foram consideradas nesta fase duas faturas mensais de consumo de energia elétrica e de gás propano. O consumo de energia elétrica está associado maioritariamente aos processos de fabrico e o consumo de gás ao aquecimento da estufa de pintura.

### 1. Construção de um Mapa de Processo

A estratégia utilizada para listar todas as atividades, materiais e processos alocados ao equipamento consistiu, numa fase inicial, em realizar uma divisão em 3 categorias:

- Materiais
- Processos de Fabrico
- Transportes

#### **Materiais:**

Nesta secção são conhecidos todos os materiais utilizados no equipamento e os diversos componentes que nele estão inseridos. Para identificar todos os componentes recorreram-se aos desenhos de conjunto e modelo CAD do equipamento (Figura 19). O equipamento foi dividido em 6 subconjuntos:

- Módulo Paralelo N/A Paralelo 5 metros SCMM
- VSM Ponte Reforçada STC
- Cabeça Eixo Z
- Módulo Cabeça Aço VSM Eixo Z Master
- Módulo Cabeça Aço VSM Eixo X Master
- Automação

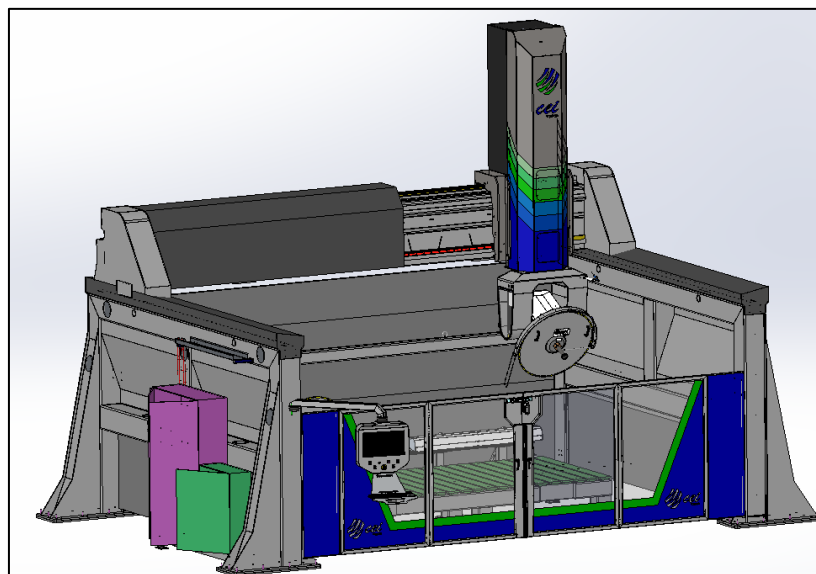


Figura 19 - Visão Geral do CAD do Equipamento

**Subconjunto: Módulo Paralelo N/A Paralelo 5 metros SCMM**

Este subconjunto engloba os componentes dos paralelos laterais do equipamento (Figura 20).

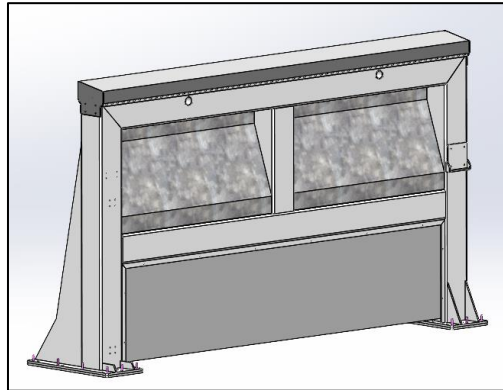


Figura 20 - Paralelo Lateral

**Subconjunto: VSM Ponte Reforçada STC**

Este subconjunto contém os componentes relativos à ponte do equipamento (Figura 21).

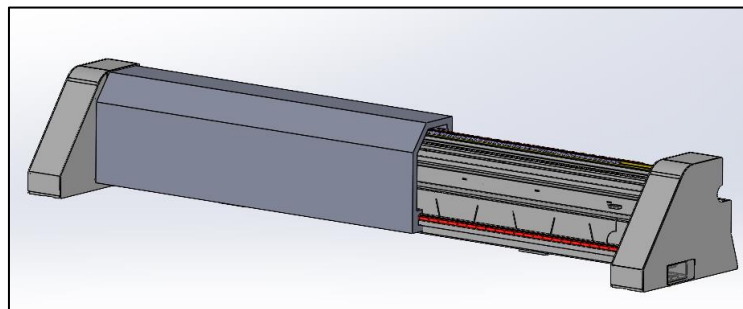


Figura 21 - Ponte Equipamento

**Subconjunto: Cabeça Eixo**

Neste subconjunto estão presentes os componentes da cabeça do eixo Z (Figura 22).

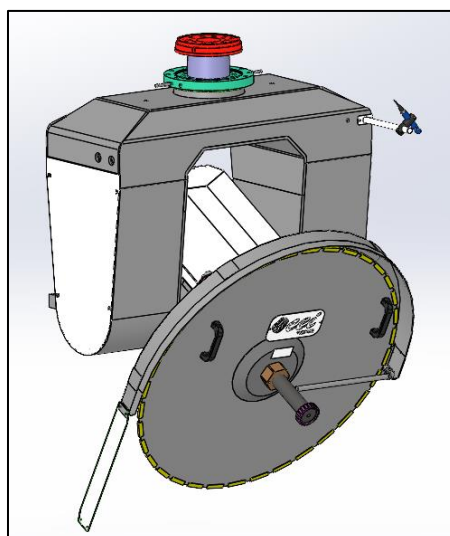


Figura 22 - Cabeça Eixo Z

**Subconjunto: Módulo Cabeça Aço VSM Eixo Z Master**

No seguinte subconjunto estão presentes os componentes de suporte da cabeça segundo o eixo Z (Figura 23).

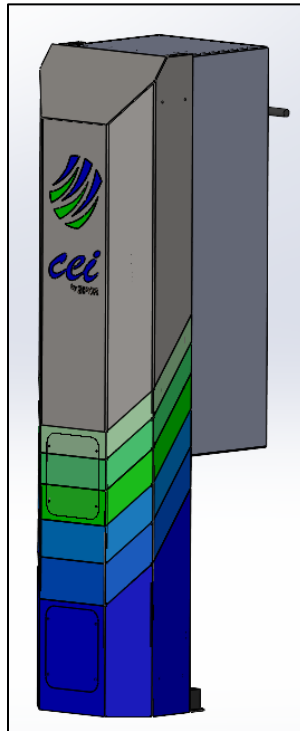


Figura 23 - Suporte Cabeça Eixo Z

**Subconjunto: Módulo Cabeça Aço VSM Eixo X Master**

O presente subconjunto possui os componentes de suporte da cabeça segundo o eixo X (Figura 24).

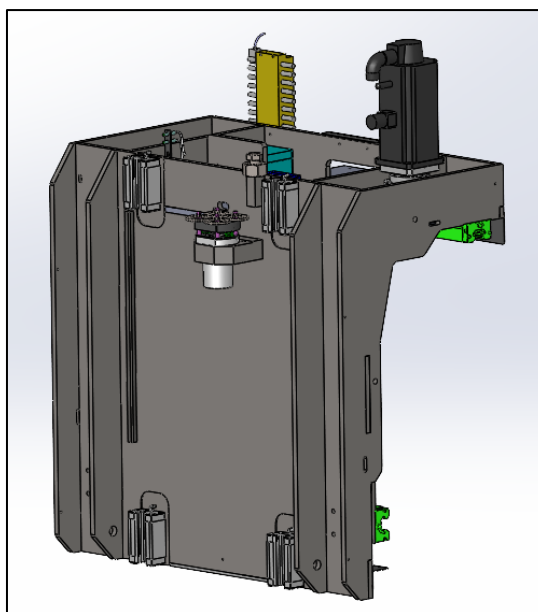


Figura 24 - Suporte Cabeça Eixo X

**Subconjunto: Automação**

No último subconjunto englobam-se todos os componentes de automação nomeadamente esteiras de cabo, cabo elétrico, cabo de esteira, tubo de ar comprimido, entre outros (Figura 25).

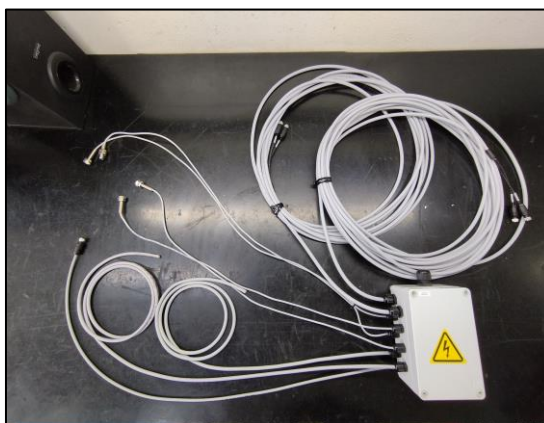


Figura 25 - Exemplo de Caixa Parcial

**Processos de Fabrico:**

Os processos de fabrico presentes na construção do equipamento podem ser identificados pelos vários equipamentos do setor de fabrico da CEI, apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Processos de Fabrico

Corte de Peças	Soldadura	Maquinação	Pintura
Jato de Água	Posto MIG/MAG	Torno	
Serretes Automáticos	Posto TIG	Fresa	
Guilhotina e Quinagem	Posto Laser	Centro CNC	

**Transportes:**

No setor dos transportes foi considerado como referido anteriormente, o transporte das estruturas subcontratadas de Barcelos para a CEI. As estruturas subcontratadas são estruturas de aço de grandes dimensões e volume que irão compor a estrutura base do equipamento.

**2. Definir Fronteiras e Priorizar a Coleção de Dados em Áreas Chave**

Neste cálculo inicial, o objetivo é de obter uma estimativa dos valores médios de produção de CO<sub>2</sub> e identificar as áreas e componentes com maior impacto na perspetiva global da PC. Para isso, o foco foi direcionado prioritariamente para a identificação dos materiais utilizados nos componentes, o consumo energético e de gás, bem como o transporte das estruturas subcontratadas.

**3. Recolher Dados**

Durante a recolha de dados, foram determinados os fatores de emissão associados aos materiais e recursos utilizados na fabricação do equipamento. Simultaneamente, foram também registadas as características físicas dos bens/materiais a serem utilizados, como o peso

próprio, comprimento, área ou volume, conforme aplicável. A Tabela 11 apresenta os fatores de emissão utilizados.

Tabela 11 - Fatores de Emissão

Bem/Material	Fator de Emissão
Alumínio	7,025 kgCO <sub>2</sub> e/kg [45]
Aço Inoxidável	4,375 kgCO <sub>2</sub> e/kg [46]
Aço Carbono	1,7 kgCO <sub>2</sub> e/kg [47]
Aço DC01+ZE	3,03 kgCO <sub>2</sub> e/kg [45]
Cabo Elétrico	0,9821 kgCO <sub>2</sub> e/m [48]
Cartão	0,326 kgCO <sub>2</sub> e/kg [49]
Painel Sandwich	30 kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> [50]
Tubo Ar Comprimido - Poliuretano	2,5 kgCO <sub>2</sub> e/kg [51]
Mangas Cabo e Tubo - Polietileno	2,05 kgCO <sub>2</sub> e/kg [1]
Borracha Sintética	0,00292 kgCO <sub>2</sub> e/kg [52]
Poliamida - PA	11,1 kgCO <sub>2</sub> e/kg [53]
Foles PVC+PE	7,83 kgCO <sub>2</sub> e/kg [54]
Zinco	3,8 kgCO <sub>2</sub> e/kg [55]
PC - Policarbonato	5,5 kgCO <sub>2</sub> e/kg [56]
Tinta Aquosa Epóxica	6000 kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> [57]
Tinta Epóxica Solvente	6000 kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> [57]
Eletricidade	0,169 kgCO <sub>2</sub> e/kWh [58]
Veículo de Mercadorias de Grande Porte (Diesel)	0,50546 kgCO <sub>2</sub> e/(ton.km) [59]

A Tabela 12 exemplifica os dados recolhidos para alguns dos componentes de um dos subconjuntos. Já a Tabela 13 apresenta a recolha de dados para o transporte das estruturas subcontratadas.

Tabela 12 - Exemplo de Recolha de Dados dos Subconjuntos

Subconjunto	Componente	Quantidade	Material	DA
Módulo Paralelo N/A Paralelo 5 metros SCMM	1.1 Suporte/Apoio Aço Paralelo 5 Metros SCMM	2	Aço S275	2007,35 kg (Peso Próprio)
	1.2 Chapas Soldar ao Paralelo	4	Aço DC01+ZE	37,08 kg (Peso Próprio)
	2.1 Fole Sold Term PVC+PE Eixo Y	4	PVC+PE	5 kg (Peso Próprio)
	2.2 Suporte/Apoio Inox Chapa Fole Gaveta Traz	2	Aço AISI 304	2,48 kg (Peso Próprio)

Tabela 13 - Dados do Transporte das Estruturas Subcontratadas

Transporte	Peso Mercadoria (ton)	Distância Transporte (km)
1.1 Suporte/Apoio Aço Paralelo 5 Metros SCMM	4,0147	105
1.2 Chapas Soldar ao Paralelo	0,03708	

7. Estrutura da Ponte	2,6522	
11. MC438648	0,197	
1. Suporte/Apoio Aço Eixo Z Master	0,59241	
1. Esquadro Aço Eixo X Mill Master	0,319	

#### 4. Calcular a PC

Por fim após descritos todos os fatores de emissão e identificados os componentes e as suas propriedades procede-se ao cálculo da PC utilizando a Equação (1). De notar que existem alguns componentes ou bens onde o valor da sua PC em  $kgCO_2e$  aparece diretamente, isto acontece porque os dados da PC já eram fornecidos ou pelo fabricante ou fornecedor.

Analisando os resultados obtidos relativamente às 3 categorias identificadas inicialmente temos na Tabela 14 os valores obtidos e na Figura 26 a distribuição desses valores.

Tabela 14 - PC das Categorias

<b>PC Materiais (kgCO<sub>2</sub>e)</b>	17387
<b>PC Processos de Fabrico (kgCO<sub>2</sub>e)</b>	5784
<b>PC Transportes (kgCO<sub>2</sub>e)</b>	415
<b>PC Total (kgCO<sub>2</sub>e)</b>	23585

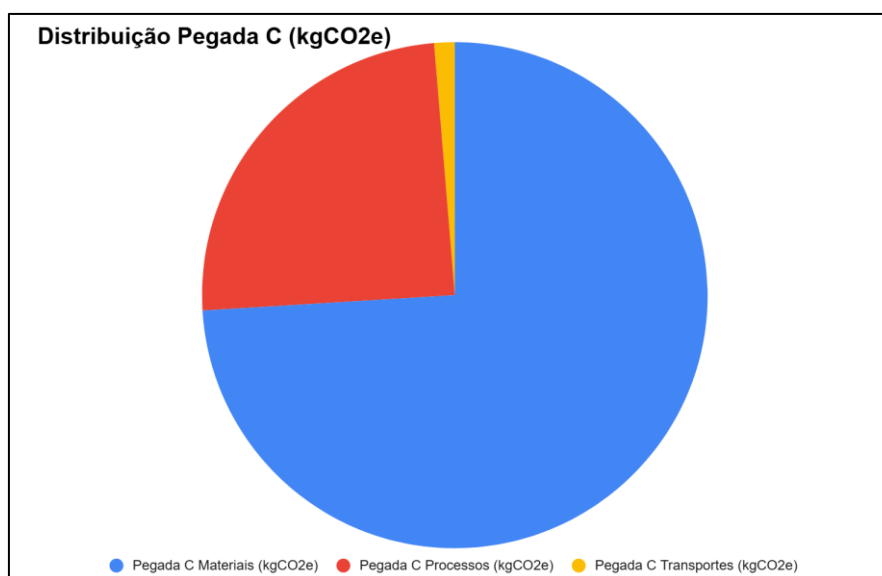


Figura 26 - Distribuição da PC

Analisando os resultados relativamente aos âmbitos das emissões temos na Tabela 15 os valores obtidos e na Figura 27 a sua distribuição.

Tabela 15 - PC em Função dos Âmbitos de Emissões

<b>PC Âmbito 1 (kgCO<sub>2</sub>e)</b>	2746
<b>PC Âmbito 2 (kgCO<sub>2</sub>e)</b>	3038
<b>PC Âmbito 3 (kgCO<sub>2</sub>e)</b>	17801

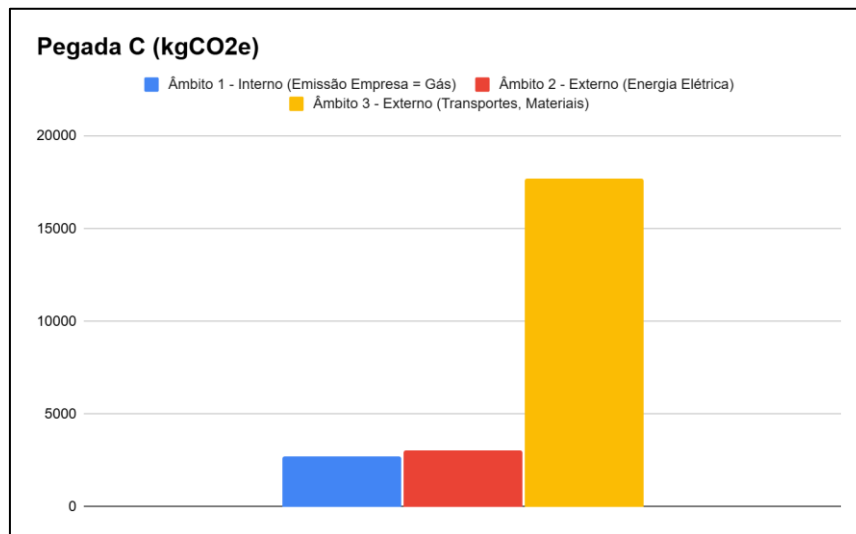


Figura 27 - Distribuição da PC segundo os Âmbitos de Emissão

Analisando a Figura 27, verifica-se que as emissões de âmbito 3 são bastante superiores às emissões dos restantes âmbitos, o que era esperado uma vez que este âmbito engloba toda a cadeia de valor associada ao equipamento. Já a Figura 26 revela que a PC dos materiais/componentes, representa cerca de 75% da pegada do equipamento quando comparada com os processos e transportes associados. Verifica-se também que 80% da PC dos materiais é proveniente das estruturas de aço do equipamento (**13527 kgCO<sub>2</sub>e**).

### 3.1.2. Análise dos Dados Obtidos

A análise dos dados relativos à PC do equipamento CNC SCMM revelou que a maior parte das emissões está associada aos materiais utilizados na sua construção, com destaque para o aço carbono, que em conjunto representam cerca de 75% das emissões totais. Esta distribuição é coerente com padrões observados em equipamentos industriais de grande porte, onde os materiais metálicos, pela sua densidade e energia incorporada, contribuem significativamente para o impacto ambiental [60].

O valor total obtido para a PC de **23585 kgCO<sub>2</sub>e** encontra-se ligeiramente acima do valor médio reportado para equipamentos CNC de complexidade comparável. No entanto, esta discrepância é justificada pelo elevado nível de detalhe adotado na presente análise. Foram analisados individualmente todos os subconjuntos do equipamento SCMM com base em modelos CAD e dados reais de materiais, aplicando fatores de emissão específicos por tipo de material e processo. Em contraste, estudos globais de ACV frequentemente recorrem a estimativas genéricas baseadas em valores médios por unidade funcional, o que pode levar a subavaliações significativas. Adicionalmente, o elevado grau de complexidade estrutural e funcional do equipamento em estudo, incluindo cinco eixos ativos e múltiplos sistemas auxiliares, contribui para um impacto ambiental mais elevado, o que reforça a validade do valor obtido nesta análise detalhada.

Para validar o valor obtido na presente análise para as estruturas metálicas do equipamento, **13527 kgCO<sub>2</sub>e**, foi adotada uma abordagem de comparação simplificada com equipamentos

CNC de complexidade e porte semelhantes. A estratégia consiste em assumir que a massa total das estruturas de aço representa a maior fração da pegada de carbono desses equipamentos, o que é uma suposição plausível em sistemas industriais de grande porte, dada a elevada densidade e energia incorporada do aço. Com base em dados técnicos públicos e fornecidos por fabricantes, foram identificados três equipamentos CNC de porte equivalente representados na Figura 28, e estimadas as suas emissões estruturais por esta metodologia, conforme evidenciado na Tabela 16.



Figura 28 - Equipamentos CNC de Porte Semelhante à SCMM

Tabela 16 - Estimativa da PC de Equipamentos CNC

Equipamento	Ilustração na Figura 28	Peso Estrutural (kg)	Fator de Emissão (kgCO <sub>2</sub> e/kg)	Pegada de Carbono Estimada (kgCO <sub>2</sub> e)
Linhai Zhongli Machinery Manufacturing - GERLA Plus 600 [61]	À Esquerda	6000	1,7	<b>10200</b>
Donatoni Z 1000 [62]	Ao Centro	10361	1,7	<b>17615</b>
STYLECNC ST3220S-5ª [63]	À Direita	5500	1,7	<b>9350</b>
SCMM	-	7957	1,7	<b>13527</b>

Os valores estimados para a PC das estruturas das três máquinas de referência encontram-se no intervalo de **9350 a 17615 kgCO<sub>2</sub>e**, o que valida o valor obtido para a SCMM como coerente com equipamentos CNC de porte e complexidade semelhantes.

Os resultados obtidos evidenciam oportunidades claras de melhoria, particularmente ao nível da seleção de materiais e da otimização do equipamento. Esta abordagem quantitativa, enquadrada numa lógica de *cradle-to-gate*, oferece assim uma base sólida para decisões de engenharia sustentáveis e contribui para a integração de critérios de ecoeficiência nas fases iniciais de projeto do produto.

### 3.2. Estudo da Integridade Estrutural do Equipamento

No presente capítulo são descritos os ensaios experimentais realizados ao equipamento CNC SCMM, bem como as principais conclusões retiradas dos mesmos. A avaliação da integridade estrutural foi conduzida com o objetivo de validar a rigidez e o comportamento mecânico da estrutura em condições representativas de utilização operacional, apoiando o desenvolvimento de melhorias e a calibração de modelos numéricos representativos do sistema.

Os ensaios foram realizados nas instalações da CEI, com apoio do INEGI, e distribuíram-se por três fases distintas. Cada fase foi orientada por objetivos específicos, abrangendo diferentes configurações de carga, zonas críticas da estrutura e metodologias de medição. Esta abordagem faseada permitiu obter uma visão abrangente e aprofundada do desempenho estrutural da máquina, tanto em condições estáticas como dinâmicas, fornecendo dados fiáveis para sustentar as decisões de otimização.

A Figura 29 apresenta os principais componentes em estudo e as respetivas designações.

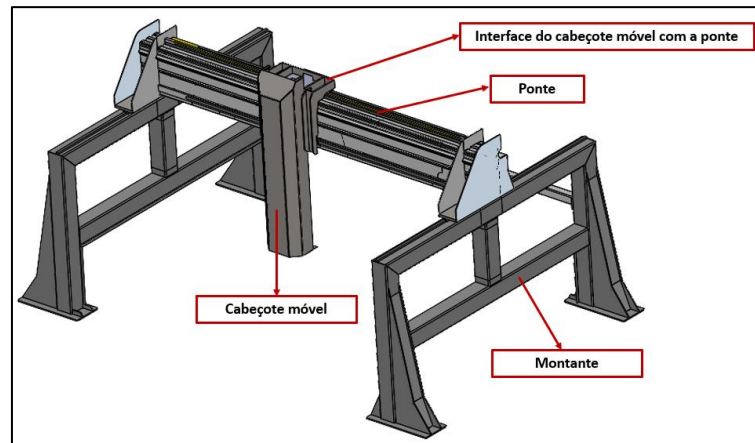


Figura 29 - Designação Técnica dos Componentes em Estudo

### 3.2.1. 1ª Fase de Ensaios Experimentais

A primeira fase de ensaios experimentais centrou-se na avaliação global da estrutura do equipamento CNC SCMM, com o objetivo de caracterizar o seu comportamento em regime elástico sob diferentes condições de carga. Nesta etapa, foram aplicadas cargas controladas à estrutura completa, permitindo medir deslocamentos em pontos críticos, de forma a avaliar a rigidez global do sistema e obter dados iniciais para comparação com os modelos numéricos desenvolvidos em paralelo.

Os ensaios experimentais realizados podem ser divididos em duas tipologias diferentes:

- Testes experimentais realizados à estrutura completa, com o intuito de avaliar o seu comportamento em regime elástico;
- Testes experimentais realizados a cada montante/paralelo (viga transversal), por forma a obter uma aproximação da rigidez da estrutura de cada componente.

Foram realizados três *Setups* de ensaio experimental nesta 1ª fase:

- **Setup I** – No primeiro ensaio, aplicou-se uma carga vertical descendente a meio vão da ponte, com o cabeçote móvel na sua zona inferior. Aplicou-se uma carga máxima de 1000 kg e em seguida, foram sendo removidos progressivamente diferentes valores de carga, permitindo a obtenção de múltiplos pontos de leitura de deslocamento ao longo do processo de descarga.



Figura 30 - Setup de Carga I

- **Setup II** – No segundo ensaio, a carga vertical descendente foi aplicada na extremidade da ponte, junto ao montante, com o cabeçote móvel na posição extrema inferior. O objetivo foi avaliar o comportamento da estrutura de cada montante através da aplicação e remoção de massas entre 0 e 1000 kg;



Figura 31 - Setup de Carga II

- **Setup III** – Por fim, para avaliar a rigidez própria de cada montante, desmontou-se a estrutura da ponte, isolando cada uma das estruturas, de modo a estimar o efeito do peso próprio da ponte sobre elas.



Figura 32 - Setup de Carga III

Os ensaios foram realizados com recurso aos seguintes materiais e recursos:

- Chapas de aço com diferentes espessuras e sacos de abrasivo de 25 kg para a aplicação das cargas nas posições desejadas;
- Relógios comparadores de base magnética para leitura dos deslocamentos sofridos.

### Procedimento Experimental 1ª Fase

#### Setup I

O primeiro Setup de ensaio teve como objetivo medir o deslocamento vertical e transversal para diferentes situações de carga da ponte e do cabeçote. O ensaio experimental teve início pela medição do deslocamento vertical e deu-se pela seguinte ordem de trabalho:

1. Colocação da carga máxima de **1000** kg na posição pretendida;



Figura 33 - Situação de Carga Inicial Setup I

2. Instalação de dois relógios comparadores, um a meio vão da ponte com o apalpador na viga longitudinal e outro posicionado a meio da chapa inferior do cabeçote procedendo às suas calibrações para o valor de carga aplicado;



Figura 34 - Relógio Comparador Instalado na Ponte (Deslocamento Vertical)



Figura 35 - Relógio Comparador Instalado no Cabeçote (Deslocamento Vertical)

3. Concluída a preparação do ensaio procedeu-se à remoção de **250 kg** de massa para se obter o primeiro ponto de leitura. De seguida removeram-se os restantes **750 kg** de massa e registou-se um novo ponto de leitura. Por fim aplicaram-se apenas **500 kg** de massa e registou-se um último ponto de leitura. Os valores registados encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Leituras de Deslocamento Vertical do *Setup* I

Medição (Relógio Comparador Ponte)	Carga Aplicada [kg]	Leitura [mm]	Varição de Carga [kg]
Referência	1000	0,00	0
1ª	750	0,065	250
2ª	0	0,21	1000
3ª	500	0,14	500
Medição (Relógio Comparador Cabeçote)	Carga Aplicada [kg]	Leitura [mm]	Varição de Carga [kg]
Referência	1000	0,00	0
1ª	750	0,03	250
2ª	0	0,12	1000
3ª	500	0,06	500

Procedeu-se de seguida à medição do deslocamento transversal pela seguinte ordem de trabalho:

1. Colocação de uma carga de **500 kg** na posição pretendida;
2. Instalação de dois relógios comparadores, um a meio vão da ponte em posição transversal à mesma e outro a meio do cabeçote em posição transversal a este, sendo depois efetuada a calibração dos relógios;



Figura 36 - Relógio Comparador Instalado na Ponte (Deslocamento Transversal)



Figura 37 - Relógio Comparador Instalado no Cabeçote (Deslocamento Transversal)

3. Preparado o ensaio efetuou-se a remoção dos 500 kg de massa e registaram-se os valores lidos apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Leituras de Deslocamento Transversal do *Setup I*

Medição (Relógio Comparador Ponte)	Carga Aplicada [kg]	Leitura [mm]	Varição de Carga [kg]
Referência	500	0,00	0
1ª	0	0,005	500
Medição (Relógio Comparador Cabeçote)	Carga Aplicada [kg]	Leitura [mm]	Varição de Carga [kg]
Referência	500	0,00	0
1ª	0	0,085	500

### **Setup II**

Neste segundo *Setup* de ensaio procurou-se estudar a influência da aplicação de carga gravítica sobre os montantes/paralelos, com a ponte instalada, de modo a obter leituras de deslocamento vertical dos mesmos. Foram aplicadas cargas no montante/paralelo esquerdo do equipamento e posteriormente no montante/paralelo direito para validação dos resultados. O ensaio no montante/paralelo esquerdo seguiu a seguinte ordem de trabalho:

1. Colocação de uma carga de **500 kg** na posição pretendida;



Figura 38 - Ilustração da Situação de Carga Inicial *Setup* II no Montante Esquerdo

2. Instalação de um relógio comparador a meio vão do montante/paralelo com o apalpador na chapa inferior da viga transversal, procedendo de seguida à sua calibração;



Figura 39 - Relógio Comparador Instalado no Montante Esquerdo

3. Preparado o ensaio efetuou-se a remoção dos **500** kg de massa e efetuaram-se as devidas leituras. De seguida foi aplicada uma carga de **1000** kg, calibrou-se o relógio e registaram-se novas leituras. Por fim aplicou-se uma carga de **750** kg e registaram-se as devidas leituras. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Leituras de Deslocamento Vertical do *Setup II* (Montante Esquerdo)

Medição (Relógio Comparador Montante Esquerdo)	Carga Aplicada [kg]	Leitura [mm]	Varição de Carga [kg]
Referência	500	0,00	0
1ª	0	0,02	500
Referência	1000	0,00	0
2ª	0	0,06	1000
3ª	250	0,05	750

Terminadas as medições no montante/paralelo esquerdo passou-se à análise do montante/paralelo direito segundo a seguinte ordem de trabalho

1. Calibração do relógio comparador sem a aplicação de qualquer carga;



Figura 40 - Relógio Comparador Instalado no Montante Direito

2. Após a calibração foi colocada uma carga de **750 kg** seguida de uma carga de **1000 kg** e para finalizar uma carga de **500 kg**. Na Tabela 20 apresentam-se os resultados obtidos.

Figura 41 - Ilustração da Situação de Carga Inicial *Setup II* no Montante Direito

Tabela 20 - Leituras de Deslocamento Vertical do *Setup II* (Montante Direito)

Medição (Relógio Comparador Montante Direito)	Carga Aplicada [kg]	Leitura [mm]	Varição de Carga [kg]
Referência	0	0,00	0
1ª	750	0,04	750
2ª	1000	0,05	1000
3ª	500	0,02	500

### Setup III

Por fim no último *Setup* a ponte foi removida para estimar o deslocamento imposto pelo seu peso próprio nos montantes/paralelos e avaliar a rigidez dos mesmos. Após terminadas as leituras do *Setup* anterior utilizaram-se os valores de referência marcados nos dois relógios comparadores para as novas leituras a serem efetuadas. A ponte foi elevada conforme ilustrado na Figura 42 e obtiveram-se os seguintes resultados apresentados na Tabela 21.



Figura 42 - Elevação da Ponte

Tabela 21 - Leituras de Deslocamento Vertical do *Setup III*

Medição (Relógio Comparador Montante Esquerdo)	Carga Aplicada [kg]	Leitura [mm]	Varição de Carga [kg]
Referência	2800 (Ponte)	0,00	0
1ª	0	0,21	2800
Medição (Relógio Comparador Montante Direito)	Relógio Comparador Montante Direito	Leitura [mm]	Varição de Carga [kg]
Referência	2800 (Ponte)	0,00	0
1ª	0	0,21	2800

### Análise de Resultados

A comparação entre os valores de deslocamento experimental e deslocamento teórico permite avaliar a precisão das previsões teóricas e a credibilidade do ensaio experimental. Na Tabela 22 são apresentados os respetivos valores para cada *Setup* de ensaio. Já a Figura 43 apresenta a comparação desses dados num gráfico de barras. Os resultados teóricos são provenientes de análises por simulação numérica que constam no **Apêndice A**.

Tabela 22 - Comparação de Resultados 1ª Fase

<i>Setup</i>	Localização	Deslocamento Experimental Lido [mm]	Deslocamento Teórico CEI [mm]	Deslocamento Teórico INEGI [mm]
I - Carga 1000 kg	Ponte	0,21*	0,167	0,285
II - Carga 1000 kg	Montante	0,06	0,0115	0,0489
III - Carga 2800 kg (Peso Ponte)	Montante	0,21	0,185	Sem Dados

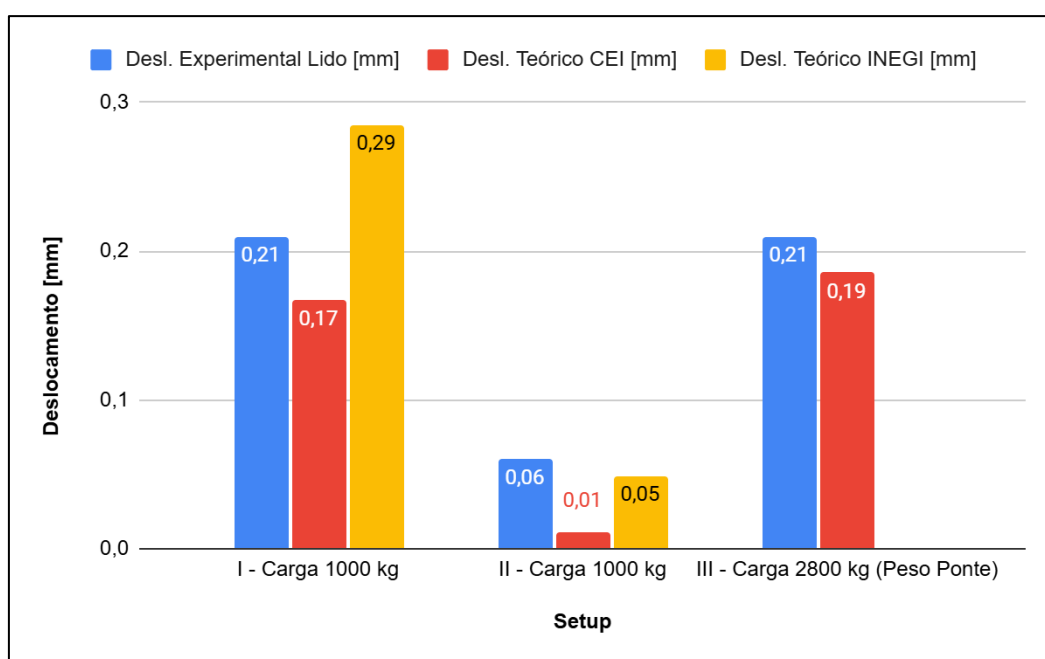


Figura 43 - Valores de Deslocamento Experimental vs Deslocamento Teórico (1ª Fase)

#### **Setup I – Carga de 1000 kg na Ponte**

No primeiro ensaio, o deslocamento experimental medido na ponte foi de **0,21** mm, enquanto o deslocamento teórico interno foi de **0,167** mm e a prevista pelo INEGI foi de **0,285** mm. Comparando a medição experimental com as obtidas pelos modelos numéricos verifica-se que esta se encontra entre os dois modelos, o que reforça a fiabilidade dos modelos. No entanto sugere também que fatores como ligações e outros aspetos de carga e geométricos podem diferenciar entre os dois modelos levando à diferença de deslocamentos registada.

\*Para se obter o valor real de deslocamento da ponte deve-se corrigir o valor de leitura de **0,21** mm com base no deslocamento sofrido pelos montantes. Esta correção pode ser feita através

do valor de deslocamento do **Setup II** de ensaio com a aplicação de **500 kg** no montante. Para este valor de carga os montantes deslocaram-se **0,02 mm**, pelo que o valor real de deslocamento da ponte corresponde a **0,19 mm** ao invés dos **0,21 mm**.

#### **Setup II – Carga de 1000 kg no Montante**

Para a aplicação de **1000 kg** no montante, o deslocamento medido foi de **0,06 mm**, enquanto a previsão teórica interna foi de **0,0115 mm** e a do INEGI **0,0489 mm**. O valor de deslocamento interno foi obtido comparando os deslocamentos sofridos pelo **Setup II** e **Setup III**, uma vez que, a diferença da deformação obtida nas simulações dos dois *Setups* é a real provocada apenas pela aplicação da carga externa.

#### **Setup III – Peso Próprio da Ponte no Montante**

Por fim, o **Setup III**, realizado apenas com o peso próprio da ponte aplicado sobre os montantes, resultou num deslocamento experimental de **0,21 mm** e a nível interno o deslocamento calculado foi de **0,185 m**.

De forma global, os resultados desta fase demonstram uma boa consistência entre medições experimentais e previsões teóricas, com diferenças justificáveis dentro da margem de erro esperada para estruturas complexas. A correção dos valores experimentais à luz dos dados adicionais recolhidos contribuiu para aumentar a precisão da análise, oferecendo uma base sólida para a calibração dos modelos numéricos utilizados em fases posteriores do projeto.

### **3.2.2. 2ª Fase de Ensaios Experimentais**

Nesta segunda fase de validação experimental da SCMM o principal objetivo de estudo é o comportamento estrutural global da ferramenta de trabalho sob diferentes configurações de carga e posicionamento angular. Pretende-se, assim, avaliar a resposta da estrutura a solicitações de carga mecânicas representativas das condições reais de operação, com foco na extremidade do *Spindle*.

Foram realizados **8 Setups** de ensaio, explorando diferentes configurações de posicionamento do equipamento. Para a introdução de carga na estrutura, recorreu-se a dois sistemas distintos: o **Sistema de Carga 1**, baseado num cilindro pneumático, e o **Sistema de Carga 2**, com base na utilização de um dinamómetro.

O **Sistema de Carga 1** é constituído por um **cilindro pneumático**, uma **rótula**, uma **célula de carga** e uma **peça de interface** adaptada à extremidade do *Spindle* (Figura 44). A **célula de carga**, com capacidade máxima de leitura de **500 kgf**, é o componente responsável pela medição da força aplicada durante os ensaios e a sua ficha técnica pode ser encontrada no **Anexo A**.

Por sua vez, o **Sistema de Carga 2** integra um **dinamómetro** e duas peças de interface: uma para **fixação ao solo** e outra para **ligação ao Spindle**, permitindo a aplicação controlada de forças de tração e compressão à estrutura (Figura 45 e Figura 46).

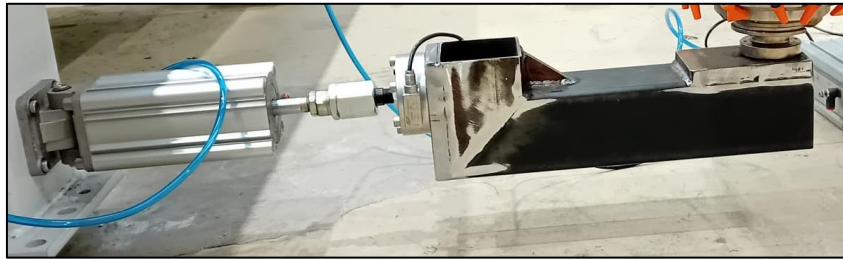


Figura 44 - Sistema de Carga 1



Figura 45 - Sistema de Carga 2



Figura 46 - Sistema de Carga 2 (cont.)

Foram aplicadas forças incrementais ao longo dos ensaios, tendo como valores de referência para recolha de dados os **50 kgf, 100 kgf, 150 kgf e 200 kgf**. A direção da aplicação da carga foi selecionada com base nas ferramentas de corte mais comuns neste tipo de equipamento, nomeadamente, discos e fresas, o que conduziu à definição de direções preferenciais de teste alinhadas com os eixos principais da máquina.

Os ensaios foram realizados com a cabeça do equipamento a meio vão tanto do **Eixo Y** e do **Eixo X**, segundo o **Eixo Z** a cabeça foi posicionada com a menor distância ao chão possível para os diferentes *Setups* de ensaio.

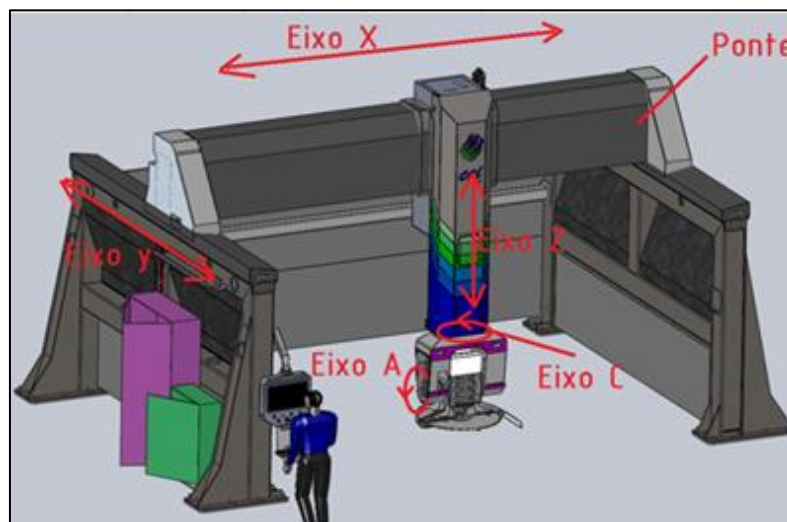


Figura 47 - Representação do Esquema de Ensaio Ideal



Figura 48 - Espaço dos Ensaios Experimentais

Numa fase posterior, ensaios adicionais serão conduzidos com o objetivo de **decompor o deslocamento global** medido na zona da ferramenta de trabalho, identificando quais as **cadeias de transmissão** e **subconjuntos estruturais** que mais contribuem para esse deslocamento. Para isso, será utilizada extensometria, permitindo caracterizar o contributo específico de cada interface no comportamento geral da estrutura.

## Procedimento Experimental

### Setup I e Setup II

No **Setup I**, foi instalado o **Sistema de Carga 1** conforme ilustrado na Figura 49, bem como o relógio comparador, posicionado de acordo com a Figura 50. Após a preparação da montagem, procedeu-se à realização do ensaio com o **avanço** do cilindro, tendo sido registados os valores apresentados na Tabela 23.

O **Setup II** seguiu o mesmo procedimento experimental, distinguindo-se apenas pela rotação do **Eixo C** em **180°**, com o objetivo de avaliar a simetria estrutural da cabeça da máquina face a uma inversão angular.



Figura 49 - Representação do Setup I e Setup II

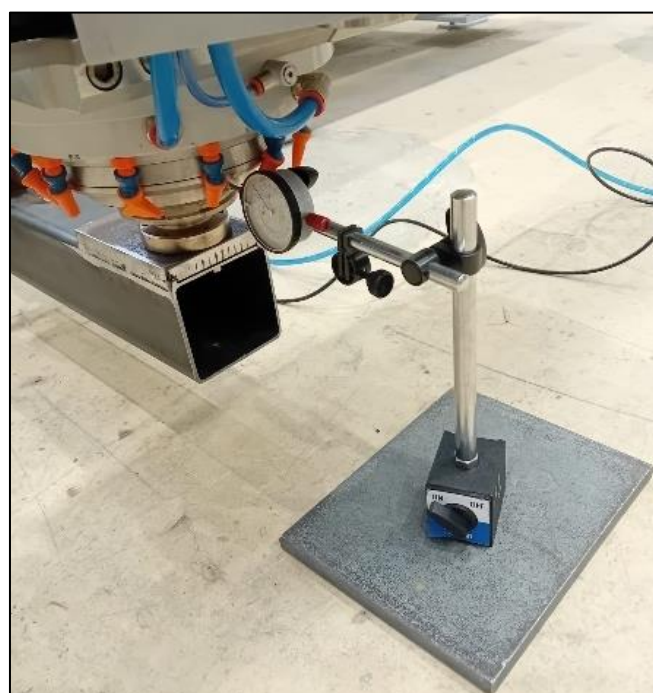


Figura 50 - Representação do Setup I e Setup II (cont.)

Tabela 23 - Deslocamentos Registrados do *Setup I* e *Setup II*

<i>Setup I</i> - Medição no <i>Spindle</i>		<i>Setup II</i> – Rotação de 180º do Eixo C - Medição no <i>Spindle</i>		Diferença de Medições [mm]
Carga Aplicada [kgf]	Deslocamento Real <i>Spindle</i> [mm]	Carga Aplicada [kgf]	Deslocamento Real <i>Spindle</i> [mm]	
50	0,80	50	0,77	0,03
100	1,45	100	1,55	0,10
150	2,20	150	2,20	0,00
200	2,90	200	3,03	0,13

Foi ainda possível registrar as diferentes amperagens do motor do **Eixo A** para os diferentes cenários de carga tendo sido obtidos os valores da Tabela 24.

Tabela 24 - Valores de Amperagem do Motor do Eixo A para o *Setup I*

<i>Setup I</i>	
Carga Aplicada [kgf]	Amperagem Motor Eixo A [A]
50	0,90
100	1,60
150	2,30
200	2,70

### ***Setup III, Setup IV e Setup V***

No ***Setup III***, foi utilizado o **Sistema de Carga 1**, conforme ilustrado na Figura 51, tendo o relógio comparador sido instalado de acordo com a Figura 52. Após a montagem do sistema, realizou-se o ensaio com o **avanço** do cilindro, tendo sido obtidos os resultados apresentados na Tabela 25.

O ***Setup IV*** seguiu o mesmo procedimento do ***Setup III***, diferenciando-se apenas pela alteração da posição de leitura do relógio comparador, conforme evidenciado na Figura 53.

Por fim, no ***Setup V***, procedeu-se à **inversão** da célula de carga, permitindo assim que o cilindro aplique carga no ***Spindle*** através do **recuo** da haste e não com o seu avanço.

Estes três *Setups* têm como principal objetivo estudar a influência do **Eixo A** nas medições obtidas, uma vez que com este posicionamento o Eixo A não tem influência, podendo ser comparado posteriormente com as medições efetuadas nos ***Setups I e II***.

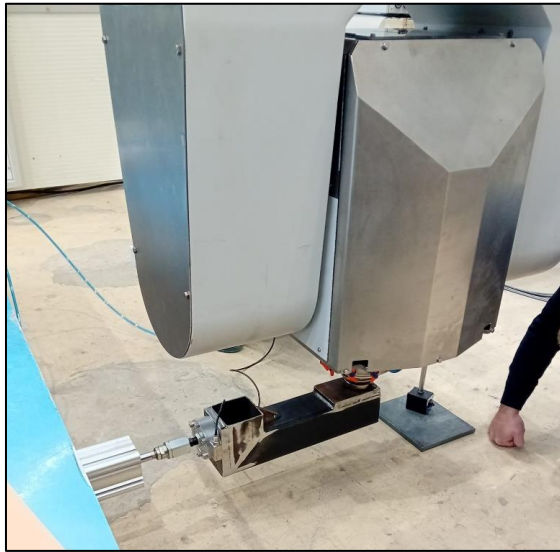


Figura 51 - Representação do Setup III

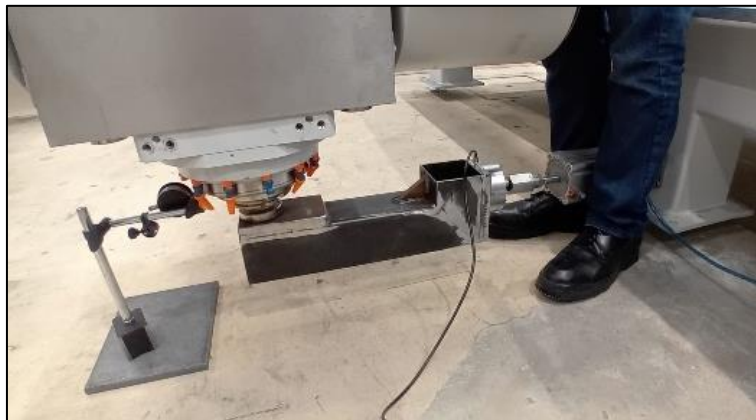


Figura 52 - Representação do Setup III (cont.)

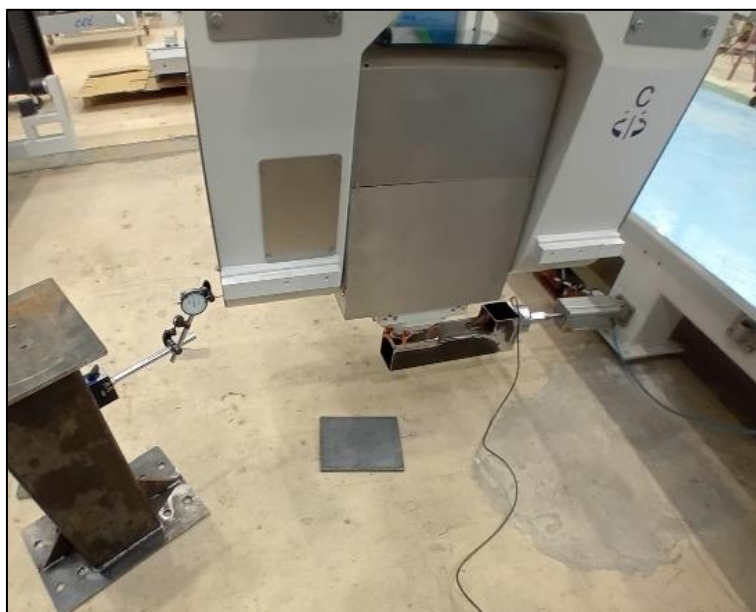


Figura 53 - Representação do Setup IV



Figura 54 - Representação do Setup V

Tabela 25 - Deslocamentos Registrados dos Setup III, Setup IV e Setup V

Setup III – Rotação de 90° do Eixo C - Medição no Spindle		Setup IV – Rotação de 90° do Eixo C - Medição na Estrutura da Cabeça		Setup V - Rotação de 90° do Eixo C - Medição na Estrutura da Cabeça – Inversão Célula de Carga		Diferença de Medições entre Setup IV e Setup V [mm]
Carga Aplicada [kgf]	Deslocamento Real Spindle [mm]	Carga Aplicada [kgf]	Deslocamento Real Estrutura [mm]	Carga Aplicada [kgf]	Deslocamento Real Estrutura [mm]	
50	0,78	50	0,60	50	0,65	0,05
100	1,44	100	1,12	100	1,37	0,25
150	2,08	150	1,68	150	2,05	0,37
200	2,78	200	2,19	200	2,70	0,51

### Setup VI

No **Setup VI**, foi utilizado o **Sistema de Carga 1** com a célula de carga **invertida**, de modo a aplicar carga com o **recuo** da haste do cilindro, conforme ilustrado na Figura 55. O relógio comparador foi instalado segundo a configuração apresentada na Figura 56. Concluída a preparação do sistema, realizou-se o ensaio, tendo sido obtidos os valores apresentados na Tabela 26.

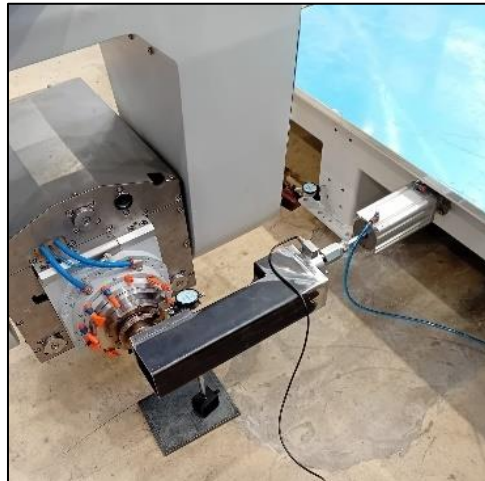


Figura 55 - Representação do Setup VI



Figura 56 - Representação do Setup VI (cont.)

Tabela 26 - Deslocamentos Registrados do Setup VI

Setup VI - Medição no <i>Spindle</i> – Inversão Célula de Carga	
Carga Aplicada [kgf]	Deslocamento Real <i>Spindle</i> [mm]
50	0,65
100	1,40
150	2,05
200	2,75

Após a realização do ensaio anterior, foi aplicada uma carga de **100 kgf** no *Spindle*. De forma distinta aos procedimentos anteriores, realizou-se um ensaio dinâmico, promovendo a deslocação do **Eixo Y** da máquina com a carga aplicada.

Para monitorização do comportamento estrutural, foram instalados dois relógios comparadores: um no **Montante** e outro diretamente no **Spindle**. Com a aplicação de um deslocamento controlado de **0,1 mm** através do controlador da máquina, verificou-se que o relógio comparador do **Montante** registou a totalidade do movimento, enquanto o relógio comparador colocado no **Spindle** indicou apenas **0,05 mm** de deslocamento, evidenciando assim uma alteração diferencial entre os dois pontos de leitura.

### **Setup VII**

No **Setup VII**, foi novamente utilizado o **Sistema de Carga 1**, conforme ilustrado na Figura 57, sendo o relógio comparador instalado de acordo com a configuração apresentada na Figura 58. Após a preparação do sistema, realizou-se o ensaio com o **avanço** do cilindro, tendo sido obtidos os resultados registados na Tabela 27.



Figura 57 - Representação do Setup VII

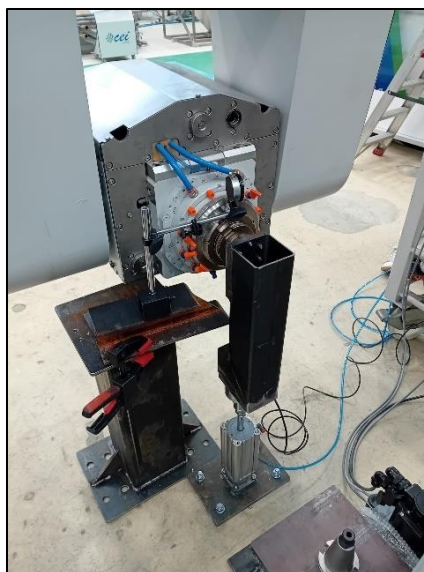


Figura 58 - Representação do Setup VII (cont.)

Tabela 27 - Deslocamentos Registrados do *Setup VII*

<i>Setup VII - Medição no Spindle</i>	
Carga Aplicada [kgf]	Deslocamento Real <i>Spindle</i> [mm]
50	0,10
100	0,26
150	0,40
200	0,54

Foi ainda registado o valor da amperagem do motor do **Eixo A** para o valor de carga de **200 kgf**, possuindo uma amperagem de **3,5 A**.

### **Setup VIII**

No **Setup VIII**, foi utilizado o **Sistema de Carga 2**, conforme ilustrado na Figura 59. Numa primeira fase do ensaio, aplicou-se uma força de **tração** à cabeça da máquina, através do movimento ascendente do dinamómetro. Numa segunda fase, foi aplicada **compressão**, recorrendo ao movimento descendente do mesmo. O relógio comparador foi instalado segundo a configuração apresentada na Figura 60. Os resultados obtidos durante ambas as fases do ensaio encontram-se registados na Tabela 28.

Figura 59 - Representação do *Setup VIII*



Figura 60 - Representação do Setup VIII

Tabela 28 - Deformações Registadas do Setup VIII

Setup VIII - Medição no <i>Spindle</i> – Movimento Tração Ascendente		Setup VIII - Medição no <i>Spindle</i> – Movimento Compressão Descendente	
Carga Aplicada [kgf]	Deslocamento Real <i>Spindle</i> [mm]	Carga Aplicada [kgf]	Deslocamento Real <i>Spindle</i> [mm]
50	0,13	20	0,07
75	0,19	30	0,12
110	0,30	40	0,15
120	0,33	50	0,20
150	0,39	60	0,23
170	0,45	70	0,26
180	0,49	80	0,29
190	0,51	90	0,31
200	0,53	100	0,34
		110	0,36
		120	0,38
		130	0,41
		140	0,44
		150	0,46
		160	0,49
		180	0,54
		190	0,57
		200	0,59

### Análise de Resultados

De igual forma à 1ª fase, foi elaborada uma comparação entre os valores de Deslocamento obtidos experimentalmente e os valores teóricos estimados, com o objetivo de avaliar a precisão das simulações numéricas e a fiabilidade dos ensaios realizados. Na Tabela 29 são apresentados os respetivos valores para cada configuração de teste considerada nesta 2ª fase. A Figura 61 complementa esta análise através da representação gráfica dos dados sob a forma de gráfico de barras, permitindo uma comparação visual direta. As previsões teóricas utilizadas resultam de simulações numéricas detalhadas, cuja metodologia e parâmetros estão descritos no **Apêndice B**.

Tabela 29 - Comparação de Resultados 2ª Fase

Setup	Localização de Medição	Deslocamento Experimental Lido [mm]	Deslocamento Teórico CEI [mm]	Deslocamento Teórica INEGI [mm]
I - Carga 200 kg	Spindle	2,90	0,208	0,116
II - Carga 200 kg	Spindle	3,03	0,192	0,116
III - Carga 200 kg	Spindle	2,78	0,592	0,247
IV - Carga 200 kg	Estrutura 5º Eixo	2,19	0,592	Sem Dados
V - Carga 200 kg	Estrutura 5º Eixo	2,7	0,563	
VI - Carga 200 kg	Spindle	2,75	0,402	
VII - Carga 200 kg	Spindle	0,54	0,0800	
VIII - Carga 200 kg (Ascendente)	Spindle	0,53	0,0800	
VIII - Carga 200 kg (Descendente)	Spindle	0,59	0,0750	

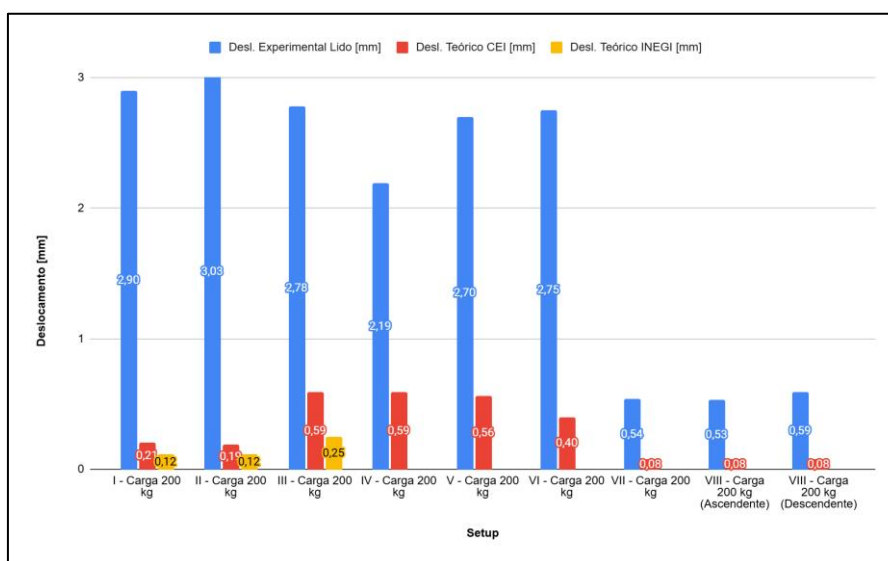


Figura 61 - Valores de Deslocamento Experimental vs Deslocamento Teórico (2ª Fase)

### **Setups I e II**

A comparação entre os **Setups I e II**, diferenciados apenas pela rotação de 180° do Eixo C, permite avaliar a simetria estrutural da cabeça da máquina. Os dados apresentados na Tabela 23 e na Tabela 29 revelam que, para cargas até **200 kgf**, os deslocamentos registados mantêm-se consistentes entre configurações, com variações máximas na ordem dos **0,13 mm**, o que confirma um comportamento estrutural aproximadamente simétrico.

No entanto, ao comparar os valores experimentais com os resultados do modelo numérico, verifica-se uma discrepância significativa. Para a mesma carga, o deslocamento real médio medido foi de aproximadamente **2,95 mm**, enquanto a previsão máxima teórica se limitou a cerca de **0,21 mm**. Esta diferença substancial é justificada pela abordagem adotada no modelo numérico, que considerou isoladamente a estrutura do 5.º eixo, ignorando o comportamento do conjunto completo da máquina. A estrutura foi fixada nos seus pontos de apoio e a carga foi aplicada diretamente, sem considerar a presença de elementos mecânicos auxiliares, como ligações entre subconjuntos, folgas, zonas de contacto, ou a flexibilidade dos sistemas de fixação.

É, portanto, natural que o modelo subestime o deslocamento real, uma vez que não incorpora componentes com jogo axial e radial, nem simula os efeitos de dissipação de energia que ocorrem nas interfaces mecânicas da máquina. Estes resultados reforçam a necessidade de integrar esses fatores nos modelos futuros, de forma a melhorar a sua capacidade de representar o comportamento estrutural do sistema completo de forma mais fidedigna.

### **Setups III, IV e V - Influência do Eixo A**

Nestes ensaios, o principal objetivo foi avaliar o impacto do **Eixo A** no comportamento estrutural, procurando anular a sua influência direta. O **Setup V**, que se distingue pela inversão da célula de carga (movimento de recuo da haste em vez de avanço), revelou deslocamentos muito próximos às observadas no **Setup IV**. As pequenas discrepâncias registadas podem ser atribuídas às diferenças na forma de aplicação da carga, uma vez que o sentido da solicitação influencia o comportamento das folgas e das interfaces mecânicas.

À medida que a carga aumenta, a diferença entre os resultados dos **Setups IV e V** também se acentua, atingindo **0,51 mm** para os **200 kgf**. Este aumento poderá indicar a presença de ligeiras assimetrias estruturais internas ou pequenas folgas nos componentes móveis, que se tornam mais expressivas sob cargas elevadas.

De forma geral, os resultados indicam que, na configuração testada, o **Eixo A** não tem uma influência significativa nos deslocamentos medidos. Esta constatação valida a consistência dos dados obtidos nos **Setups I e II**, reforçando a fiabilidade das medições realizadas com diferentes orientações do sistema.

Tal como verificado anteriormente, observa-se novamente um desvio considerável entre os resultados experimentais e as previsões do modelo numérico.

### **Setup VI - Efeito do Posicionamento Angular**

No **Setup VI** foi avaliada a aplicação de carga por tração, com a haste do cilindro em retração. Os resultados obtidos revelam deformações semelhantes às registradas no **Setup III**, em que a haste se encontrava em avanço, bem como na configuração com o **Spindle** em posição vertical.

Conclui-se, assim, que a orientação angular do **Spindle** - vertical ou horizontal - não teve impacto significativo nos deslocamentos medidos, evidenciando um comportamento estrutural globalmente coerente independentemente da posição do componente.

À semelhança dos ensaios anteriores, o modelo numérico subestima os valores de deslocamento observados experimentalmente. Esta tendência confirma as limitações previamente identificadas na modelação e reforça a necessidade de considerar, em simulações futuras, os efeitos reais associados à montagem, folgas e flexibilidade dos componentes.

### **Comportamento Dinâmico com Deslocamento do Eixo Y**

Neste ensaio complementar, realizado após o **Setup VI**, foi imposto um deslocamento controlado de **0,1** mm no **Eixo Y**, com o objetivo de avaliar a resposta dinâmica do conjunto. Os resultados mostraram que apenas **0,05** mm desse deslocamento se traduziu no **Spindle**, enquanto o montante absorveu a totalidade do movimento.

Este comportamento sugere que uma parte significativa do deslocamento é dissipada pela deformação interna da cabeça da máquina. Tal evidência sublinha a importância de compreender a rigidez relativa entre componentes fixos e móveis, particularmente em operações que envolvem movimentos rápidos ou forças de corte variáveis, onde a interação entre elementos estruturais pode afetar diretamente a precisão e repetibilidade do sistema.

### **Setup VII**

No **Setup VII**, a carga foi aplicada numa configuração espacial da cabeça considerada estruturalmente mais favorável. Os resultados experimentais confirmaram essa expectativa: os deslocamentos registados foram substancialmente inferiores aos observados em *Setups* anteriores sob a mesma carga, com destaque para o valor de **0,54** mm a **200** kgf. Este desempenho reforça a influência direta da posição da cabeça no espaço e do percurso da força aplicada na rigidez global do sistema, promovendo uma distribuição mais eficiente das tensões.

Tal como nos casos anteriores, a simulação numérica apresentou valores de deslocamento consideravelmente inferiores aos medidos experimentalmente, refletindo novamente as limitações do modelo atual em captar os efeitos reais de montagem, flexibilidade e interação entre componentes.

Conclui-se que a configuração espacial da cabeça e a direção de aplicação da carga são fatores determinantes no comportamento estrutural do conjunto, podendo ser otimizados para melhorar a rigidez e o desempenho da máquina.

### **Setup VIII - Sistema de Carga Alternativo**

O **Setup VIII** introduziu um novo sistema de carga (Sistema de Carga 2), permitindo avaliar a influência do método de aplicação de força. Compararam-se ensaios em tração e compressão

e, apesar de pequenas variações - nomeadamente uma resposta ligeiramente mais estável em compressão, sobretudo para cargas baixas - os resultados obtidos com este novo sistema mostraram-se altamente consistentes com o do **Setup VII**, realizados com o Sistema de Carga 1.

Esta consistência entre os métodos valida a **repetibilidade e fiabilidade dos dados experimentais recolhidos** e demonstra a utilidade do Sistema de Carga 2 como ferramenta complementar para simular diferentes condições reais de operação, com a vantagem adicional de permitir controlar a aplicação da carga com maior precisão e adaptabilidade.

### **Considerações sobre a Amperagem do Eixo A**

A monitorização da corrente elétrica no motor do **Eixo A**, conforme apresentado na Tabela 24, evidenciou uma relação direta entre o aumento da carga aplicada e o esforço mecânico exigido pelo motor. Os valores registados variaram progressivamente de **0,90 A** para uma carga de **50 kgf** até **2,70 A** para **200 kgf**, refletindo o acréscimo da resistência estrutural enfrentada. Esta medição assume especial importância para fases futuras do estudo, pois permitirá correlacionar os esforços reais de corte com os dados experimentais de deslocamento.

### **3.2.3. Principais Conclusões dos Ensaios Efetuados**

#### **Resumo da 1.ª Fase**

Os ensaios realizados com cargas aplicadas sobre a ponte e os montantes revelaram uma boa concordância entre os resultados experimentais e as previsões fornecidas pelos modelos numéricos. As deformações medidas situaram-se, em geral, dentro dos intervalos esperados, validando a abordagem teórica inicial. Ajustes que incluíram a consideração de deslocamentos adicionais nos montantes mostraram-se eficazes para aumentar a precisão da análise. Este comportamento indica que, embora os modelos apresentem um desempenho robusto, ainda existe margem para refinar a representação de fenómenos locais, como as ligações e as condições de apoio, com vista à melhoria do desempenho estrutural global. Estes resultados sugerem que, com ajustes focados nos elementos críticos, será possível otimizar as estruturas envolventes, reduzindo rigidez excessiva ou reforçando zonas subdimensionadas.

#### **Resumo da 2.ª Fase**

Na segunda fase, os ensaios centraram-se na avaliação do comportamento da cabeça da máquina sob diferentes condições de carga e orientação, permitindo identificar fatores que impactam diretamente a sua simetria estrutural e a sua resposta mecânica. Os dados obtidos evidenciaram uma elevada sensibilidade à forma como a carga é aplicada e à posição relativa dos componentes. Em particular, notou-se que o eixo A tem um efeito desprezável, mas que o conjunto estrutural é significativamente influenciado por folgas, deformações locais e flexibilidade nos componentes móveis, como patins lineares e rolamentos. O facto de os valores experimentais excederem as previsões do modelo numérico de forma sistemática aponta para a necessidade de integrar essas variáveis nos modelos em estudo, como passo essencial para a sua utilização em futuras estratégias de otimização.

Além disso, a introdução de um sistema alternativo de carga confirmou a fiabilidade dos resultados e a repetibilidade dos ensaios. A correlação observada entre a corrente do motor do eixo A e os esforços mecânicos aplicados constitui uma ferramenta adicional para calibração e ajuste futuro dos modelos.

### **Conclusão Geral**

Em síntese, os ensaios efetuados não só validaram parcialmente os modelos existentes como também revelaram limitações importantes na sua capacidade de representar o comportamento real da estrutura. Esta constatação reforça a utilidade dos dados experimentais como base para identificar oportunidades de otimização das estruturas envolventes, seja por via da reformulação geométrica, da seleção de materiais, ou da revisão das ligações e apoios.

Importa, no entanto, destacar que os valores de deslocamento registados nos ensaios, embora algo elevados face às cargas aplicadas, não parecem estar diretamente associados à deformabilidade das estruturas metálicas envolventes. Pelo contrário, os resultados sugerem que a principal origem desses deslocamentos reside em elementos mecânicos com folgas internas como o rolamento de apoio ao *Spindle* do eixo A, patins lineares nos eixos Z, Y e X, apoios do fuso de esferas do eixo Z e motorreductores dos eixos A e C.

Desta forma, a precisão da máquina poderá estar condicionada menos pela rigidez da estrutura e mais pelo comportamento dos componentes móveis e de ligação. Assim, justifica-se a realização de ensaios adicionais, dirigidos à análise individualizada destes componentes, com o objetivo de quantificar o seu contributo para os deslocamentos observados e, consequentemente, identificar quais os elementos críticos a otimizar.

## **3.3. Eficiência Energética do Equipamento**

Este capítulo apresenta a avaliação da eficiência energética do equipamento CNC SCMM, com base em medições experimentais e análise dos principais sistemas. Foram realizadas medições do consumo elétrico dos motores dos cinco eixos, acompanhadas pela descrição técnica de cada tipo de motor. Adicionalmente, efetuou-se um ensaio ao sistema de ar comprimido para avaliar consumos. São ainda analisadas as diferentes soluções de corte aplicáveis ao equipamento e, por fim, é apresentado um sistema em desenvolvimento para a recuperação e regeneração de energia durante o funcionamento.

### **3.3.1. Monitorização do Consumo Energético do Equipamento**

Nesta secção apresenta-se o levantamento inicial do consumo elétrico dos motores dos cinco eixos do equipamento CNC SCMM, realizado em condições de funcionamento em vazio, ou seja, sem carga de corte. O objetivo desta medição foi obter uma estimativa do consumo base associado ao movimento dos eixos e estimar a PC da movimentação dos mesmos.

As medições realizaram-se a uma velocidade uniforme de **20 m/min**, exceto para o eixo Z onde a velocidade utilizada foi de **7,5 m/min**. Os eixos foram movimentados de forma isolada sem

nenhuma ferramenta de corte instalada e foram registados os valores de corrente média e de pico conforme ilustrado na Tabela 30.

Tabela 30 - Consumo Energético dos Eixos em Vazio

Eixo	Corrente Média [A]	Corrente de Pico [A]	Observações
X	3,0	5,5	Esforço moderado, uma vez que o eixo movimenta a massa correspondente à interface do 5.º eixo e ao próprio subconjunto rotativo.
Y	4,0	11,0	Pico de corrente elevado, decorrente do esforço necessário para movimentar a massa significativa do conjunto da ponte ao longo do eixo.
Z	1,0 (Mov. Descendente) 21,0 (Mov. Ascendente)	21,0	Elevado esforço na subida, resultante da necessidade de vencer a força gravitacional aplicada à massa do conjunto móvel do eixo.
C	7,0 – 8,0	-	Corrente praticamente constante, indicativa da manutenção de binário necessário para o posicionamento estático; o consumo mantém-se equivalente em ambos os sentidos de rotação do eixo.
A	-	3,5	Registam-se variações acentuadas na corrente em função da orientação do <i>Spindle</i> . A exigência energética é reduzida durante a rotação para a posição vertical, mas aumenta significativamente quando é necessário reposicionar o <i>Spindle</i> na orientação horizontal, devido ao esforço adicional associado à elevação do conjunto.

A partir das correntes medidas em vazio para cada eixo, é possível estimar a potência consumida aplicando a Equação (2), assumindo um fator de potência de 0,9. Multiplicando esta potência pelo tempo de operação, obtém-se a energia consumida (em kWh), que permite calcular a PC associada com base no fator de emissão nacional ( $0,169 \frac{kgCO_2e}{kWh}$ ) e na Equação (1). Este cálculo permite quantificar as emissões mesmo durante o funcionamento não produtivo do equipamento, fornecendo dados úteis para identificar oportunidades de otimização energética (Tabela 31).

$$P = V \times I \times \cos(\phi) \quad (2)$$

Tabela 31 - Emissões Associadas à Movimentação dos Eixos em Vazio

Eixo	Corrente Média/Pico(A)	Tensão (V)	Energia Média consumida em 24 h [kWh]	Energia de Pico consumida em 24 h [kWh]	Emissão Corrente Média [kgCO <sub>2</sub> e]	Emissão Corrente de Pico [kgCO <sub>2</sub> e]
X	3,0/5,5	220	14,26	26,13	2,41	4,42
Y	4,0/11,0	220	19,01	52,27	3,21	8,83
Z	1,0/21,0	220	4,75	99,79	0,80	16,87
C	7,5/-	220	35,64	-	6,02	-
A	-/3,5	220	-	16,63	-	2,81
<b>Total</b>	-	-	<b>73,66</b>	<b>214,82</b>	<b>12,44</b>	<b>32,93</b>

Estava prevista, a realização de uma simulação de corte ou fresagem em condições reais, com o objetivo de analisar o consumo de corrente dos motores. Esta análise seria de grande importância futura para validar o dimensionamento dos acionamentos e otimizar a eficiência energética do equipamento em operação real.

### 3.3.2. Eficiência dos Motores e Movimentação dos Eixos

Esta secção apresenta uma descrição técnica dos motores que compõem o sistema de acionamento do equipamento CNC SCMM, com ênfase nas suas principais características construtivas e funcionais. São abordados aspetos como o tipo de motor utilizado, os princípios de funcionamento, a relação com os redutores aplicados e o seu comportamento em regimes típicos de operação. Esta análise visa compreender as particularidades dos motores que atuam sobre os eixos lineares e rotativos da máquina, contribuindo para uma melhor perceção do seu papel no desempenho energético e na precisão do sistema.

#### Servomotores

Os servomotores são os motores elétricos mais utilizados na aplicação em máquinas CNC, no entanto, podem ser encontrados noutras aplicações comerciais e industriais. São descritos como motores de precisão com capacidade de fornecer um binário constante numa larga gama de velocidades (Figura 62).



Figura 62 - Ilustração de um Servomotor [64]

Os servomotores funcionam em conjunto com outros dispositivos num sistema em malha fechada. Fazem parte deste conjunto o respetivo servomotor, uma unidade de controlo, um amplificador/*drive* e um sensor de posição. A unidade de controlo funciona como cérebro do circuito, onde através da constante recolha de informação é possível controlar a velocidade e posição do servomotor. Os sensores de posição normalmente aplicados em servomotores são os *encoders*. Este aparelho eletromagnético, normalmente acoplado no motor interno do servomotor, transforma a posição lida num sinal elétrico, que transformado em informação binária chegará à unidade de controlo, que interpretará a informação. O amplificador/*drive* faz a comunicação entre a unidade de controlo e o servomotor [65].

Existem vários tipos de servomotores e face à aplicação necessária, existem vários parâmetros que os caracterizam:

- Corrente Alternada (CA) ou Corrente Contínua (CC)
- Com Escovas ou Sem Escovas
- Campo Rotativo Síncrono ou Campo Rotativo Assíncrono

### **Corrente Alternada VS Corrente Contínua**

A principal diferença na utilização de corrente alternada ou corrente contínua, assenta na capacidade de controlo da velocidade do motor. Existem exemplos de ambas aplicações no setor industrial, no entanto, os motores de CA conseguem suportar correntes elétricas mais altas, tendo assim uma área de aplicação maior na indústria. Para além disso os motores de CC precisam de um retificador entre o transformador e o motor para transformar a corrente alternada em corrente contínua [65].

### **Com Escova VS Sem Escova**

A comutação elétrica, é o processo de transferência de uma corrente elétrica de um circuito para outro. Esta comutação nos servomotores é feita por intermediário de sistemas com escovas ou sem escovas. A utilização de escovas, normalmente de carvão, promove o contacto mecânico entre o rotor do motor e as escovas, onde no caso de um sistema sem escovas a comutação é realizada eletronicamente sem contacto mecânico através de ímanes. Por norma os motores com escovas são mais económicos e simples de operar, mas dada a presença de contacto mecânico não são tão fiáveis como motores sem escovas, sendo estes mais eficientes produzindo menor quantidade de ruído. Os servomotores de CC, utilizam este parâmetro como principal forma de distinção [65].

### **Campo Rotativo Síncrono VS Campo Rotativo Assíncrono**

Os campos magnéticos produzidos por um motor influenciam as respetivas velocidades de saída dos mesmos. Num motor com campo rotativo síncrono, o motor opera em sincronia com a frequência da rede elétrica, criando um campo magnético cuja velocidade de rotação é a mesma do campo magnético da rede elétrica. Deste modo, o rotor teoricamente, desprezando forças de atrito de rolamentos, terá uma velocidade de rotação de saída igual à do campo magnético criado pelo estator do motor. Já um motor com campo rotativo assíncrono, também denominado motor de indução, opera a uma velocidade de rotação ligeiramente inferior à frequência da rede elétrica. Devido a esta ligeira diferença de velocidades de campos magnéticos dá-se um efeito de “escorregamento”, fomentando a produção de um binário que impulsiona o rotor a girar na mesma direção do campo magnético do estator. Esta é uma classificação mais comum dos servomotores de CA [65].

Os servomotores, de modo geral, apresentam boas vantagens para a sua utilização na indústria CNC. Com uma grande precisão de posicionamento graças ao seu sistema de controlo incorporado serão capazes de produzir movimentos rigorosos. Com a sua capacidade de fornecer um binário constante numa larga gama de velocidades e com a capacidade de regular esse binário, poderão abranger várias aplicações industriais. No entanto, estes equipamentos

serão uma solução economicamente mais cara, com uma programação necessária associada [66].

A Tabela 32 apresenta os servomotores e respectivos redutores utilizados em cada eixo do equipamento, juntamente com as suas principais características técnicas.

Tabela 32 - Características dos Conjuntos de Motorreduzores dos Eixos do Equipamento

Eixo	Servomotor	Características do Motor	Redutor	Características do Redutor
X	MIGE 130ST-M15025	Potência Nominal: 3,8 kW Tensão Nominal: 220 V Corrente Nominal: 13,5 A Velocidade Nominal: 2500 rpm Binário de Retenção: 15 N.m Binário de Pico: 30 N.m Inércia do Rotor: $2,77 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ Peso: 11,70 kg	APEX DYNAMICS - AF100	Relação de Redução (i): 10 Binário Nominal de Saída: 230 N.m Eficiência: 97%
Y	2 x MIGE 130ST-M15025		2 x APEX DYNAMICS - AF100	Relação de Redução (i): 12 Binário Nominal de Saída: 290 N.m Eficiência: 94%
Z	MIGE 130ST-M15025 c/ travão		Dynabox 90º 45	Relação de Redução (i): 5,2 Binário Nominal de Saída: 80 N.m Eficiência: 93%
C	MIGE 130ST-M15025		NABTESCO RDS100C	Relação de Redução (i): 258 Binário Nominal de Saída: 980 N.m Eficiência: 85%
A	MIGE 130ST-M04025		Potência Nominal: 1,0 kW Tensão Nominal: 220 V Corrente Nominal: 4,0 A Velocidade Nominal: 2500 rpm Binário de Retenção: 4 N.m Binário de Pico: 12 N.m Inércia do Rotor: $0,85 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ Peso: 6,20 kg	STÖBER K102ME20 + NEUGART PLFN140

### Recuperação e Regeneração de Energia

A regeneração de energia em sistemas CNC representa uma oportunidade significativa para a melhoria da eficiência energética, sobretudo em operações caracterizadas por ciclos repetitivos de aceleração e desaceleração. Em vez de se dissipar a energia cinética gerada durante a travagem, esta pode ser recuperada e reutilizada, reduzindo o consumo de energia da rede elétrica e o impacto térmico sobre os componentes.

### Princípios de Regeneração de Energia

A regeneração de energia consiste em aproveitar a energia cinética produzida durante a desaceleração ou movimento descendente dos eixos do equipamento CNC. Tradicionalmente, essa energia é dissipada através de resistências de travagem, gerando calor. No entanto, tecnologias modernas permitem a sua recuperação e reutilização dentro do próprio sistema.

No caso do equipamento SCMM, este processo está a ser desenvolvido com base num sistema de controlo que utiliza as unidades *InoDrive* do equipamento. As *InoDrives* são acionamentos inteligentes que, para além do controlo de motores, integram funcionalidades de regeneração de energia elétrica durante as fases de travagem.



Figura 63 - Sistema de *Inodrives* (à esquerda) vs Sistema de Resistências (à direita)

Em vez de dissipar a energia regenerada em resistências, o sistema desenvolvido canaliza essa energia para uma *InoDrive* adicional, que atua como um **banco de energia interno**. Este módulo armazena temporariamente ou redistribui a energia para outras *InoDrives* que controlam os eixos em funcionamento, permitindo o seu reaproveitamento imediato.

O processo de regeneração pode ser resumido nas seguintes etapas:

- **Deteção da energia regenerada:** Durante a desaceleração, os motores funcionam como geradores, produzindo energia elétrica que é captada pelas *InoDrives*;
- **Armazenamento ou redistribuição:** A energia é desviada para a *InoDrive* extra, sendo armazenada temporariamente ou distribuída em tempo real para outros motores;
- **Utilização da energia recuperada:** A energia realimentada reduz o consumo proveniente da rede elétrica, aumentando a eficiência energética global.

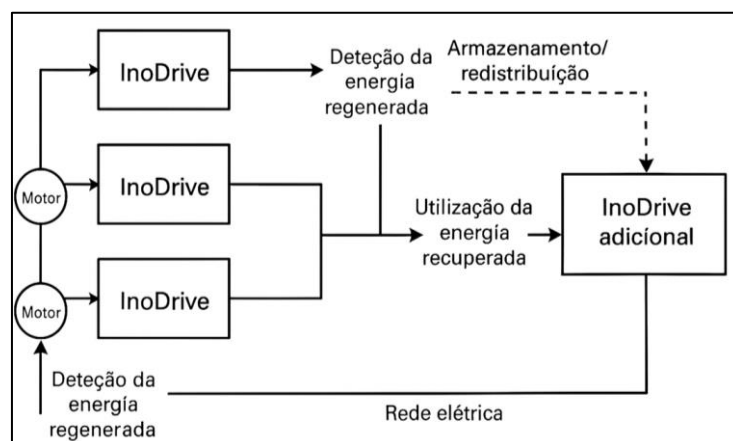


Figura 64 - Fluxo de Energia entre *InoDrives*

A principal dificuldade na utilização da *InoDrive* adicional reside na fase de realimentação de corrente para o sistema. Para que o processo seja seguro e eficiente, a energia recuperada deve ser injetada em perfeita sincronização com o consumo instantâneo dos outros eixos. Caso a realimentação ocorra fora de fase, ou seja, quando não há necessidade imediata de energia nos acionamentos ativos, pode ocorrer um desequilíbrio no barramento de corrente contínua, resultando em sobrecargas ou mesmo curtos-circuitos. Por isso, o controlo preciso da temporização e da quantidade de energia redistribuída é essencial para evitar falhas no sistema e garantir a sua estabilidade operacional. Este processo, além de reduzir o consumo energético, minimiza a dissipação térmica e a necessidade de sistemas de refrigeração associados às resistências, contribuindo para a durabilidade dos componentes eletrónicos.

Com o objetivo de contextualizar e justificar a adoção do sistema baseado em *InoDrives* desenvolvido nesta investigação, apresenta-se a seguir na Tabela 33 uma comparação com outras arquiteturas comuns de gestão de energia em sistemas de acionamento. A análise considera critérios técnicos, funcionais e operacionais que influenciam diretamente a eficiência energética, a complexidade de implementação e a robustez do sistema. São incluídos na comparação: o sistema tradicional com resistências de calor, os inversores regenerativos com retificador PWM, o Sistema de Recuperação de Energia com Armazenadores de Energia (SREA), e o sistema proposto com *InoDrives* [67].

Tabela 33 - Arquiteturas de Gestão de Energia [67]

Critério	Resistências de Calor	Retificador PWM	SREA	Sistema com <i>InoDrives</i>
Reutilização de Energia	Não	Parcial	Sim	Sim
Complexidade de Implementação	Baixa	Alta	Média/Alta	Média
Custo de Implementação	Baixo	Alto	Alto	Moderado
Impacto Térmico	Elevado	Reduzido	Reduzido	Mínimo
Ride-through	Nulo	Limitado	Elevado	Elevado
Correção de Fator de Potência	Não	Sim	Não	Não (mas neutro)
Armazenamento Externo Necessário	Não	Não	Sim	Não

A análise comparativa entre o sistema baseado em InoDrives e os modelos tradicionais evidencia que a abordagem proposta nesta investigação representa um compromisso eficiente entre simplicidade, reaproveitamento energético e robustez operacional. Ao integrar funções de regeneração e redistribuição de energia diretamente nos acionamentos, elimina-se a necessidade de componentes externos complexos, mantendo a eficácia energética de sistemas mais sofisticados como o SREA, mas com uma implementação mais acessível e adaptada à realidade de máquinas CNC.

### 3.3.3. Análise do Sistema de Ar Comprimido

Com o objetivo de caracterizar o consumo de ar comprimido do equipamento CNC em estudo, foi conduzido um ensaio com o sistema energizado, mas sem execução de operações, ou seja, sem movimentação dos eixos. Esta condição permite simular o comportamento do equipamento em regime de *standby*, refletindo a sua condição típica de espera operativa. Importa salientar que, mesmo na ausência de atividade produtiva, o sistema de ar comprimido permanece em funcionamento contínuo, mantendo um consumo constante. Este fenómeno resulta do projeto do próprio equipamento, que exige pressão de ar mínima para garantir o correto funcionamento do mesmo.

Durante o ensaio, com duração total de **68 minutos**, foi utilizado o sistema de monitorização AMS (*Acquisition and Monitoring System*), que registou em tempo real os dados apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Dados Registados do Consumo de Ar Comprimido

Parâmetro	Valor
Tempo de Ensaio	68 min
Temperatura Média do Ar	22,82 °C
Pressão Antes do Consumo	0,405 MPa
Pressão Durante o Consumo	0,381 MPa
Consumo Instantâneo Médio	140,38 L/min
Consumo Total	9570 L

Foi possível verificar que quando se realizou a operação de troca de ferramenta o consumo de ar comprimido aumentou, uma vez que se ativou um sistema complementar do equipamento, elevando o valor de consumo instantâneo tendo um pico de **232 L/min**.

Para quantificar a PC associada a este consumo, é necessário estimar a energia elétrica requerida para produzir este volume de ar comprimido. Com base na potência nominal e no tempo de operação, pode-se calcular a energia consumida e aplicar o fator de emissão correspondente para obter as emissões de  $CO_2$  e relacionadas. Utilizando a Equação (3) é possível determinar a potência pneumática necessária para o correto fornecimento de ar comprimido ao sistema.

$$P_{pne} = \frac{P \cdot Q}{\eta} \quad (3)$$

Onde  $P$  corresponde à pressão durante o consumo em Pa,  $Q$  ao caudal de fornecimento necessário em  $m^3/s$  e  $\eta$  ao rendimento do sistema. Temos para os dados apresentados na Tabela 34, o seguinte valor de potência pneumática.

$$P_{pne} = \frac{381000 \cdot \frac{140,38}{60} \times 10^{-3}}{0,7} = 1273,45 \text{ W} \approx 1,30 \text{ kW} \quad (4)$$

Para obter o valor das emissões podemos utilizar o fator de emissão nacional ( $0,169 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$ ) e para o cálculo a Equação (1).

$$Emissões = 1,30 \text{ kWh} \times 0,169 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \approx 0,22 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5)$$

Embora o valor absoluto de emissões durante o período de ensaio pareça reduzido, é importante considerar a frequência com que o equipamento opera ao longo de uma jornada de trabalho ou de um ano. Se efetuarmos o cálculo das emissões para um período de 24 horas nas mesmas condições do ensaio, este valor de emissão invisível acresce para aproximadamente **5  $\text{kgCO}_2\text{e}$** . Um consumo contínuo, ainda que modesto por minuto, pode representar um impacto significativo em termos energéticos e ambientais ao longo do tempo.

### 3.3.4. Desempenho Operacional e Limitações Práticas do Sistema de Corte com Disco Diamantado

A eficiência do sistema de corte e das ferramentas utilizadas é essencial para garantir o bom desempenho do equipamento, impactando diretamente no rendimento, na qualidade do produto e na redução de perdas. Este capítulo descreve e analisa o desempenho das ferramentas e utensílios de corte, considerando a sua eficácia, manutenção e impacto na produtividade.

#### Disco Diamantado

O disco de corte diamantado é uma ferramenta amplamente utilizada no corte de rochas ornamentais. Esta ferramenta consiste num núcleo metálico, normalmente de aço, ao qual são soldados segmentos que contêm diamantes industriais (Figura 65). Estes segmentos são compostos por uma matriz metálica, frequentemente à base de bronze, cobalto, estanho, tungstênio ou níquel, que incorpora partículas de diamante cujos tamanhos podem variar entre  $150$  e  $1000 \mu\text{m}$ . O diâmetro do disco varia consideravelmente conforme a espessura do material a ser seccionado, podendo ir de  $300 \text{ mm}$  até  $4 \text{ metros}$  [68].



Figura 65 - Disco Diamantado

Os discos diamantados são caracterizados por apresentarem elevada eficiência de corte. Os principais fatores que afetam a qualidade do corte e a durabilidade da lâmina estão relacionados com as propriedades da matriz metálica e constituição dos diamantes utilizados bem como nas condições de operação do disco [68].

Existem três tipos fundamentais de discos diamantados [69]:

- Borda contínua: recomendados para cortes precisos e delicados (Figura 66 ao centro);
- Segmentado com ranhuras normais: permite maior refrigeração e remoção de resíduos no corte de materiais brutos, que exigem menos acabamento de corte (Figura 66 à esquerda);
- Segmentado com ranhuras reduzidas: utilizado em situações específicas, onde se requer menor agressividade de corte e uma grande velocidade (Figura 66 à direita).



Figura 66 - Tipos de Discos Diamantados

De forma geral diamantes sintéticos são geralmente preferidos por permitirem controlo preciso sobre o seu tamanho e formato durante a produção. Por outro lado, os diamantes naturais, embora possuam formas mais irregulares, apresentam vantagens como melhor retenção na matriz metálica, arestas de corte mais agudas e maior estabilidade térmica. Relativamente ao tamanho dos grãos de diamante, grãos menores são mais indicados para materiais duros, pois proporcionam maior resistência à compressão e ao impacto, enquanto grãos maiores, nesse tipo de rocha, tendem a ter menor penetração e são mais suscetíveis ao desgaste precoce. A concentração de diamantes no segmento também é um parâmetro crítico: maior concentração resulta numa maior durabilidade, mas também eleva o custo da ferramenta e o consumo de energia devido ao aumento da fricção. Deste modo, é fundamental procurar um equilíbrio criterioso na seleção dos componentes, pois a escolha inadequada do tipo de diamante, do seu tamanho, concentração ou da matriz pode resultar num desgaste precoce da ferramenta de trabalho [68].

A Tabela 35 resume os principais tipos de discos diamantados de acordo com o seu método de fabrico. Cada tipo apresenta características específicas que influenciam diretamente no desempenho, durabilidade e aplicação do disco. Além disso, fatores como o tipo de material a ser cortado, o equipamento disponível e as condições de trabalho (como uso com ou sem água) devem ser considerados na escolha do disco mais adequado para cada situação.

Tabela 35 - Tipos de Discos Diamantados [68]

Tipo de Disco Diamantado	Método de Fabrico	Vantagens	Limitações	Aplicações Recomendadas
<b>Totalmente sinterizado</b>	Segmentos e núcleo sinterizados juntos	Fabrico simples	Diâmetro limitado ( $\leq 400$ mm); baixa resistência a altas cargas	Cortes de baixa a média intensidade
<b>Soldado a prata</b>	Segmentos diamantados soldados ao núcleo com prata	Boa aderência; adequado para o corte de diversos materiais	Só pode ser usado com refrigeração a água; risco de arranque em cortes a seco	Cortes húmidos; média intensidade
<b>Soldado a laser</b>	Segmentos soldados com tecnologia a laser	Alta resistência térmica; permite cortes a seco em alta velocidade	Custo mais elevado	Cortes secos; alta intensidade e precisão

### Mecanismo de Corte com Disco Diamantado

O mecanismo de corte de rochas ornamentais com discos diamantados baseia-se na interação entre os grãos de diamante do disco e a superfície da rocha, provocando fratura e remoção de material. Este processo não é simplesmente um "corte", como em materiais dúcteis como os metais, mas sim uma trituração seguida por fraturas características de materiais frágeis, com base nas seguintes etapas [68]:

- **Trituração inicial:** O grão de diamante pressiona a rocha, causando deformação inelástica e formação de uma zona de trituração (Figura 67 a);
- **Fissuras médias:** Com o aumento da carga, surgem fissuras circulares abaixo da superfície (Figura 67 b);
- **Fissuras em cone:** Desenvolvem-se fissuras cónicas a partir da superfície até à zona de trituração (Figura 67 c);
- **Descarga e fecho parcial:** Ao aliviar a carga, algumas fissuras fecham-se levemente (Figura 67 d);
- **Fissuras laterais:** Após a descarga, surgem fissuras horizontais que crescem a partir da zona de trituração (Figura 67 e);
- **Remoção do material:** As fissuras laterais atingem a superfície, destacando fragmentos da rocha e promovendo o corte (Figura 67 f).

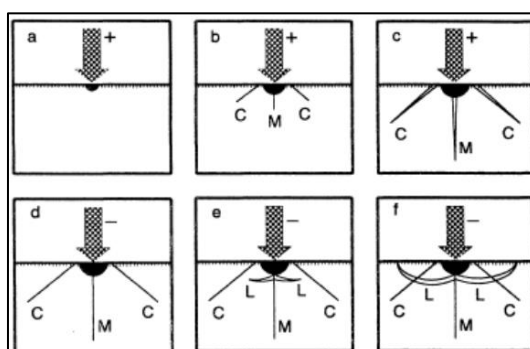


Figura 67 - Processo de Fissuração de um Material Frágil

A Tabela 36 apresenta os principais parâmetros e conceitos envolvidos no processo de corte de rochas com discos diamantados. Cada item é descrito quanto à sua definição técnica e ao impacto direto que exerce sobre o desempenho da operação. Estes fatores são fundamentais para otimizar a produtividade, garantir maior durabilidade das ferramentas e reduzir os custos operacionais. Compreender a influência de variáveis como direção, velocidade de corte, profundidade, forças envolvidas e energia específica permite ajustar o processo de forma mais eficiente e segura [68].

Tabela 36 - Parâmetros do Processo de Corte com Disco Diamantado [68]

Parâmetro / Conceito	Descrição	Impacto no Desempenho
Direção de Corte	<b>Up-cutting</b> : rotação do disco no mesmo sentido do avanço <b>Down-cutting</b> : sentidos opostos	<b>Up-cutting</b> gera menos desgaste; <b>Down-cutting</b> é mais agressivo para a ferramenta
Velocidade de Corte	Distância percorrida por unidade de tempo (m/min)	Alta velocidade pode causar desgaste prematuro
Velocidade Periférica	Velocidade na borda do disco (m/s)	muito alta → desgaste de diamantes; muito baixa → desgaste da matriz
Profundidade de Corte	Penetração do disco na rocha	Define a espessura do corte; influencia a taxa de remoção
Taxa de Remoção Específica	Material removido por tempo (cm <sup>2</sup> /min ou m <sup>2</sup> /h)	Relacionada à produtividade
Forças de Corte	Força normal (vertical), tangencial (horizontal) e total de corte	Determinam a carga e o desgaste sobre o disco
Energia Específica de Corte (EC)	Energia para cortar um volume de rocha	Quanto menor, maior eficiência e menor custo de operação

### Desgaste de Discos Diamantados

O desgaste dos discos diamantados ocorre por atrito durante o corte de rochas e afeta diretamente a eficiência, vida útil da ferramenta e custos operacionais. O principal tipo de desgaste é o abrasivo, devido à presença de minerais duros como quartzo e hematita. A matriz do disco deve ter dureza adequada para equilibrar o desgaste dos diamantes: se for muito dura, eles partem; se for muito macia, soltam-se antes do tempo de desgaste ideal. Fatores como mineralogia da rocha, velocidade de corte e força aplicada influenciam o desgaste. A velocidade crítica é o limite acima do qual o desgaste se acelera por aumento de temperatura. O processo de desgaste dos cristais de diamante pode ser descrito através das seguintes etapas [68]:

- **Inclusão na matriz** - O diamante está completamente embutido na matriz metálica, sem contacto efetivo com o material a ser cortado (Figura 68 – 1);
- **Início da atividade** - O diamante começa a entrar em contato com a rocha, passando a atuar no corte. Parte da sua superfície já está exposta (Figura 68 – 2);
- **Começo do desgaste** - O diamante já atuou ao corte por algum tempo e começa a apresentar sinais de desgaste, perdendo parte do volume original (Figura 68 – 3);
- **Fratura do diamante** - O cristal sofre danos estruturais mais intensos, como fissuras e frinchas, devido às altas tensões e impacto com minerais duros (Figura 68 – 4);

- **Arranque** - O diamante é totalmente separado da matriz, deixando um espaço vazio. Isto pode ocorrer antes do fim da vida útil do grão, caso a matriz seja muito macia (Figura 68 – 5).

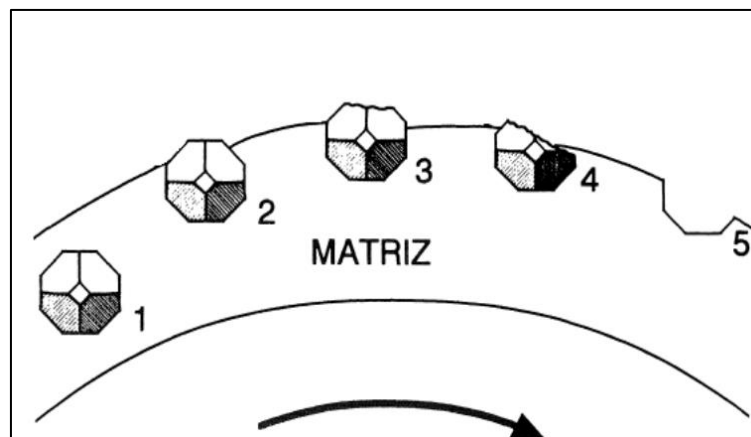


Figura 68 - Etapas de Desgaste dos Cristais de Diamante

#### Desempenho Prático no Equipamento

No contexto da operação prática, o sistema de corte está integrado com o *Spindle MTB24*, cuja faixa de rotação encontra-se entre as **6000 e 8000 rpm**, dependendo do diâmetro e das exigências do corte. A escolha do disco diamantado deve ser feita com base não apenas no tipo de material a cortar, mas também na espessura desejada e no ângulo de corte. A Tabela 37 resume as espessuras máximas de corte possíveis em ângulos de **0° e 45°**, conforme o diâmetro do disco utilizado:

Tabela 37 - Espessuras de Corte para Diferentes Diâmetros de Disco

Diâmetro do Disco [mm]	Espessura Máxima de Corte [mm]	
	Corte a 0°	Corte a 45°
300	5	-
350	30	15
400	55	30
450	80	50
500	105	65
625	165	110
650	180	120
725	215	145
800	255	175
900	305	210
1000	355	245
1100	405	280
1200	455	315
1250	490	330
1300	505	350

A partir do **diâmetro de 900 mm**, é necessária especial atenção à **rigidez estrutural do sistema**, à **estabilidade do *Spindle*** e ao **reforço da refrigeração**. Discos de grande diâmetro impõem maior inércia e exigem controle mais rigoroso da vibração e da força aplicada, sob risco de acelerar o desgaste ou comprometer a precisão do corte. Além disso, a operação contínua com discos superiores a 900 mm requer calibração frequente e monitorização dos níveis de vibração e temperatura, tornando essencial o uso de sensores e estratégias de manutenção preventiva para preservar a eficiência do corte.

### 3.4. Gestão e Otimização de Materiais Utilizados

Este capítulo descreve o processo de levantamento e análise dos materiais utilizados nos processos produtivos da empresa, com especial ênfase nos metais aplicados em estruturas e componentes funcionais. Para além da otimização dos materiais do equipamento CNC SCMM, o trabalho visou a criação de uma base de dados abrangente, aplicável também a outros produtos desenvolvidos pela empresa. Com base na avaliação das propriedades dos materiais e na sua compatibilidade com os principais processos de fabrico como corte por jato de água, soldadura, quinagem e maquinação, foram desenvolvidas matrizes de seleção de materiais. Estas permitiram comparar alternativas e identificar materiais mais eficientes, sustentáveis e com melhor relação custo-benefício.

Importa referir que esta parte do trabalho foi desenvolvida em colaboração com uma colega do ISEP, que também se encontrava a estagiar na CEI. A elaboração do conteúdo deste capítulo resultou de um esforço conjunto, com divisão de tarefas e contributos complementares, que culminaram nos resultados apresentados. Esta cooperação permitiu uma abordagem mais abrangente e eficaz à gestão e otimização dos materiais utilizados.

#### 3.4.1. Inventário de Materiais da Empresa

Numa primeira fase deu-se início ao processo de identificação dos materiais utilizados nos processos produtivos da empresa, com especial foco nos aços e metais, dada a sua elevada representatividade no fabrico dos equipamentos CNC. A recolha de dados foi realizada com base em tabelas de materiais utilizadas na produção para proceder à baixa de material, bem como através da consulta da tabela de materiais utilizada no software *SolidWorks*, aplicada aos modelos CAD dos equipamentos. Esta abordagem permitiu desenvolver um inventário técnico abrangente e representativo dos materiais mais utilizados, servindo de base para análises comparativas e propostas de melhoria. Os materiais utilizados nos processos produtivos da empresa estão listados na Tabela 38.

Tabela 38 - Listagem de Materiais CEI

<b>Categoria</b>	<b>Material</b>	<b>Designação Técnica / Informação Técnica</b>
<b>Metais</b>	Aço Inoxidável	AISI 304; AISI 316
	Aço Sem Tratamento	C1 (AISI 1215); C45E (AISI 1045, CK45, F10); CK45K; S235 JR; S275 JR; S235 J2H; S272 J2H; S355 J2H (St52, 1.0577); ST12 (AISI 1012); ST52 (E355, S355 J2H)

Tabela 38 - Listagem de Materiais CEI (continuação)

	Aço Galvanizado	DX51D+Z, S235 JR Galv
	Aço Zincado	DC01+ZE
	Alumínio	Al 5083, 5754, 5774, 6082, 7075, 6063, Certal, 2030, 2007
	Bronze	CB1, CB3
	Cobre	B187
	Latão	65Cu35Zn
<b>Compósitos</b>	EPDM	EPDM130
		EPDM (genérico)
<b>Polímeros</b>	Polycarbonato	Transparente; Opalino
	Polietileno	PE 500; PE HD; PE LD
	Polipropileno	PP; PP-R
	PVC (Policloreto de Vinilo)	-
	Nylon	PA6
	Outros Polímeros	PET; iglidur J

### 3.4.2. Critérios de Seleção de Materiais em Função do Processo de Fabrico

A seleção adequada de materiais é um fator determinante para garantir a eficiência, qualidade e fiabilidade dos processos de fabrico industrial. Cada processo impõe exigências específicas ao material, condicionando o seu desempenho e influenciando diretamente o tempo de ciclo, o desgaste das ferramentas, a taxa de rejeição e os custos operacionais.

Neste subcapítulo, são apresentadas as principais propriedades físico-mecânicas e metalúrgicas consideradas críticas para os seguintes processos produtivos: **maquinação CNC, corte por jato de água, quinagem e soldadura**. Para cada processo, foram identificados os parâmetros mais relevantes na escolha do material, considerando a sua influência direta na viabilidade técnica, na produtividade e na durabilidade da operação. As seguintes tabelas apresentam a seleção dessas propriedades e características.

Tabela 39 - Critérios de Seleção para Maquinação

Propriedade	Impacto no Processo
<b>Encruamento</b>	Quanto maior for mais difícil é a maquinagem pois aumenta a dureza e a resistência à tração do material, dificultando o arranque da apara.
<b>Maquinabilidade</b>	Depende: Composição química, microestrutura, dureza, propriedades das tensões e deformações e rigidez da peça.
<b>Dureza</b>	Materiais muito duros desgastam as arestas de corte, materiais muito macios aderem às arestas de corte formando apara postiça.
<b>Composição Química</b>	Presença de elementos de liga e de impurezas influencia a maquinabilidade (Ni piora, Pb melhora).
<b>Ductilidade</b>	Materiais dúcteis têm uma melhor maquinabilidade, porque deformam mais facilmente durante o processo de maquinagem.
<b>Tratamentos Térmicos</b>	Alteram a microestrutura e as propriedades dos materiais, influenciando a maquinabilidade.

Tabela 40 - Critérios de Seleção para Corte por Jato de Água

Propriedade	Influência no Corte
Dureza	Requer maior pressão e abrasivo; materiais mais duros dificultam o corte.
Espessura	Afeta a pressão e velocidade de corte necessárias.
Densidade	Materiais densos exigem caudais e energia para corte superiores.
Comportamento dúctil de vidros e cerâmicos	Exigem cortes delicados para evitar fraturas.
Elasticidade (borrachas, polímeros)	Podem deformar com o impacto do jato.
Porosidade	Absorção de água afeta precisão e acabamento.
Condutividade Térmica	Evita sobreaquecimento localizado durante o corte.
Resistência à Tração	Requer mais energia e tempo de corte.
Módulo de Elasticidade	Menor deformação sob impacto facilita o corte.
Coefficiente de Atrito	Materiais com atrito interno requerem ajustes de velocidade.
Tensões Residuais	Podem provocar deformações indesejadas no corte.
Revestimentos	Exigem calibração do jato para evitar delaminações.

Tabela 41 - Critérios de Seleção para Quinagem

Propriedade	Função no Processo de Quinagem
Tensão de Cedência	Deve ser baixa a moderada para facilitar a deformação.
Tensão de Rotura	Valores elevados dificultam a quinagem e aumentam risco de fissuras.
Módulo de Elasticidade	Mais elevado reduz o efeito de retorno elástico.
Alongamento na Rotura	Alta ductilidade facilita a quinagem.
Estricção	Alta estricção indica boa capacidade de deformação.
Tenacidade à Fratura	Alta tenacidade reduz risco de fissuras.
Dureza	Materiais duros exigem ferramentas mais robustas.

Tabela 42 - Critérios de Seleção para Soldadura (Aço ao Carbono)

Tipo de Aço	% Carbono	Soldabilidade
Baixo Carbono	até 0,15%	Excelente
Aço Macio	0,15% – 0,30%	Boa
Médio Carbono	0,30% – 0,50%	Fraca
Alto Carbono	0,50% – 1,00%	Fraca

Tabela 43 - Critérios de Seleção para Soldadura (Aço Inoxidável)

Tipo	% Crómio	Soldabilidade	Materiais de Adição
Martensítico	12 – 18%	Média (-)	Inox Austenítico; Ligas de Níquel
Ferrítico	11 – 30%	Média	Igual ao material de base
Austenítico	16 – 26%	Excelente	AISI 308, 305, 310
Duplex	18 – 30%	Boa	Ligas de Níquel; Inox Austenítico

Tabela 44 - Critérios de Seleção para Soldadura (Alumínio)

Série	Soldabilidade
1xxx	Boa
2xxx	Fraca
3xxx	Boa
4xxx	Excelente
5xxx	Boa
6xxx	Boa
7xxx	Fraca
8xxx	Fraca
9xxx	Fraca

### 3.4.3. Análise e Caracterização das Propriedades de Materiais

Com base no inventário previamente elaborado e nos critérios definidos para os diversos processos de fabrico, foi realizada uma análise detalhada das propriedades físico-mecânicas e térmicas dos materiais utilizados pela empresa. Esta análise teve como objetivo não só compreender o desempenho atual dos materiais aplicados na produção, mas também identificar alternativas mais eficientes em termos de resistência, processamento e custo.

As propriedades foram recolhidas a partir de fontes técnicas fiáveis como fichas de fornecedores, normas internacionais (ex.: ASTM, ISO) e bases de dados especializadas como *MatWeb* e *CES EduPack*. A sistematização destes dados permite uma avaliação objetiva do comportamento dos materiais nos diversos contextos operacionais e constitui uma ferramenta essencial para uma seleção técnica e economicamente otimizada.

A Tabela 45 apresenta um resumo das propriedades técnicas mais relevantes consideradas nesta análise, organizadas por tipo físico, mecânico, térmico e outros parâmetros críticos.

Tabela 45 - Propriedades em Análise

Categoria	Propriedade	Unidade / Tipo
Mecânicas	Tensão de Cedência	MPa
	Tensão de Rotura	MPa
	Resistência à Compressão	MPa
	Resistência à Tração	MPa
	Resistência à Flexão	MPa
	Módulo de Elasticidade	GPa
	Módulo de Flexão	GPa
	Módulo de Compressão	GPa
	Módulo de Corte	GPa
	Dureza	HB
	Tenacidade à Fratura	MPa·m <sup>0,5</sup>
	Maquinabilidade Relativa	%
	Estricção	%

Tabela 45 - Propriedades em Análise (continuação)

	Alongamento na Rotura (Transv. / Longit.)	%
	Encruamento	Qualitativo / Exponente
<b>Térmicas</b>	Condutividade Térmica	W/m·K (a 20 °C)
	Temperatura de Transição Vítre	°C
	Temperatura de Serviço (Máx./Mín.)	°C
<b>Físicas</b>	Densidade	g/cm <sup>3</sup>
	Porosidade (Absorção de Água)	%
	Coefficiente de Atrito	Adimensional (-)
	Coefficiente de Poisson	Adimensional (-)
	Elasticidade (Polímeros e Borrachas)	Qualitativo / Valor específico
<b>Outros</b>	Estado Superficial	Qualitativo / Topografia
	Tratamentos Térmicos	Sim / Tipo
	Revestimentos Aplicados	Sim / Tipo
	Resistência Química	Qualitativo / Normas específicas
	Soldabilidade	Escala qualitativa (Boa – Fraca)
	Ductilidade	Qualitativo / %
	Resistência à Fratura	Qualitativo

### 3.4.4. Desenvolvimento de Matrizes de Seleção por Processo

Com o objetivo de apoiar decisões técnicas mais fundamentadas na seleção de materiais para cada processo de fabrico, foram desenvolvidas **matrizes de decisão multicritério**, adaptadas às características e exigências específicas de cada processo. Estas matrizes permitiram cruzar os requisitos técnicos dos processos produtivos com as propriedades dos materiais disponíveis, garantindo uma análise objetiva e quantitativa da sua adequação.

Cada matriz foi estruturada com base em:

- **Propriedades críticas** para o desempenho no processo;
- **Grau de importância** atribuído a cada propriedade (ponderação);
- **Atributos técnicos dos materiais reais**;
- **Cálculo de um índice de desempenho** para cada material.

Este método permitiu comparar de forma transparente diferentes materiais e apontar os mais adequados para cada processo. As diversas matrizes de seleção podem ser consultadas no **Apêndice C**. A Figura 69 ilustra o exemplo de uma matriz de seleção para o processo de quinagem para os aços inoxidáveis.

The image shows a detailed selection matrix for the welding process (Quinagem) for stainless steels (Aço INOX). The matrix is organized into several columns: 'Requisitos do Processo' (Process Requirements), 'Propriedades Críticas' (Critical Properties), 'Materiais Disponíveis' (Available Materials), and 'Índice de Desempenho' (Performance Index). The Performance Index column uses a color-coded scale from red (low) to green (high) to indicate the suitability of each material for the process. The matrix lists various stainless steel grades and their corresponding performance scores.

Figura 69 - Matriz de Seleção do Processo de Quinagem para Aços Inoxidáveis

### 3.4.5. Redução e Racionalização da Tabela de Materiais

Após a análise sistemática das propriedades dos materiais e a aplicação das matrizes de seleção por processo, foi possível otimizar significativamente a variedade de materiais utilizados. Esta racionalização teve como principal objetivo a **padronização técnica e a eficiência operacional**, sem comprometer o desempenho ou a qualidade dos produtos finais.

O novo portfólio de materiais resultou da eliminação de redundâncias e da escolha de alternativas com **melhor relação custo-desempenho**. Os critérios para esta seleção incluíram:

- Compatibilidade com múltiplos processos produtivos (ex.: maquinação, soldadura, quinagem);
- Custos de aquisição e disponibilidade no mercado;
- Facilidade de processamento e redução de desperdício;
- Cumprimento dos requisitos mecânicos, térmicos e químicos essenciais.

Esta abordagem permite à empresa:

- Reduzir o número de códigos de materiais ativos;
- Otimizar o espaço de armazenagem e a gestão de stocks;
- Minimizar custos de provisionamento e de produção.

O resultado é um **conjunto racionalizado de materiais** que cobre todas as aplicações principais, promovendo consistência, sustentabilidade e agilidade industrial, que de igual forma pode ser consultada no **Apêndice C**.



## 4. Otimização do Equipamento

Este capítulo aborda a otimização estrutural da estrutura da cabeça do 5º eixo do equipamento SCMM com foco na melhoria do desempenho, redução do consumo energético e aumento da fiabilidade. Com base em metodologias avançadas de análise, simulação e estatística, foram ajustados parâmetros estruturais de forma a verificar a possibilidade de tornar a estrutura em estudo mais leve e eficiente, sem comprometer a rigidez nem a precisão.

Adicionalmente, é apresentado um sistema de proteção de *Spindles* contra colisões, o **MS<sup>3</sup>**, que combina absorção mecânica com monitorização digital, aumentando a segurança e reduzindo significativamente os custos de manutenção em operações de maquinação de elevada exigência.

### 4.1. Estudo de Otimização da Estrutura da Cabeça do 5º Eixo

A massa da estrutura da cabeça do 5.º eixo (Figura 70) constitui um fator determinante no desempenho dinâmico e na eficiência energética do equipamento. A possibilidade de reduzir essa massa representa um potencial de melhoria importante, mas só poderá ser considerada viável se não comprometer a rigidez estrutural, a estabilidade do sistema e a integridade mecânica, sobretudo no que respeita aos limites admissíveis de deslocamento e de tensão. Nesta secção, descreve-se a metodologia desenvolvida para avaliar a viabilidade da otimização da massa da estrutura da cabeça do 5.º eixo, com base em simulações numéricas, critérios de engenharia e ferramentas de análise estatística multivariada.

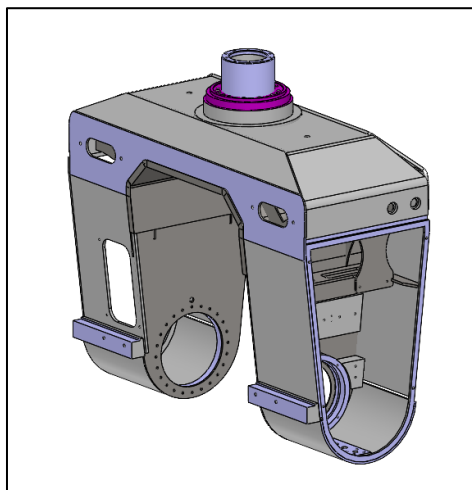


Figura 70 - Estrutura da Cabeça do 5º Eixo

A abordagem metodológica adotada tem como base a consideração de um conjunto de **variáveis dependentes**, nomeadamente:

- a **energia consumida** para movimentação da estrutura;
- os **deslocamentos induzidos sob carga**;
- a **frequência modal de vibração**;
- e as **tensões máximas desenvolvidas** na estrutura.

O objetivo do estudo consiste em reduzir a massa da estrutura da cabeça do 5.º eixo, promovendo ganhos em termos de desempenho dinâmico e eficiência energética. No entanto, reconhece-se que a redução de massa está, inevitavelmente, associada a uma diminuição da rigidez estrutural, o que pode resultar num aumento de deslocamentos e tensões desenvolvidas sob carga. Assim, a meta não é eliminar completamente esses efeitos, mas sim garantir que os valores resultantes de deslocamento, tensão e frequência modal permaneçam dentro de limites admissíveis do ponto de vista estrutural e funcional. A otimização procura alcançar um equilíbrio entre o alívio de massa da estrutura e manutenção de um desempenho mecânico adequado e seguro.

O processo inicia-se com o **cálculo da energia consumida pelo componente móvel do eixo Z**, com o intuito de estabelecer uma referência base do sistema na sua configuração original. A partir desta configuração inicial, são selecionados **parâmetros geométricos e dimensionais relevantes da estrutura**, os quais são sistematicamente modificados em diferentes iterações para avaliar os seus efeitos sobre as variáveis dependentes. A alteração desses parâmetros implica variações na massa estrutural, o que por sua vez influencia diretamente o consumo energético necessário para o seu acionamento e as respostas dinâmicas do sistema [70], [71], [72].

Na fase seguinte, é conduzida uma **análise de sensibilidade**, de forma a determinar a influência individual de cada parâmetro independente sobre as variáveis de resposta. Esta análise permite identificar os parâmetros com maior impacto relativo, possibilitando uma seleção mais criteriosa dos elementos a otimizar [70], [71], [72].

Complementarmente, é aplicada uma **Análise de Componentes Principais (PCA – *Principal Component Analysis*)** com o propósito de **reduzir a dimensionalidade do problema** e identificar combinações lineares de parâmetros que melhor representem a variação global do sistema. Com base nesta análise estatística, é desenvolvida uma **função de desempenho global** que integra os objetivos múltiplos da otimização, ponderando os critérios de minimização e maximização definidos [70], [71], [72].

Adicionalmente, foi utilizada a **RSM (*Response Surface Methodology*)** para elaborar modelos aproximados de resposta dos parâmetros estruturais em função das variáveis de entrada, permitindo uma representação simplificada, mas eficaz, do comportamento do sistema. Esta abordagem facilitou a exploração do espaço de soluções e a identificação de configurações ótimas, com menor custo computacional em comparação com simulações diretas completas.

Por fim, procede-se à seleção da **configuração estrutural otimizada**, a partir da iteração que melhor satisfaz os critérios estabelecidos, garantindo simultaneamente a integridade estrutural, a redução da massa e a melhoria dos parâmetros operacionais.

#### 4.1.1. Avaliação Inicial do Consumo Energético da Configuração de Referência

O sistema de acionamento do eixo Z do equipamento é composto, por um servomotor e por um conjunto de transmissão mecânica. Este conjunto inclui o acoplamento axial, fuso de esferas, porca, guias lineares, patins de desliz e o próprio componente móvel, conforme exemplificado na Figura 71. O movimento deste sistema ocorre na direção vertical e destaca-se por ocorrer na mesma direção da força gravitacional, tornando a massa dos componentes móveis significativamente mais sensível ao consumo energético [70], [71], [72], [73], [74].

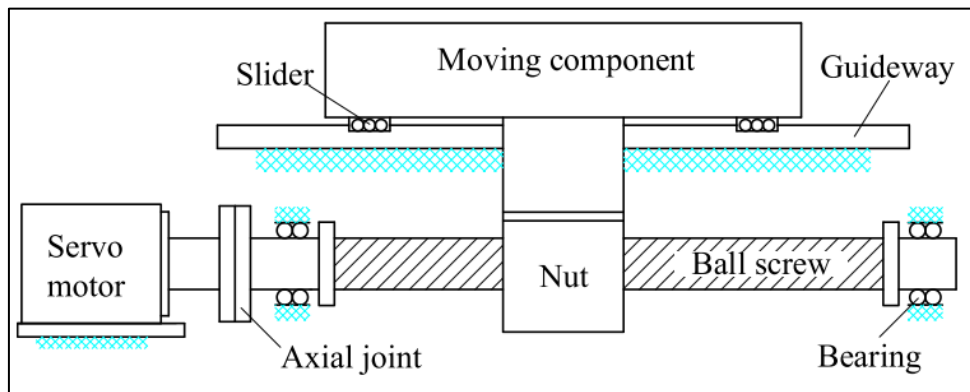


Figura 71 - Exemplificação do Sistema de Acionamento [70]

Desta forma, o objetivo centra-se na formulação de um modelo de consumo energético especificamente para este sistema de acionamento, com base na análise das características cinemáticas e dinâmicas envolvidas. A representação cinemática do sistema de avanço é apresentada na Figura 72.

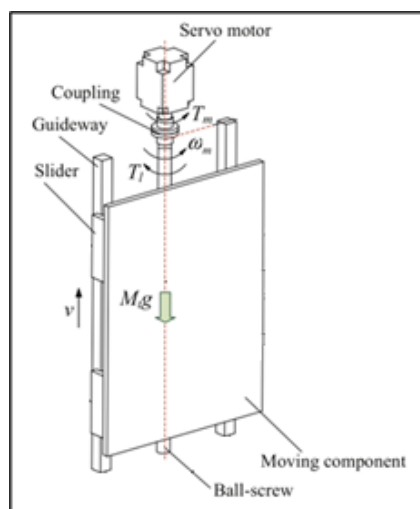


Figura 72 - Representação Cinemática do Sistema de Acionamento [70]

## Otimização do Equipamento

A energia total consumida ao longo do tempo  $E(t)$  é obtida pela integração da potência de saída  $P_{saída}$  em função do tempo (Equação (6)).

$$E(t) = \int_0^t P_{saída} dt \quad (6)$$

A potência de saída, por sua vez, é dada pelo produto entre o binário total exigido pelo sistema  $T_{total}$  e a velocidade angular de saída  $\omega_{saída}$  (Equação (7)).

$$P_{saída} = T_{total} \times \omega_{saída} \quad (7)$$

Para se determinar o  $T_{total}$  necessário para movimentação do sistema deve-se utilizar as seguintes expressões:

$$T_{total} = 2\pi \times I_{total} \times \alpha_n \quad (8)$$

$$I_{total} = I_{motor} + I_{carga} + I_{fuso} + I_{acoplamento} \quad (9)$$

$$\alpha_n = \frac{v/\Delta t}{p} \quad (10)$$

$$I_{carga} = \frac{m \times p^2}{4 \times 10^7} \quad (11)$$

$$I_{fuso} = 761 \times \emptyset^4 \times L \quad (12)$$

Relativamente a estas expressões,  $T_{total}$  é o binário exigido para colocar o eixo linear em movimento com base na carga aplicada. É possível calcular com recurso a  $I_{total}$ , inércia total do sistema e  $\alpha_n$ , aceleração angular equivalente. A  $I_{total}$ , engloba a  $I_{motor}$ , inércia do motor,  $I_{carga}$ , inércia da carga,  $I_{fuso}$ , inércia do fuso e  $I_{acoplamento}$ , inércia do acoplamento. Já a aceleração angular depende de parâmetros como a velocidade linear máxima do sistema  $v$ , passo do fuso  $p$ , e o tempo de aceleração  $\Delta t$  [73], [74].

Ainda na Equação (11) da  $I_{carga}$ , está o parâmetro da massa a suportar pelo eixo  $m$  e na Equação (12) da  $I_{fuso}$  estão presentes o diâmetro do fuso  $\emptyset$  e o comprimento do fuso  $L$ .

Com base nestas equações e nos parâmetros definidos, é possível calcular o valor inicial de energia consumida, assim como o binário total necessário para acionar o sistema. O tempo considerado para o cálculo da energia foi o necessário para percorrer a totalidade do curso disponível do eixo Z (1,6 m), à velocidade linear máxima de 0,125 m/s, resultando num tempo de operação de 12,8 segundos.

A Tabela 46 sintetiza os parâmetros utilizados, bem como os resultados obtidos para os diferentes valores de inércia, binário, potência e energia consumida.

Tabela 46 - Parâmetros e Resultado da Avaliação de Consumo de Energia do Eixo Z

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Velocidade linear máxima	$v$	m/s	0,125
Tempo de aceleração	$\Delta t$	s	0,1
Passo do fuso	$p$	m	0,01

Tabela 46 - Parâmetros e Resultado da Avaliação de Consumo de Energia do Eixo Z  
(continuação)

<b>Massa da carga</b>	$m$	kg	1616
<b>Inércia do motor</b>	$I_{motor}$	kg.m <sup>2</sup>	0,0027
<b>Inércia do acoplamento</b>	$I_{acoplamento}$	kg.m <sup>2</sup>	0
<b>Diâmetro do fuso</b>	$\emptyset$	mm	42,90
<b>Comprimento do fuso</b>	$L$	m	1,870
<b>Aceleração angular</b>	$\alpha_n$	rps <sup>2</sup>	125
<b>Inércia da carga</b>	$I_{carga}$	kg.m <sup>2</sup>	0,00404
<b>Inércia do fuso</b>	$I_{fuso}$	kg.m <sup>2</sup>	0,00482
<b>Inércia total</b>	$I_{total}$	kg.m <sup>2</sup>	0,0116
<b>Binário total</b>	$T_{total}$	Nm	9,279
<b>Velocidade angular de saída</b>	$\omega_{saída}$	rad/s	261,799
<b>Potência de saída</b>	$P_{saída}$	W	2429,110
<b>Tempo total de operação</b>	$t$	s	12,8
<b>Energia consumida</b>	$E(t)$	J	<b>31092,602</b>

#### 4.1.2. Definição dos Parâmetros Geométricos de Funcionamento

Após a avaliação da configuração original, procede-se à definição dos parâmetros geométricos de funcionamento sujeitos a análise, com o objetivo de estudar o seu impacto na massa da estrutura e, conseqüentemente, na energia necessária para movimentar o eixo Z.

Foram selecionados oito parâmetros geométricos, relacionados com espessuras e comprimentos de componentes estruturais relevantes. Estes parâmetros foram designados pelas variáveis  $x_1$  a  $x_8$  e a sua localização e representação geométrica podem ser consultadas no **Apêndice D**.

De forma a garantir independência na análise de sensibilidade e evitar a uniformização dos resultados, cada parâmetro foi variado de forma individual, permitindo observar o impacto isolado de cada um nas variáveis dependentes. A Tabela 47 apresenta as 20 iterações definidas, com diferentes combinações de valores para os parâmetros mencionados. A escolha dos parâmetros teve como critério principal a sua influência nas zonas mais solicitadas da estrutura, maximizando assim a relevância da sua alteração nos resultados obtidos [70], [71], [72].

Tabela 47 - Iterações com Parâmetros Geométricos Variados

Iteração	Parâmetro [mm]							
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
<b>1</b>	4,0	4,0	4,0	10,0	4,0	71,0	10,0	227,0
<b>2</b>	5,0	4,5	5,0	11,0	4,5	72,0	11,0	229,5
<b>3</b>	6,0	5,5	4,5	12,0	5,0	73,0	12,0	231,0
<b>4</b>	7,0	6,0	5,5	13,0	5,5	74,0	13,0	232,5
<b>5</b>	8,0	6,5	6,0	14,0	6,0	75,0	14,0	234,0
<b>6</b>	9,0	7,0	6,5	15,0	6,5	76,0	15,0	265,5
<b>7</b>	10,0	7,5	7,0	16,0	7,0	77,0	16,0	237,0

Tabela 47 - Iterações com Parâmetros Geométricos Variados (continuação)

8	8,0	8,0	7,5	17,0	7,5	78,0	17,0	238,0
9	9,0	8,5	8,0	18,0	8,0	79,0	18,0	236,5
10	10,0	9,0	8,5	19,0	8,5	80,0	19,0	235,0
11	10,0	9,5	9,0	10,0	9,0	71,0	11,0	233,5
12	4,0	10,0	9,5	11,0	9,5	72,0	12,0	232,0
13	5,0	5,0	10,0	12,0	10,0	73,0	13,0	230,5
14	6,0	5,5	6,5	13,0	6,0	74,0	14,0	229,0
15	7,0	6,5	7,5	14,0	7,0	75,0	15,0	227,5
16	8,0	7,5	8,5	15,0	8,0	76,0	16,0	231,5
17	9,0	8,5	9,5	16,0	9,0	77,0	17,0	234,5
18	10,0	9,5	4,5	17,0	10,0	78,0	18,0	237,5
19	4,0	10,0	5,5	18,0	4,0	79,0	19,0	233,0
20	5,0	4,0	6,5	19,0	5,0	80,0	10,0	228,5

Com os parâmetros definidos, foi possível calcular a nova massa do conjunto estrutural para cada iteração, bem como a energia correspondente necessária para a movimentação do eixo Z. Os resultados obtidos demonstram como pequenas variações nas dimensões estruturais se refletem diretamente na energia consumida, afetando também o desempenho global do sistema (Tabela 48).

Tabela 48 - Massa e Energia Consumida por Iteração

	Massa Conjunto [kg]	$E(t)$ [J]
M1	1598,64	30978,378
M2	1604	31013,646
M3	1609,41	31049,242
M4	1614,78	31084,575
M5	1619,87	31118,066
M6	1624,62	31149,320
M7	1630,07	31185,179
M8	1633,86	31210,116
M9	1639,02	31244,068
M10	1644,19	31278,085
M11	1623,58	31142,477
M12	1625,53	31155,307
M13	1621,08	31126,027
M14	1615,03	31086,220
M15	1622,32	31134,186
M16	1629,53	31181,626
M17	1636,75	31229,132
M18	1640,67	31254,924
M19	1630,16	31185,771
M20	1625,41	31154,518

#### 4.1.3. Análise Paramétrica e Simulações Numéricas

Com base nas energias necessárias previamente calculadas, procedeu-se à realização de simulações numéricas para cada uma das iterações definidas. O objetivo principal desta análise foi avaliar o impacto das variações geométricas sobre o comportamento dinâmico e estrutural do sistema, nomeadamente através da determinação da primeira frequência modal de vibração, do deslocamento máximo e da tensão máxima induzida.

As simulações foram conduzidas de acordo com o **Setup I da 2ª fase de ensaios**, o qual serviu como base de referência para a aplicação de forças, restrições e condições de fronteira. A Tabela 49 resume os principais resultados obtidos para cada uma das 20 iterações simuladas, abrangendo a energia estimada para a movimentação do eixo, a frequência modal, o deslocamento máximo verificado e a tensão máxima registada na estrutura.

Tabela 49 - Resultados da Análise Paramétrica

Iteração	Variáveis Dependentes			
	$E(t)$ [J]	$f_1$ [Hz]	$D_{máx}$ [mm]	$\sigma_{máx}$ [MPa]
1	30978,378	42,211	0,24216	54,463
2	31013,646	48,259	0,21691	63,908
3	31049,242	46,009	0,22961	44,369
4	31084,575	45,983	0,22686	45,987
5	31118,066	48,864	0,21341	44,672
6	31149,320	49,992	0,19829	49,283
7	31185,179	52,498	0,18327	50,39
8	31210,116	52,034	0,17586	50,018
9	31244,068	54,082	0,16479	43,963
10	31278,085	53,483	0,16968	47,11
11	31142,477	49,93	0,17092	35,029
12	31155,307	44,855	0,21079	64,251
13	31126,027	43,634	0,21689	53,222
14	31086,220	45,187	0,21684	48,071
15	31134,186	47,315	0,21717	57,491
16	31181,626	47,844	0,19899	45,961
17	31229,132	50,747	0,18591	49,309
18	31254,924	52,883	0,17478	46,66
19	31185,771	47,427	0,24322	70,5
20	31154,518	41,844	0,22268	65,706

#### 4.1.4. Análise de Sensibilidade dos Parâmetros

No processo de otimização estrutural dos componentes móveis do sistema, foram definidos oito parâmetros geométricos independentes, previamente identificados como influentes no desempenho estrutural e dinâmico. No entanto, a magnitude dessa influência pode variar

## Otimização do Equipamento

significativamente entre eles. Com o intuito de determinar quais os parâmetros mais determinantes, foi conduzida uma **análise de sensibilidade** [70], [71], [72].

O objetivo desta análise consiste em quantificar a correlação entre cada um dos parâmetros estruturais e os principais indicadores de desempenho:

- energia consumida durante o movimento do eixo;
- primeira frequência natural de vibração;
- deslocamento máximo;
- tensão máxima instalada.

A metodologia adotada baseia-se numa **análise de correlação linear univariada**, ignorando as interações cruzadas entre parâmetros. Esta abordagem permite isolar a contribuição individual de cada variável, simplificando a interpretação dos resultados.

A análise estatística foi realizada com recurso ao software **PAST (PAleontological STatistics)**, a partir dos dados previamente obtidos na Tabela 47 e Tabela 49. Os coeficientes de correlação obtidos estão resumidos na Tabela 50 e representados graficamente na Figura 73.

Tabela 50 - Coeficientes de Correlação dos Parâmetros com as Variáveis de Desempenho

	Resultados da Sensibilização							
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
$E(t)$ [J]	0,629	0,745	0,499	0,780	0,639	0,780	0,804	0,304
$f_1$ [Hz]	0,843	0,639	0,170	0,488	0,420	0,488	0,745	0,446
$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	-0,857	-0,574	-0,477	-0,383	-0,705	-0,383	-0,505	-0,358
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	-0,731	-0,152	-0,141	0,121	-0,384	0,121	-0,124	-0,218

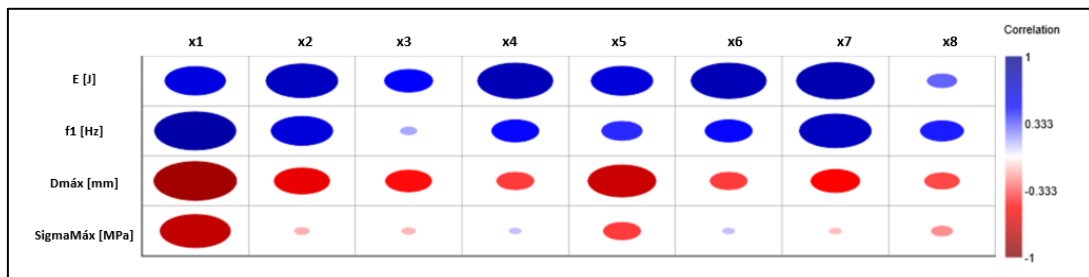


Figura 73 - Representação Gráfica dos Coeficientes de Correlação

### Interpretação dos Coeficientes de Correlação

Os valores apresentados correspondem aos **coeficientes de correlação de Pearson**, que variam entre -1 e 1:

- Valores **próximos de 1** indicam uma **forte correlação positiva**, ou seja, à medida que o parâmetro aumenta, o indicador de desempenho também tende a aumentar;
- Valores **próximos de 0** sugerem **fraca ou nula correlação**, implicando que o parâmetro tem pouco ou nenhum impacto direto no indicador analisado;
- Valores **próximos de -1** representam uma **forte correlação negativa**, indicando que o aumento do parâmetro está associado à diminuição do indicador de desempenho.

Com base nos resultados:

- O parâmetro  $x_7$  apresenta a **maior correlação positiva com o consumo energético** (0,804), sugerindo que aumentos neste parâmetro implicam um acréscimo considerável na energia necessária para a movimentação;
- Os parâmetros  $x_4$  e  $x_6$  demonstram correlações positivas relevantes com a frequência modal (**0,488** ambos), sugerindo que o seu aumento pode contribuir para a melhoria do comportamento dinâmico do sistema;
- Relativamente ao deslocamento máximo, todos os parâmetros exibem correlações negativas, o que indica que o aumento destes parâmetros tende a reduzir os deslocamentos estruturais. Destaca-se o parâmetro  $x_1$ , com a correlação negativa mais acentuada (**-0,857**), seguido de  $x_2$  (**-0,574**) e  $x_5$  (**-0,705**), o que evidencia o seu impacto significativo na rigidez global da estrutura;
- No que diz respeito à tensão máxima, observa-se uma tendência semelhante: a maioria dos parâmetros apresenta correlações negativas, com destaque para  $x_1$  (**-0,731**) e  $x_5$  (**-0,384**), o que indica o seu contributo relevante para a redução das solicitações internas;
- O parâmetro  $x_2$ , embora apresente uma correlação relativamente baixa com a tensão (**-0,152**), mantém um impacto considerável na redução do deslocamento, reforçando a sua importância no controlo da integridade estrutural.

Estes resultados são fundamentais para orientar a formulação da função objetivo no processo de otimização, privilegiando os parâmetros com maior impacto positivo no desempenho global da estrutura.

#### 4.1.5. Metodologia de Superfícies de Resposta (RSM)

De forma a possibilitar a otimização dos parâmetros estruturais da cabeça do 5.º eixo com o algoritmo de otimização, foi necessário recorrer a modelos matemáticos que representassem, de forma aproximada, o comportamento da estrutura sob diferentes configurações geométricas. Para esse fim, foi adotada a **Metodologia de Superfícies de Resposta (Response Surface Methodology - RSM)**.

A **RSM** consiste na construção de modelos polinomiais, ajustados por regressão estatística, com base em dados obtidos por simulação numérica, como ilustrado na Equação (13) que exemplifica para o caso da energia consumida.

$$E(x) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum c_i x_i^2 \quad (13)$$

Com estes dados, foram gerados modelos polinomiais de segunda ordem (quadráticos), que aproximam o comportamento estrutural em função dos parâmetros de entrada. Estes modelos foram depois utilizados como **funções objetivo e restrições** na programação da otimização, permitindo uma solução eficiente e representativa da realidade física do sistema.

As funções desenvolvidas para cada uma das variáveis dependentes podem ser consultadas no **Apêndice E**, onde é descrito o código de programação utilizado para a obtenção da solução de otimização.

#### 4.1.6. Aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA)

A **Análise de Componentes Principais (PCA)** constitui uma técnica estatística multivariada amplamente utilizada para **redução de dimensionalidade**. O seu objetivo principal é transformar um conjunto de variáveis possivelmente correlacionadas num novo sistema de **componentes ortogonais não correlacionados**, denominados **componentes principais**. Estes são construídos como combinações lineares dos indicadores originais, retendo, contudo, a maior parte da variabilidade presente nos dados [70], [71], [72].

No presente estudo, a PCA foi aplicada com o intuito de **identificar padrões ocultos, reduzir a complexidade do modelo** e facilitar a formulação de uma **função objetiva** para otimização estrutural. Para essa análise foi utilizado o software estatístico **PAST**, recorrendo ao módulo de análise multivariada do tipo **ordination**, seguido da extração dos componentes principais.

##### Distribuição da Variância Explicada

A Tabela 51 apresenta os 12 primeiros componentes principais, com os respetivos autovalores (*eigenvalues*) e percentagens de variância explicada. Verifica-se que o **primeiro componente principal (PC1)**, com um autovalor de **6252,22**, explica **97,49%** da variância total dos dados, o que o torna amplamente dominante em relação aos restantes componentes. Dado este resultado, optou-se por considerar **apenas o PC1** como base representativa da análise, uma vez que os demais componentes contribuem com parcelas residuais de variância, sem impacto significativo na estrutura global da informação.

Tabela 51 - Componentes Principais (PC)

Componente (PC)	Autovalor ( <i>Eigenvalue</i> )	% Variância Explicada
1	6252,22	97,488
2	87,5005	1,3644
3	53,644	0,83644
4	9,58164	0,1494
5	5,8165	0,090694
6	2,08208	0,032465
7	1,41178	0,022013
8	0,773587	0,012062
9	0,311097	0,0048508
10	4,89E-05	7,62E-07
11	2,31E-05	3,61E-07
12	5,10E-32	7,95E-34

##### Coeficiente de Carga do Componente Principal

A Tabela 52 apresenta os coeficientes de carga das variáveis originais no PC1, refletindo o peso relativo de cada variável na definição deste componente principal.

Tabela 52 - Coeficientes de Carga dos Componentes

	PC 1
$E(t)$ [J]	0,99698
$f_1$ [Hz]	0,032936
$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	-0,00023193
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	-0,018389

### Interpretação dos Resultados

- O **PC1** é fortemente influenciado por praticamente todas as variáveis, destacando-se a energia consumida  $E(t)$ , com um coeficiente de carga de 0,997;
- As variáveis  $D_{m\acute{a}x}$  e  $\sigma_{m\acute{a}x}$  apresentam cargas negativas, ainda que de menor magnitude, o que indica uma relação inversa com o desempenho global representado por este componente;

Este resultado confirma a viabilidade de utilizar o PC1 como função de desempenho agregada na formulação do modelo de otimização, permitindo integrar múltiplos critérios de forma compacta e eficiente.

#### 4.1.7. Construção da Função de Desempenho e Critérios de Otimização

Com base nos resultados obtidos da Análise de Componentes Principais (PCA), foi possível construir uma **função de desempenho multivariada** que sintetiza os principais indicadores de performance do sistema em estudo. O objetivo desta função é servir de base para a formulação do problema de otimização estrutural, considerando simultaneamente múltiplos critérios de engenharia [70], [71], [72].

##### Etapas de Construção da Função

A função de desempenho é definida como uma combinação ponderada do primeiro componente principal (PC1), pois este representa, aproximadamente **97,50%** da variância total dos dados. Esta abordagem garante a preservação da maior parte da informação relevante, reduzindo a dimensionalidade do problema.

A expressão geral da função de desempenho é dada por:

$$F(X) = w_1 \cdot g_1 \quad (14)$$

Onde:

- $g_1$  representa as **combinações lineares** dos indicadores de desempenho com os **coeficientes de carga** do componente principal PC1;
- $w_1$  é o **peso relativo** atribuído ao componente, correspondente à percentagem de variância explicada.

A construção de  $g_1$  baseia-se nos coeficientes obtidos para os quatro **indicadores de saída considerados relevantes**:  $E(t)$ ,  $f_1$ ,  $D_{m\acute{a}x}$  e  $\sigma_{m\acute{a}x}$  conforme apresentado na Tabela 52.

Deste modo:

Substituindo os pesos na equação geral, obtém-se a expressão final da **função de desempenho**:

$$F(X) = 0,99698 \cdot E + 0,03294 \cdot f_1 - 0,00023 \cdot D - 0,01839 \cdot \sigma \quad (15)$$

### Interpretação da Função

A função de desempenho  $F(X)$  foi construída com base numa combinação ponderada de variáveis críticas que afetam o comportamento estrutural dos componentes móveis. O seu objetivo principal é **minimizar o consumo de energia  $E(t)$**  e, simultaneamente, **maximizar a frequência natural de vibração  $f_1$** , refletindo uma procura por soluções estruturalmente eficientes e com menor exigência energética.

#### 4.1.8. Modelo de Otimização

Com base nos resultados obtidos nas análises de sensibilidade, na Metodologia de Superfícies de Respostas (**RSM**) e na Análise de Componentes Principais (**PCA**), é formulado um modelo de otimização estrutural com o objetivo de identificar a combinação ótima de parâmetros geométricos que permita minimizar o consumo energético dos componentes móveis da máquina-ferramenta, sem comprometer o seu desempenho estrutural, tanto em termos estáticos quanto dinâmicos.

#### Restrições do Modelo

A otimização é realizada sujeita a um conjunto de restrições que asseguram o cumprimento dos limites de projeto e a integridade estrutural da peça otimizada. Estas incluem:

- **Limites geométricos das variáveis de projeto:**

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}, \text{ para } i \in \{1,2,3,4,5,6,7,8\} \quad (16)$$

- **Restrições de desempenho estrutural:**

$$D_{m\acute{a}x} < D_{permitido} \quad (17)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} < \sigma_{permitido} \quad (18)$$

As restrições geométricas garantem que os parâmetros de projeto permaneçam dentro dos intervalos admissíveis definidos pelas condições construtivas e funcionais do componente. Já as restrições relativas ao deslocamento máximo e à tensão máxima asseguram que os limites operacionais da estrutura não sejam ultrapassados, mantendo assim a segurança, precisão e durabilidade do sistema.

O material utilizado na construção da estrutura é o aço estrutural **S355**, que possui um **limite de escoamento nominal de 355 MPa**. Tendo em consideração que a aplicação envolve **cargas variáveis e condições de vibração**, é necessário aplicar um **fator de segurança (FS)** para prevenir falhas por fadiga e deformações excessivas ao longo do tempo. Para este tipo de aplicação, um fator de segurança igual ou superior a **2,0** é recomendado.

Assim, o **limite admissível de tensão** é definido como:

$$\sigma_{permitido} = \frac{\sigma_{cedência}}{FS} = \frac{355}{2,0} = 177,5 \text{ MPa} \quad (19)$$

Relativamente ao **deslocamento máximo admissível**, este parâmetro é crítico para aplicações sujeitas a vibrações, pois deslocamentos excessivos podem provocar desalinhamentos, fadiga localizada e perda de precisão. Com base na análise numérica realizada e nos critérios de projeto típicos para estruturas móveis de precisão, foi definido o seguinte valor limite:

$$D_{permitido} = 0,35 \text{ mm} \quad (20)$$

Este valor visa garantir um compromisso entre rigidez estrutural, estabilidade dinâmica e viabilidade construtiva. Relativamente à 1ª frequência natural de vibração, a restrição deve garantir que a estrutura não opere próxima de frequências de excitação comuns da máquina, minimizando o risco de ressonância e assegurando um desempenho dinâmico adequado.

$$f_1(x) \geq 30 \text{ Hz} \quad (21)$$

Por fim a energia necessária à movimentação deve ser menor do que a energia necessária para movimentar a estrutura original.

$$E(x) < 31092 \text{ J} \quad (22)$$

De forma a garantir o cumprimento rigoroso das restrições impostas ao problema de otimização estrutural do 5.º eixo, recorreu-se à implementação de um algoritmo numérico recorrendo ao *software Octave* (Figura 74). O objetivo desta abordagem foi determinar a melhor configuração possível dos parâmetros estruturais, maximizando o desempenho global segundo os critérios definidos.

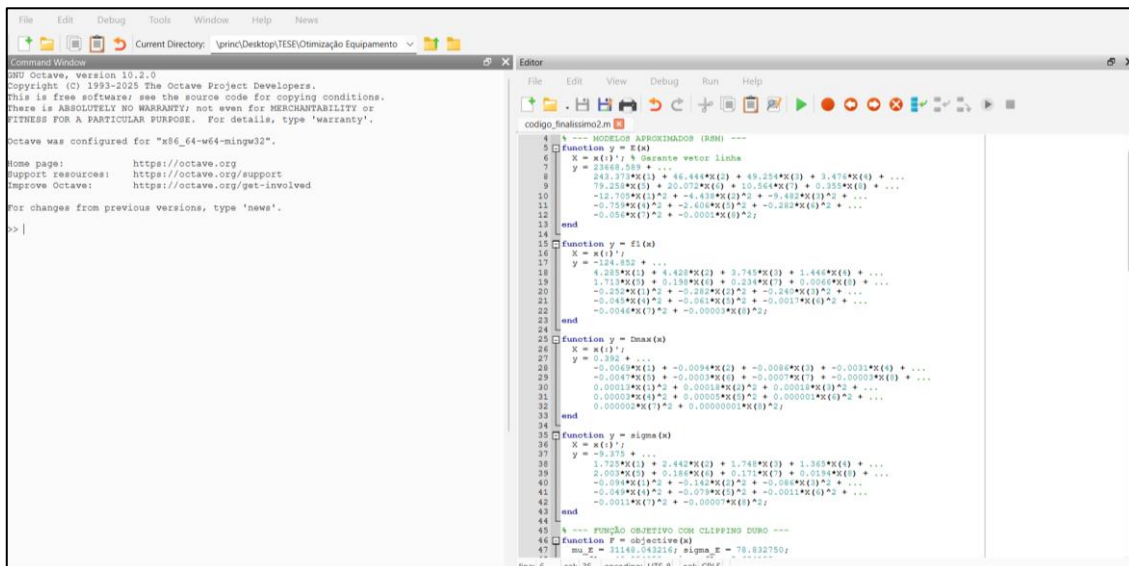


Figura 74 - Interface Octave

Para a resolução do problema, foi adotado o método de otimização por **Enxame de Partículas (Particle Swarm Optimization - PSO)**, uma técnica de pesquisa inspirada no comportamento

coletivo de sistemas naturais, como cardumes de peixes ou bandos de aves. Esta técnica é particularmente adequada para problemas de otimização multidimensional e não linear, como é o caso do presente estudo [70], [71], [72].

A PSO foi configurada para iterativamente explorar o espaço de soluções, ajustando as variáveis de decisão  $x_1$  a  $x_8$  dentro dos limites admissíveis previamente definidos. A cada iteração, o algoritmo procura minimizar a função objetivo composta  $F(X)$ , a qual resulta da aplicação da **Análise de Componentes Principais (PCA)** aos indicadores de desempenho mais relevantes: consumo energético, frequência natural, deslocamento máximo e tensão máxima.

Para permitir a avaliação contínua desses indicadores durante o processo de otimização, foi utilizada a **Metodologia de Superfícies de Resposta (RSM)**. Através da RSM, foram construídos os modelos polinomiais de segunda ordem que aproximam o comportamento estrutural da cabeça do 5.º eixo com base nos resultados obtidos por simulação numérica.

A função objetivo foi penalizada proporcionalmente à violação de qualquer uma destas restrições, conduzindo o algoritmo a evitar regiões inviáveis do espaço de busca. A codificação detalhada utilizada nesta otimização, incluindo a implementação da função objetivo, das restrições e do algoritmo PSO, encontra-se apresentada no **Apêndice E**.

#### 4.1.9. Seleção, Validação e Resultados da Solução Otimizada

Após a implementação do algoritmo e execução do programa de otimização, foi possível obter uma solução final para os parâmetros estruturais que satisfaz os critérios definidos. Os valores correspondentes aos parâmetros otimizados encontram-se apresentados na Tabela 53.

Tabela 53 - Comparação Solução Original com a Otimizada

Solução Original							
Variáveis Independentes [mm]							
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
6	6	6	10	10	80	10	238
Variáveis Dependentes							
$E(t)$ [J]	$f_1$ [Hz]	$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$F(X)$	Massa Estrutura [kg]		
31092,6	44,972	0,208	39,789	30999,452	216,10		
Restrições	$E(x) < 31092$ J	$f_1(x) \geq 30$ Hz	$D_{permitido} \leq 0,35$ mm		$\sigma_{permitido} = 177,5$ MPa		
Solução Otimizada							
Variáveis Independentes [mm]							
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
4	5	4	7	7	56	6	249
Variáveis Dependentes							
$E(t)$ [J]	$f_1$ [Hz]	$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$F(X)$	Massa Estrutura [kg]		
30979,96	32,649	0,331	117,74	30885,308	198,98		

Importa, no entanto, salientar que, apesar de o *software* fornecer uma solução considerada ótima do ponto de vista matemático, esta deverá ser cuidadosamente validada. É essencial garantir que as alterações propostas não comprometam a viabilidade construtiva da estrutura da cabeça do 5º eixo. Para tal, recomenda-se a verificação da compatibilidade geométrica e estrutural dos parâmetros otimizados com a arquitetura física do sistema, bem como a realização de novas simulações numéricas. Este processo visa confirmar a robustez e a aplicabilidade prática dos resultados fornecidos pelo modelo desenvolvido.

### Resultados da Otimização

Com base na solução obtida através do modelo de otimização e nos resultados obtidos das soluções numéricas que constam no **Apêndice F**, observa-se que todos os critérios definidos foram integralmente cumpridos.

Comparativamente à configuração original, a solução otimizada resultou numa redução significativa da **massa da estrutura**, que passou de **216,10 kg** para **198,98 kg**, uma diminuição de **7,92%**. Esta redução teve impacto direto no consumo energético do sistema, que baixou de **31092,6 J** para **30979,96 J**, correspondendo a uma melhoria de **0,36%** na eficiência energética.

A **função objetivo global  $F(X)$** , derivada da análise multivariada (PCA), também apresentou melhoria, passando de **30999,452** para **30885,308**, o que indica um desempenho estrutural global mais favorável.

Relativamente ao comportamento dinâmico e estrutural:

- A **frequência natural** do sistema diminuiu de **44,972 Hz** para **32,649 Hz**. Apesar da redução, o novo valor mantém-se dentro do intervalo seguro e aceitável definido pelo projeto;
- O **deslocamento máximo** aumentou ligeiramente de **0,208 mm** para **0,331 mm**, ainda assim bem abaixo do limite de **0,35 mm**;
- A **tensão máxima** também registou um aumento de **39,789 MPa** para **117,74 MPa**, valor significativamente inferior ao limite admissível de **177,5 MPa**.

Estes aumentos nas solicitações estruturais são consequências naturais da redução de rigidez provocada pela diminuição da massa estrutural, especialmente em zonas críticas. No entanto, os novos valores mantêm-se confortavelmente dentro dos limites de projeto, confirmando que o processo de otimização foi bem-sucedido em encontrar um equilíbrio entre leveza, resistência e eficiência.

A Figura 75 evidencia a tendência crescente da energia consumida em função do aumento da massa, reforçando a importância estratégica da sua redução.

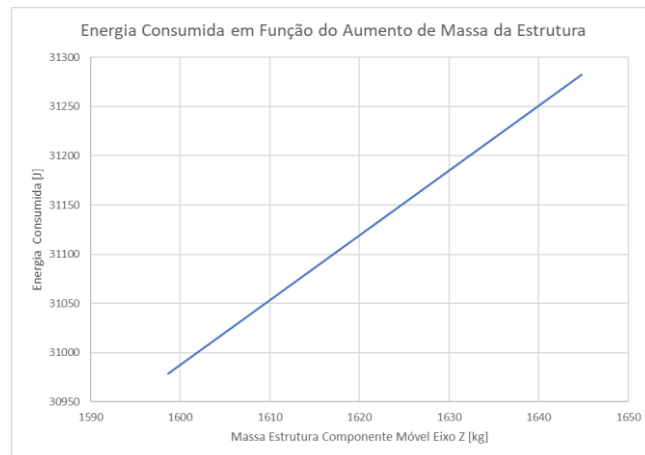


Figura 75 - Variação da Energia Consumida em Função do Aumento de Massa da Estrutura

Além dos benefícios diretos de eficiência, esta redução de massa contribui para **diminuir a pegada de carbono do equipamento**. Embora a redução de peso por si só não represente uma mudança dramática em termos ambientais, os ganhos energéticos associados à movimentação repetida da estrutura ao longo da sua vida útil traduzem-se numa **diminuição sustentada do consumo energético** e, conseqüentemente, numa **redução progressiva das emissões de CO<sub>2</sub>** associadas à operação do equipamento.

Outro benefício relevante prende-se com a **melhoria potencial na aceleração dos eixos**. Ao reduzir a massa a ser movimentada, mantendo os motores e condições operacionais, o sistema requer menos esforço para atingir os mesmos níveis de desempenho, permitindo **maior agilidade e tempos de resposta mais curtos**. Esta característica é especialmente vantajosa em ciclos de produção intensivos, onde tempos de ciclo reduzidos representam ganhos significativos em produtividade.

Em suma, a solução otimizada não só respeita todos os critérios técnicos definidos, como também **melhora o desempenho energético, reduz o impacto ambiental e oferece vantagens dinâmicas adicionais**, consolidando-se como uma alternativa viável e eficiente para implementação prática.

## 4.2. Tecnologia de Proteção de *Spindles* em Colisões

Em operações de maquinação, nomeadamente no corte e fresagem de materiais duros como a pedra, as colisões entre a ferramenta e a peça constituem uma das principais fontes de avaria dos *Spindles*. Estas ocorrências não apenas comprometem a integridade dos componentes críticos dos *Spindles*, como também implicam paragens não planeadas, perdas de precisão e elevados custos de manutenção.

Apesar dos avanços em estratégias de prevenção baseadas em simulação, sensores e controlo adaptativo, os sistemas tradicionais continuam vulneráveis a erros imprevisíveis, sejam de programação, fixação ou medição. Estima-se que mais de 70% dos danos registados em *Spindles* estejam associados a colisões, sendo os rolamentos os elementos mais afetados devido à sua elevada sensibilidade a cargas de impacto.

Neste contexto, surge o **MS<sup>3</sup>** (*Motor Spindle Safety System*), uma solução híbrida desenvolvida pela **TecnoPower** que conjuga absorção mecânica ativa com monitorização digital, permitindo proteger o *Spindle* de sobrecargas induzidas por colisões sem comprometer o desempenho da máquina. Este capítulo analisa o funcionamento, vantagens e requisitos de integração do sistema **MS<sup>3</sup>**.

Ao longo deste capítulo, procura-se demonstrar como a aplicação de sistemas de proteção ativa podem transformar a abordagem de segurança na maquinação CNC, promovendo maior disponibilidade, menor desgaste e maior resiliência perante falhas operacionais.

#### 4.2.1. Fatores Operacionais e Técnicos Associados a Colisões em *Spindles*

Existem diversas causas que levam a colisões entre componentes móveis em máquinas-ferramentas modernas. As fontes mais frequentes de colisões estão associadas a erros humanos durante a preparação e operação da máquina, como posicionamento incorreto da peça, escolha errada de ferramenta e erros de programação no controlo numérico. Os danos resultantes para os componentes da máquina muitas vezes não podem ser ignorados.

As forças de colisão que ocorrem dependem das propriedades dos componentes (massa em movimento, rigidez) e das características do movimento (direção da colisão, velocidade). Em máquinas com acionamentos lineares diretos nos eixos de avanço, velocidades rápidas de até **120 m/min** podem ser atingidas, resultando em forças de colisão superiores a **100 kN**. Dependendo da intensidade, os danos podem causar falhas imediatas ou reduzir a vida útil dos componentes [75], [76].

A unidade do *Spindle* é uma das mais suscetíveis a danos durante colisões. Cerca de 70% dos danos nesta unidade resultam de sobrecarga por colisão. Os custos de reparação, serviço e substituição podem chegar aos 25000 euros por incidente. Os rolamentos de elementos rolantes, frequentemente utilizados, são particularmente vulneráveis devido à pequena área de contato entre os anéis e os elementos rolantes, o que faz com que a pressão máxima admissível seja facilmente excedida em caso de colisão [75], [76].

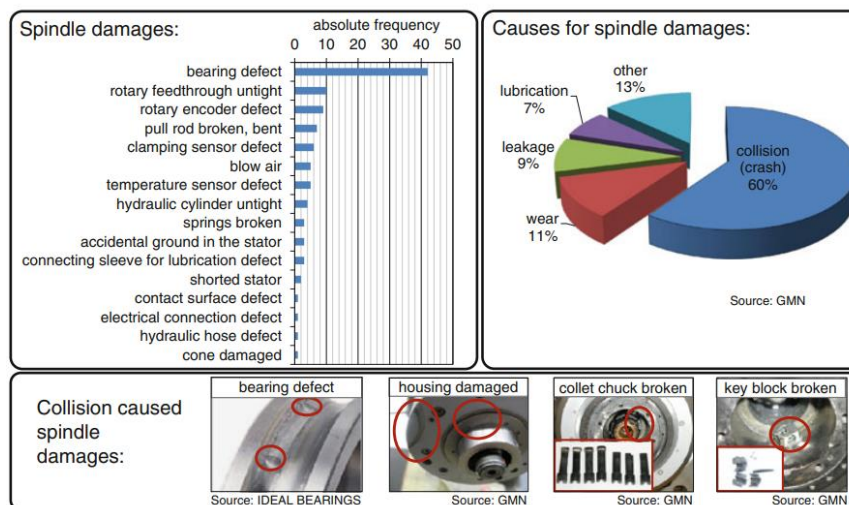


Figura 76 - Causas de Avaria e Danos Comuns em *Spindles* [75], [76]

Desde a década de 1980 que várias estratégias de prevenção de colisões foram desenvolvidas. A Tabela 54 apresenta as várias medidas adotadas e a Tabela 55 as respetivas limitações a estas. Por fim a Figura 77 apresenta um esquema que compara o comportamento de reparação industrial clássico em caso de colisão de *Spindles* com o comportamento preventivo e funcional.

Tabela 54 - Diferentes Tipos de Prevenção de Colisão [75], [76]

Categoria	Tipo de Medida	Exemplos / Descrição
Prevenção de Colisões	Planeamento de Processo	Análise do programa via CAD/CAM e CNC antes da execução.
	Monitorização com Sensores	Uso de câmaras, sensores laser/ultrassónicos para verificar peça e fixação.
	Áreas Virtuais de Segurança	Definição de zonas 2D/3D ao redor dos componentes com paragem automática.
Minimização de Danos	Sistemas Eletrónicos	Deteção de colisões via corrente dos motores (sem sensores) ou com sensores dedicados.
	Sensores de Aceleração/Força	Monitorização ativa de forças de impacto ou vibrações anormais.
	Soluções Mecânicas	Acoplamentos de sobrecarga, limitadores de força e sistemas de desacoplamento.

Tabela 55 - Limitações das Prevenções Identificadas

Limitações Identificadas
Baixa adesão dos utilizadores a sistemas de prevenção de colisões.
Utilização incorreta ou desativação de sistemas de proteção devido a pressões de tempo.
Diferenças inesperadas entre simulação digital e condições reais na máquina.
Sistemas eletrónicos e mecânicos falham sob condições extremas (ex: alta velocidade).

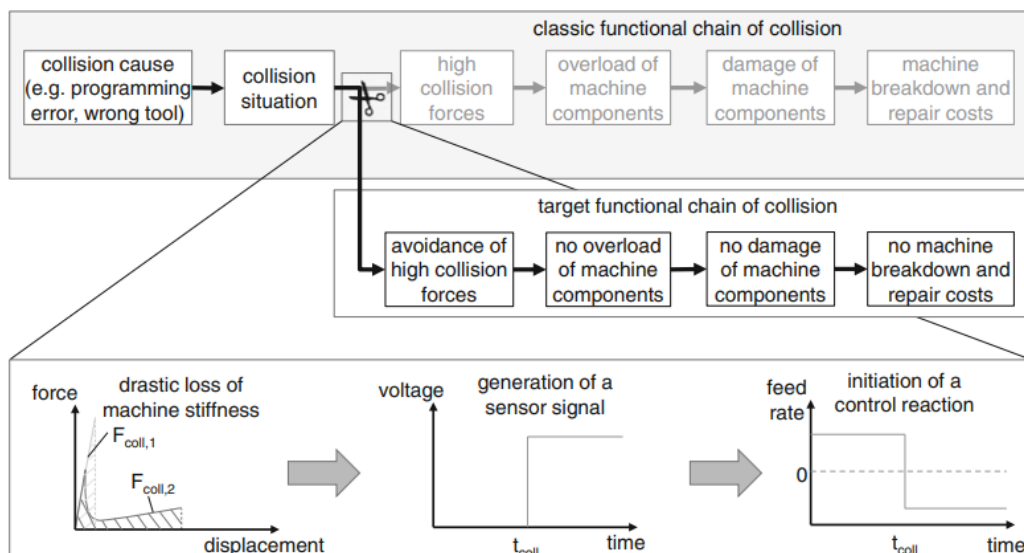


Figura 77 – Cadeia Clássica vs Cadeia Funcional de Colisões de *Spindles* [75], [76]

Os sistemas de proteção para *Spindles* motorizados devem atuar apenas quando ocorrem forças excessivas, sem interferir na operação normal da máquina. Essa atuação pode ser **ativa**, com sensores que detetam limites de força e acionam respostas automáticas, ou **passiva**, através de mecanismos mecânicos que se ativam ao ultrapassar um limiar.

Em ambos os casos, o objetivo é **reduzir a rigidez local** no momento do impacto, permitindo uma deformação controlada que diminui os picos de força transmitidos, conforme evidenciado na Figura 78. Isso protege os componentes críticos, como os rolamentos do *Spindle* e evita danos estruturais graves.

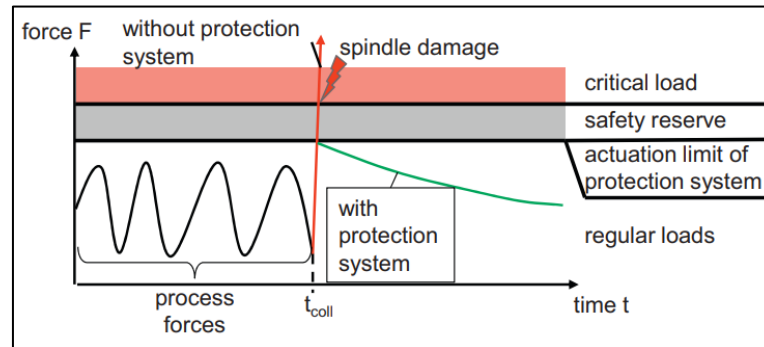


Figura 78 - Comportamento dos Sistemas de Proteção de *Spindles* [75], [76]

#### 4.2.2. Arquitetura Funcional do Sistema MS<sup>3</sup>: Mecanismos de Desacoplamento e Monitorização

O MS<sup>3</sup> é um sistema de proteção híbrido concebido para eletro-*Spindles* de máquinas-ferramenta. A sua principal função é absorver mecanicamente as forças de impacto provenientes de colisões axiais ou radiais, antes que estas atinjam os componentes estruturais da máquina. Ao contrário de sistemas puramente eletrónicos de deteção, o MS<sup>3</sup> combina elementos mecânicos e sensores digitais para uma resposta física imediata e coordenada com o controlo CNC da máquina [75], [76].

O sistema baseia-se numa arquitetura de dupla flange, concebida para permitir o desacoplamento mecânico do *Spindle* relativamente à estrutura da máquina. Em situação de colisão, este mecanismo possibilita uma desaceleração controlada, evitando que a carga de impacto atinja níveis críticos capazes de danificar os componentes internos [75], [76].

O *Spindle* é montado sobre um anel interno, que se aloja dentro de um anel externo solidário ao cabeçote da máquina. A fixação entre os dois anéis é assegurada por uma geometria de contacto de alta precisão, complementada por ímanes permanentes e molas pré-comprimidas, garantindo elevada rigidez durante o funcionamento normal [75], [76].

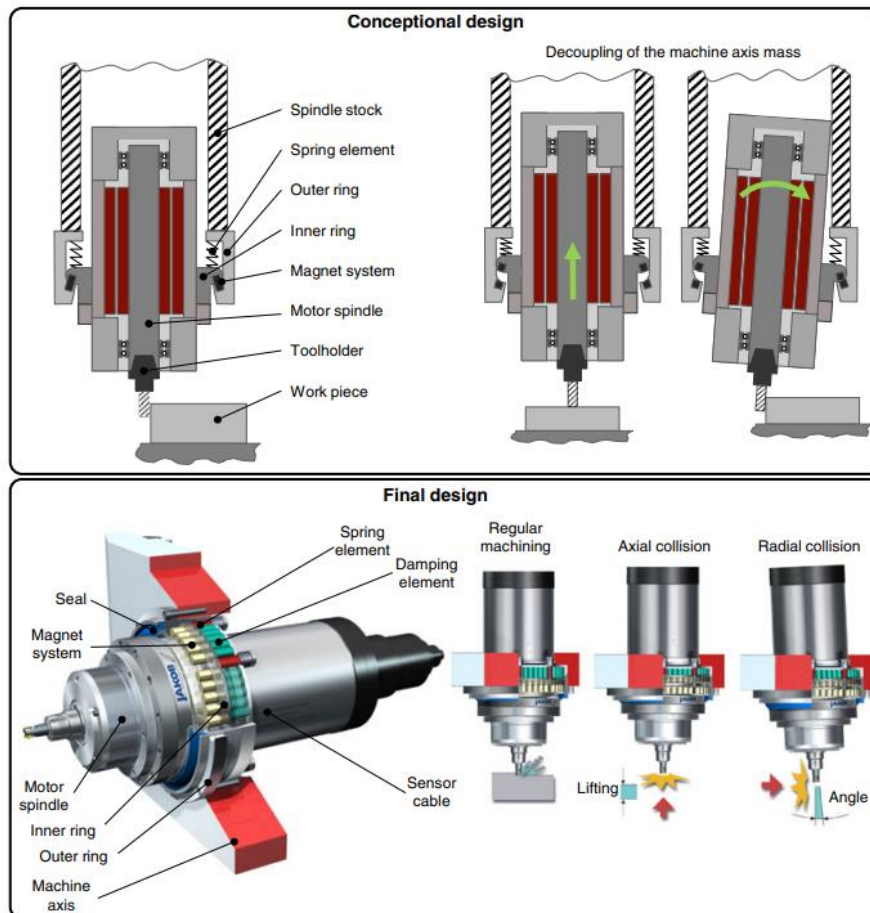


Figura 79 - Sistema Mecânico de Proteção

Para além da função de desacoplamento, o sistema integra elementos de amortecimento que dissipam a energia excedente da colisão, reduzindo o risco de danos secundários. A monitorização é realizada por três sensores de deslocamento dispostos radialmente, que acompanham em tempo real a posição relativa dos anéis. Caso seja detetado um movimento fora dos parâmetros normais, é enviado um sinal ao controlo numérico (CNC), que aciona de imediato a paragem dos eixos de avanço [75], [76].

Após o impacto, o sistema inclui um mecanismo de rearme automático que reposiciona o *Spindle* na sua posição original com elevada precisão, evitando perdas de calibragem ou necessidade de intervenções manuais. Esta funcionalidade contribui para a redução do tempo de inatividade e para a manutenção da precisão geométrica do equipamento.

Adicionalmente, o conjunto é protegido por vedantes e tampas que impedem a entrada de partículas, fluidos de refrigeração ou outros contaminantes provenientes do ambiente de maquinação.

#### 4.2.3. Comportamento do Sistema de Proteção em Condições de Colisão

Um aspeto de particular interesse no estudo da proteção de *Spindles* consiste na avaliação do desempenho do sistema sob condições reais de colisão. Para esse fim, foi consultado um artigo

em que se realizaram ensaios experimentais com o objetivo de analisar o comportamento do mecanismo de desengate, tanto em situações de impacto axial como radial, induzidos por uma força súbita representando uma colisão operacional. A velocidade de avanço no momento da colisão foi fixada em **20 m/min** [75], [76].

A Figura 80 apresenta os sinais medidos de força e deslocamento durante os eventos de colisão. No caso de colisão axial, observou-se um aumento súbito da força até um valor máximo de **27 kN**. O sistema de proteção iniciou o processo de desengate com um atraso aproximado de **5 ms**, após o qual a força de colisão diminuiu significativamente, evidenciando a ativação do mecanismo de mitigação de força [75], [76].

Em contrapartida, durante a colisão radial, o sistema de proteção demonstrou uma reação imediata, sem registo de atraso. Contudo, ao contrário do comportamento axial, a força de colisão não foi reduzida após o desengate. O valor máximo registado foi de **7 kN**, correspondente a um momento de inclinação de aproximadamente **2 kNm**, evidenciando uma transferência significativa de energia através do eixo inclinado [75], [76].

O sinal de força observado na colisão axial revela uma ultrapassagem clara do valor de desengate medido em condições estáticas, que é de **18 kN**. Esta discrepância é atribuída à inércia da massa do *Spindle* em movimento. No momento do impacto, o *Spindle* encontrava-se a deslocar-se com velocidade constante, possuindo energia cinética significativa. Após o desengate, a energia cinética dos eixos de avanço é isolada do *Spindle* devido à função do sistema de proteção, sendo apenas a massa do *Spindle* responsável pelo excesso de força registado. O atraso no desengate é influenciado principalmente pela deformação elástica dos componentes ao longo do percurso da força de colisão, nomeadamente a ferramenta, o porta-ferramentas, o próprio *Spindle* e a peça de trabalho [75], [76].

Estes resultados demonstram a eficácia do sistema de proteção em mitigar os efeitos de colisões, destacando a importância da resposta dinâmica e da capacidade de absorção de energia do sistema, particularmente em situações de impacto axial [75], [76].

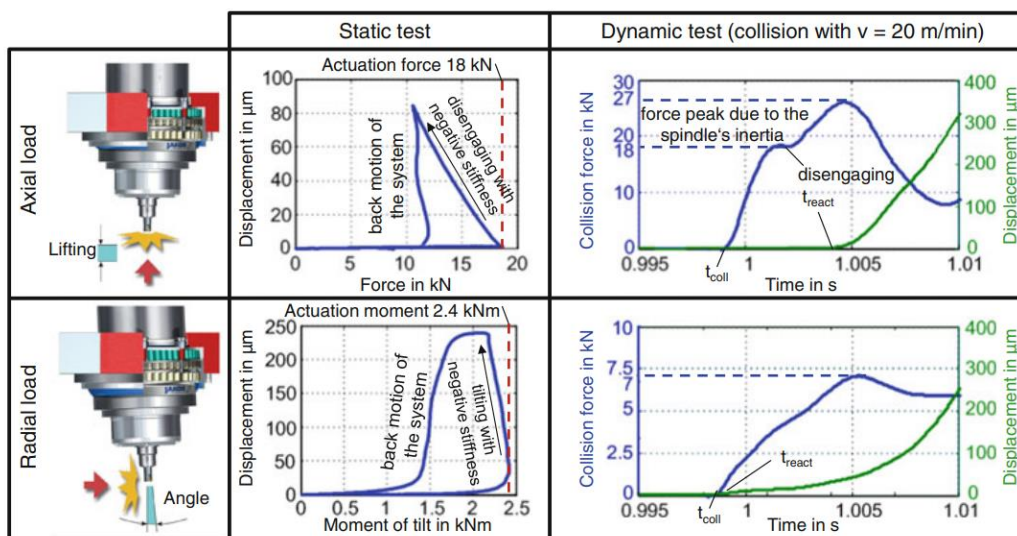


Figura 80 - Comportamento Dinâmico e Estático do Equipamento

#### 4.2.4. Estratégias de Integração do MS<sup>3</sup> e Compatibilidade com *Spindles* Comerciais

O sistema de proteção MS<sup>3</sup> foi concebido para oferecer elevada compatibilidade com uma vasta gama de *Spindles* industriais, em particular aqueles que utilizam interfaces padronizadas segundo a norma **DIN 69893-1**, como os sistemas **HSK-63** e **SK-40**. O MS<sup>3</sup> encontra-se disponível em duas configurações principais: uma versão integrada diretamente na estrutura do *Spindle* e uma versão modular, de instalação autónoma, que facilita a adaptação a equipamentos já em operação. A Tabela 56 apresenta as principais especificações técnicas do sistema MS<sup>3</sup>.

Tabela 56 - Especificações Técnicas do Sistema de Proteção MS<sup>3</sup>

Parâmetro	Valor
Deslocamento axial (h)	10 a 25 mm
Ângulo de rotação admissível ( $\alpha$ )	4°
Força axial admissível (FGA)	10000 a 30000 N
Momento de flexão admissível (MGA)	2000 a 5000 Nm
Peso total do sistema	20 a 35 kg
Efetividade da proteção	Colisões axiais e radiais
Compatibilidade	<i>Spindles</i> DIN 69893-1 (HSK/SK)

O MS<sup>3</sup> suporta velocidades de avanço de até **12 m/min** nos eixos lineares (X, Y, Z) e até **3150°/min** em eixos rotativos (por exemplo, o eixo C), o que o torna especialmente adequado para aplicações de elevada dinâmica, como fresagem de alta velocidade e corte de materiais duros, incluindo pedra.

Apesar da elevada versatilidade do MS<sup>3</sup>, a sua integração bem-sucedida depende de uma análise técnica detalhada das interfaces mecânicas e das características dimensionais específicas de cada *Spindle*. O exemplo representativo é o *Spindle* **MTB24**, da empresa **VEM Spa**, que utiliza por padrão a interface **ISO 50**, mas pode ser configurado com cone **HSK-63**, um pré-requisito essencial para garantir a compatibilidade com o MS<sup>3</sup> (Figura 81).



Figura 81 - Cone HSK-63 (à esquerda) e Cone ISO 50 (à direita)

Importa destacar que a integração do MS<sup>3</sup> não se resume à sua montagem física. É fundamental assegurar a ligação adequada dos sensores incorporados ao sistema de controlo CNC da máquina-ferramenta. Esta integração eletrónica garante que a atuação mecânica do sistema

seja acompanhada de respostas automatizadas do controlo, como a paragem de emergência, o recuo dos eixos ou a sinalização de falhas no painel do operador.

Os principais benefícios observados incluem:

- **Desacoplamento mecânico combinado com monitorização sensorizada**, permitindo uma reação imediata a impactos tanto axiais quanto radiais;
- **Redução eficaz das forças de impacto transmitidas à estrutura**, protegendo o *Spindle*, os componentes periféricos e a base da máquina;
- **Sistema de rearme automático**, que possibilita a reposição da posição inicial sem necessidade de intervenção manual, agilizando o reinício do processo produtivo;
- **Alta fiabilidade de atuação**, verificada em condições reais de corte, assegurando que o sistema só é ativado quando ocorrem impactos efetivos.

A adoção de soluções híbridas como o MS<sup>3</sup> reflete uma tendência clara na indústria da maquinação de alto desempenho: integrar mecanismos inteligentes de proteção que vão além da prevenção de danos, contribuindo para a continuidade do processo, a integridade da máquina e a redução de paragens imprevistas. Com isso, obtém-se um aumento significativo da disponibilidade operacional, uma diminuição dos custos associados à manutenção corretiva e uma melhoria geral da segurança e produtividade da célula de fabrico.



## 5. Conclusão

### 5.1. Conclusões finais

O presente trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma metodologia integrada de otimização estrutural aplicada ao equipamento CNC SCMM, com especial foco na sustentabilidade e eficiência energética. Esta abordagem multidisciplinar combinou princípios de análise estrutural, avaliação ambiental e otimização computacional, permitindo uma visão global sobre o impacto do design estrutural no desempenho energético e ambiental de equipamentos CNC de corte de pedra.

A partir da quantificação da PC e da ACV do equipamento, foi possível identificar os componentes mais críticos do ponto de vista ambiental e estrutural. Esta avaliação inicial serviu de base à formulação de estratégias de melhoria centradas na redução de massa dos componentes móveis, sem comprometer a integridade estrutural nem a funcionalidade da máquina.

No âmbito do estudo estrutural, foi realizada um conjunto de ensaios experimentais com o apoio do INEGI, permitindo validar o comportamento mecânico do equipamento sob diferentes condições de carga. Estes ensaios abrangeram desde o corpo principal da máquina até à estrutura da cabeça do 5.º eixo, proporcionando dados reais para a calibração dos modelos numéricos desenvolvidos. A análise foi complementada com simulações estáticas e dinâmicas, incluindo a avaliação de frequências naturais, tensões e deslocamentos.

Foram então definidos parâmetros estruturais críticos, com base em estudos de sensibilidade, a partir dos quais se iniciou a fase de otimização. Para tal, foi desenvolvida uma função objetivo baseada no consumo energético do sistema de acionamento do eixo móvel Z, diretamente correlacionada com a massa dos componentes. A metodologia aplicada incluiu ferramentas como superfícies de resposta (RSM), análise de componentes principais (PCA) e algoritmos híbridos de otimização (PSO). Esta abordagem permitiu explorar de forma eficiente o espaço de soluções e encontrar configurações estruturais que maximizam a rigidez e estabilidade, reduzindo simultaneamente o peso e, conseqüentemente, o consumo de energia.

A aplicação do modelo de otimização aos componentes móveis resultou numa redução de **3,22% no consumo energético** para a movimentação do sistema durante o funcionamento, evidenciando o potencial impacto de alterações de design aparentemente pequenas, mas estrategicamente aplicadas. Adicionalmente, a comparação das primeiras frequências naturais

## Conclusão

antes e depois da otimização confirmou o cumprimento dos critérios dinâmicos definidos, garantindo que a redução de massa não comprometeu o desempenho dinâmico do sistema.

Outro contributo relevante do trabalho foi o levantamento sistemático dos materiais utilizados e o desenvolvimento de matrizes de seleção técnica, económica e ambiental. Este esforço culminou na criação de uma base de dados de materiais compatíveis com os processos produtivos internos (como corte por jato de água, quinagem e soldadura), potenciando ganhos de eficiência na produção futura e a replicação dos critérios de sustentabilidade noutros produtos da empresa.

A nível energético, o equipamento foi alvo de medições experimentais que permitiram caracterizar o perfil de consumo dos cinco eixos e do sistema pneumático. Este diagnóstico revelou oportunidades concretas de otimização, incluindo a recuperação de energia e a adoção de estratégias de controlo mais eficientes.

Em termos de limitações, importa referir que algumas simplificações geométricas foram necessárias em fases específicas da modelação para viabilizar a computação dos modelos. Além disso, os resultados da otimização, embora significativos, refletem uma condição de operação simulada, carecendo ainda de validação em ambiente fabril real, onde variáveis como desgaste, tolerâncias e ciclos térmicos podem influenciar o desempenho.

Como perspetivas futuras, recomenda-se a expansão da metodologia de otimização aos componentes de suporte estrutural, integrando assim a totalidade da máquina num modelo holístico de design sustentável. A recolha contínua de dados reais de fábrica, bem como a implementação de sistemas de monitorização inteligentes, permitirão validar e refinar os modelos aqui propostos. Adicionalmente, a aplicação da metodologia a outros equipamentos da CEI poderá acelerar a transição da empresa para um portefólio de produtos mais eficientes, leves e sustentáveis.

Em suma, este trabalho demonstrou que é possível, através de uma abordagem integrada e fundamentada, melhorar simultaneamente o desempenho energético, estrutural e ambiental de equipamentos industriais complexos, abrindo caminho para uma nova geração de equipamentos mais eficientes e alinhadas com os desafios da sustentabilidade na indústria metalomecânica.

## Referências

- [1] S. R. Bhusal, «Carbon footprint of polyethylene produced from CO<sub>2</sub> and renewable H<sub>2</sub> via MTO route», Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT, 2021.
- [2] K. Calvin *et al.*, «IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPC», Geneva, Jul. 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- [3] V. D. M. Rodrigues, «Avaliação do Ciclo de Vida de uma Unidade Industrial: uma avaliação da pegada de carbono e da intensidade energética da obra», Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.
- [4] I. Hughes, «Action Research in Healthcare», *SAGE Handb. Action Res.*, n. 2009, pp. 381–393, 2014, doi: 10.4135/9781848607934.n33.
- [5] T. George, «What Is Action Research? | Definition & Examples». Acedido: 4 de Maio de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://www.scribbr.com/methodology/action-research/>
- [6] C. by Zipor, «Company», CEI by Zipor. Acedido: 11 de Novembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ceigroup.net/geral-2>
- [7] B. Portugal, «O que é a sustentabilidade?», BCSD PORTUGAL. Acedido: 3 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://bcdsportugal.org/sustentabilidade/>
- [8] Profiforma, «Economia Verde e Sustentabilidade», Profiforma. Acedido: 3 de Janeiro de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://profiforma.pt/economia-verde-e-sustentabilidade/>
- [9] O. W. in D. Team, «Ensure sustainable consumption and production patterns», Our World in Data. Acedido: 9 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://ourworldindata.org/sdgs/responsible-consumption-production>
- [10] O. W. in D. Team, «Share of the population with access to basic services», Our World in Data. Acedido: 9 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/access-to-basic-services?country=~PRT>
- [11] J. Hasell, P. Arriagada, E. Ortiz-Ospina, e M. Roser, «Economic Inequality», Our World in Data. Acedido: 9 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://ourworldindata.org/economic-inequality>
- [12] J. P. de M. V. da Conceição, «Análise da sustentabilidade de uma Indústria Corticeira», Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2021.
- [13] B. Portugal, «Objetivos de Desenvolvimento Sustentável», BCSD PORTUGAL. Acedido: 3

## Referências

- de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://ods.pt/ods/>
- [14] B. Portugal, «Empresas», BCSD PORTUGAL. Acedido: 3 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://ods.pt/empresas/>
- [15] J. Scalon *et al.*, «Integração dos ODS na Estratégia Empresarial Contribuições do Comitê Brasileiro do Pacto Global para a Agenda 2030», 2017.
- [16] F. E. MacArthur, «O que é a economia linear?», Fundação Ellen MacArthur. Acedido: 12 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/o-que-e-economia-linear>
- [17] Recicla, «Economia linear vs circular: descubra as diferenças», Recicla. Acedido: 12 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://recicla.pt/ideias-sustentaveis/economia-linear-vs-circular-descubra-as-diferencas/>
- [18] S. Legnaioli, «O que é economia linear e seus impactos?», eCycle. Acedido: 12 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/economia-linear/>
- [19] P. Europeu, «Economia circular: definição, importância e benefícios», Parlamento Europeu. Acedido: 3 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios>
- [20] P. Europeu, «Como promover um consumo sustentável», Parlamento Europeu. Acedido: 13 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20201119STO92005/como-promover-o-consumo-sustentavel>
- [21] Fabiana, «Economia Circular – O que é e como as normas ISO podem ajudar nesta importante estratégia?», Templum Portugal. Acedido: 13 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://templum.pt/economia-circular-estrategia-iso/>
- [22] ISO, *ISO 14067:2018(E) - Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification*. Switzerland, 2018, p. 58.
- [23] P. Europeu, «Alterações climáticas: que gases com efeito de estufa impulsionam o aquecimento global», Parlamento Europeu. Acedido: 19 de Novembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20230316STO77629/alteracoes-climaticas-os-gases-com-efeito-de-estufa-mais-nocivos-para-o-planeta>
- [24] APA, «Protocolo de Quioto», APA. Acedido: 6 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://apambiente.pt/clima/protocolo-de-quioto>
- [25] APA, «Acordo de Paris», APA. Acedido: 6 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://apambiente.pt/clima/acordo-de-paris>
- [26] C. Guide4Metal, «3ª Ação Capacitação Cálculo da pegada de carbono da sua organização», Vila do Conde, 2024.
- [27] U. N. C. Change, «What is the United Nations Framework Convention on Climate Change?», United Nations Climate Change. Acedido: 6 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>
- [28] P. Europeu, «Taxonomia da UE: investimento verdes para promover financiamento

## Referências

- sustentável», Parlamento Europeu. Acedido: 6 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20200604STO80509/taxonomia-da-e-investimento-verde-em-atividades-sustentaveis>
- [29] APA, «Lei de Bases do Clima», APA. Acedido: 6 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://apambiente.pt/clima/lei-de-bases-do-clima>
- [30] K.-M. Lee e A. Inaba, «Life Cycle Assessment Best Practices of ISO 14040 Series», *Comm. Trade Invest.*, p. 96, 2004.
- [31] ABNT, *ABNT NBR ISO 14040:2009 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. Brazil, 2009, p. 30.
- [32] J. V. R. Ferreira, «ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS», Viseu, 2004.
- [33] J. F. S. Oliveira, *Gestão Ambiental*, LIDEL. Lisboa, 2005.
- [34] Mercedes-Benz, «360° Environmental Check Mercedes-Benz EQC», Untertürkheim, 2021.
- [35] B. Group, «Vehicle Footprint», München, 2023.
- [36] World Resources Institute e W. B. C. for S. Development, «Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard», USA, 2011.
- [37] J. M. Campolina, C. S. L. Sigríst, e V. A. da S. Moris, «Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de avaliação do ciclo de vida», *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, p. 16, 2015. doi: 105902/2236117015494 Revista.
- [38] GreenDelta, «openLCA», openLCA. Acedido: 19 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.openlca.org/>
- [39] ABNT, *ABNT NBR ISO 14044 - Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações*. Brazil, 2009, p. 52.
- [40] A. Soares *et al.*, «SC5-Avaliação do Ciclo de Vida», 2020.
- [41] BSI, «PAS 2050:2011», London, 2011.
- [42] Carbon Trust, «A guide to carbon footprinting for businesses», London, 2023.
- [43] W. Association, «Climate change and the production of iron and steel», Worldsteel Association. Acedido: 26 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://worldsteel.org/climate-action/climate-change-and-the-production-of-iron-and-steel/#key-points-from-this-policy-paper>
- [44] C. by Zipor, «StoneCutMill», CEI by Zipor. Acedido: 2 de Janeiro de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ceigroup.net/stonemill-copy-1>
- [45] D. C. Jones e P. G. Hammond, «ICE Database V3.0», London, 2019.
- [46] Worldstainless, «CO2 Emissions Report», Brussels, 2024.
- [47] ArcelorMittal, «Climate Action Report 2», 2021.
- [48] Z. Zhang, Z. Yang, Y. Yang, e Q. Ji, «Research on the Impact of Carbon Price on Power Cable Price», em *Economic and Technological Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd*, 2023, pp. 1157–1163. doi: 10.2991/978-94-6463-042-8\_165.

## Referências

- [49] Hitchin Tony, «The Carbon Footprint of Carton Packaging 2019», Zürich, 2019.
- [50] Ruukki, «Sandwich panels with mineral wool insulation core», Helsinki, 2023.
- [51] B. Gerold e I. R. Schreieck, «CO<sub>2</sub>-Footprint of Getzner Werkstoffe GmbH PU products», 2019.
- [52] Yulex, «Chronicle 8: Shouldn't We Start With a Raw Material That Is Carbon Neutral?», Yulex. Acedido: 15 de Novembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.yulex.com/post/shouldnt-we-start-with-a-raw-material-that-is-carbon-neutral>
- [53] GreenDelta, «European Reference Life Cycle Database of the Joint Research Center», 2015.
- [54] Q. Liang e L. Yu, «Assessment of carbon emission potential of polyvinyl chloride plastics», *E3S Web Conf.*, vol. 393, p. 01031, Jun. 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202339301031.
- [55] I. Z. Association, «Zinc Circularity, Carbon Footprint, and Decarbonization», Lisbon, 2024.
- [56] M. Kelly, «Low Global Warming Potential Polycarbonate», HighLine Polycarbonate. Acedido: 10 de Dezembro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://highlinepc.com/low-global-warming-potential-polycarbonate/>
- [57] T. E. Institute, «The Evah OzLCI2019 Free Database», 2019.
- [58] APA, «Fator de Emissão da Eletricidade 2024 Portugal», Amadora, 2024.
- [59] DEFRA, «UK Government Conversion Factors for greenhouse gas (GHG) reporting», 2024.
- [60] M. F. Ashby, *Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [61] L. Z. M. Manufacturing, «5 Axis CNC Stone Cutting Machine». Acedido: 16 de Maio de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://www.zlstonemachine.com/stone-cutting-machine/cnc-stone-machine/5-axis-cnc-stone-cutting-machine.html>
- [62] DONATI, «Donatoni Z 1000». Acedido: 16 de Maio de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://www.donatonigroup.com/en/machine/z1000/>
- [63] STYLECNC, «5 Axis CNC Stone Cutting Bridge Saw for Granite & Marble». Acedido: 16 de Maio de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://www.stylecnc.com/stone-carving-machine/5-axis-cnc-stone-cutting-bridge-saw.html>
- [64] MIGE, «Products Center». Acedido: 3 de Junho de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://www.mege.cn/html/en/index.php?ac=Article&at=Read&did=285>
- [65] W. Gastreich, «What Is a Servo Motor and How It Works?» Acedido: 23 de Maio de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://www.realpars.com/blog/servo-motor>
- [66] W. Gastreich, «Servo Motors Advantages and Disadvantages». Acedido: 23 de Maio de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://www.realpars.com/blog/servo-motors-advantages>
- [67] J. C. G. Justino e B. D. J. Cardoso Filho, «Avaliação de um sistema de recuperação de energia baseado em armazenadores de energia como alternativa ao uso dos

## Referências

- retificadores PWM», *2010 9th IEEE/IAS Int. Conf. Ind. Appl. INDUSCON 2010*, 2010, doi: 10.1109/INDUSCON.2010.5739977.
- [68] Karina Idemburgo, «ESTUDO DO CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS UTILIZANDO DISCO DIAMANTADO», Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- [69] H. Duty, «Os principais tipos de disco diamantado e suas características». Acedido: 25 de Maio de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://www.heavyduty.com.br/blog/os-principais-tipos-de-disco-diamantado-e-suas-caracteristicas>
- [70] Q. Ji, C. Li, D. Zhu, Y. Jin, Y. Lv, e J. He, «Structural design optimization of moving component in CNC machine tool for energy saving», *J. Clean. Prod.*, vol. 246, p. 118976, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118976.
- [71] W. Li, C. Li, N. Wang, J. Li, e J. Zhang, «Energy Saving Design Optimization of CNC Machine Tool Feed System: A Data-Model Hybrid Driven Approach», *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 19, n. 4, pp. 3809–3820, 2022, doi: 10.1109/TASE.2021.3136262.
- [72] Y. Lv, C. Li, Y. Jin, J. He, e J. Li, «Energy saving design of the spindle of CNC lathe by structural optimization», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 114, n. 1–2, pp. 541–562, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-06758-4.
- [73] P. Automation, «Tecnologia Eletromecânica», São Paulo, 2003.
- [74] C. Reis, «Desenvolvimento modular de uma máquina CNC de 3 eixos», FEUP, 2018.
- [75] E. Abele e D. Korff, «Avoidance of collision-caused spindle damages - Challenges, methods and solutions for high dynamic machine tools», *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 60, n. 1, pp. 425–428, 2011, doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.031.
- [76] E. Abele, C. Brecher, S. C. Gsell, A. Hassis, e D. Korff, «Steps towards a protection system for machine tool main spindles against crash-caused damages», *Prod. Eng.*, vol. 6, n. 6, pp. 631–642, 2012, doi: 10.1007/s11740-012-0422-6.



# Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Luís Valinho Príncipe

ISEP, Porto, 14 de junho de 2025



# Apêndice A – 1ª Fase de Ensaaios Experimentais

## Experimentais

Medições de Deslocamento Efetuadas na 1ª Fase de Ensaaios Experimentais

*Setup I – Ponte Deslocamento Vertical*



Figura 82 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical da Ponte



Figura 83 - 1ª Medição (Variação de Carga 250 kg)



Figura 84 - 2ª Medição (Variação de Carga 1000 kg)

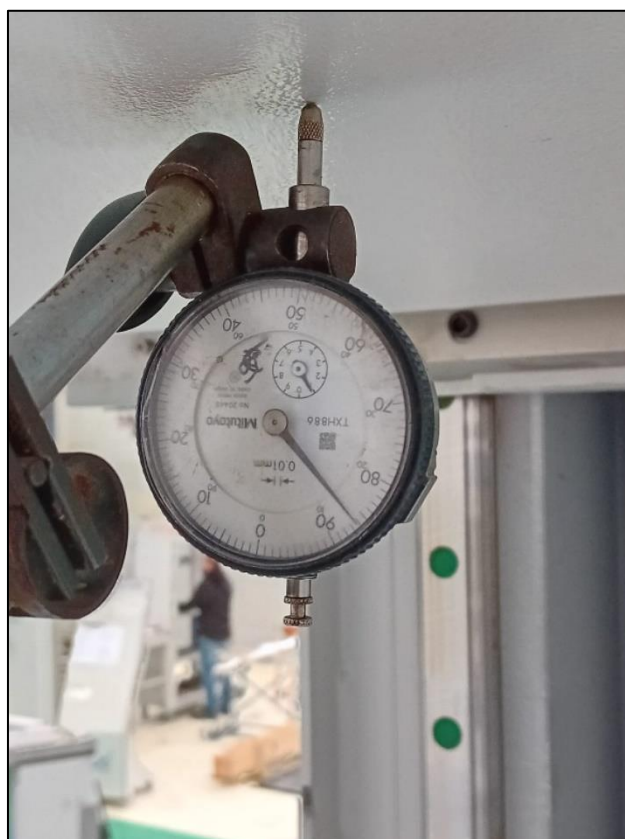


Figura 85 - 3ª Medição (Variação de Carga 500 kg)

**Setup I – Ponte Deslocamento Transversal**



Figura 86 - Condição Inicial Medições Deslocamento Transversal da Ponte



Figura 87 - 1ª Medição (Variação de Carga 500 kg)

**Setup I – Cabeçote Deslocamento Vertical**



Figura 88 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical do Cabeçote



Figura 89 - 1ª Medição (Variação de Carga 250 kg)



Figura 90 - 2ª Medição (Variação de Carga 1000 kg)



Figura 91 - 3ª Medição (Variação de Carga 500 kg)

**Setup I – Cabeçote Deslocamento Transversal**



Figura 92 - Condição Inicial Medições Deslocamento Transversal do Cabeçote



Figura 93 - 1ª Medição (Variação de Carga 500 kg)

**Setup II – Montante Esquerdo**



Figura 94 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical do Montante Esquerdo



Figura 95 - 1ª Medição (Variação de Carga 500 kg)



Figura 96 - 2ª Medição (Variação de Carga 1000 kg)



Figura 97 - 3ª Medição (Variação de Carga 750 kg)

**Setup II – Montante Direito**



Figura 98 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical do Montante Direito



Figura 99 - 1ª Medição (Variação de Carga 750 kg)



Figura 100 - 2ª Medição (Variação de Carga 1000 kg)



Figura 101 - 3ª Medição (Variação de Carga 500 kg)

**Setup III – Montante Esquerdo**



Figura 102 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical do Montante Esquerdo



Figura 103 - 4ª Medição (Peso Próprio da Ponte)

**Setup III – Montante Direito**

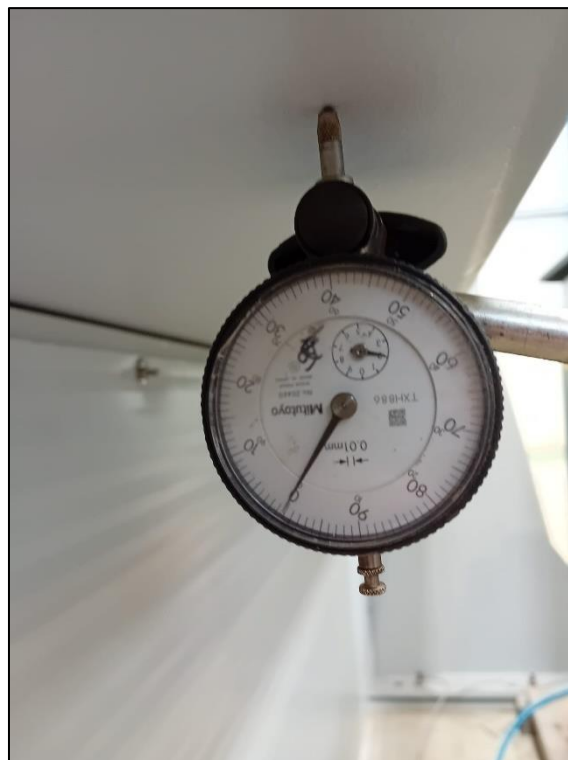


Figura 104 - Condição Inicial Medições Deslocamento Vertical do Montante Direito



Figura 105 - 4ª Medição (Peso Próprio da Ponte)

### Valores Teóricos Obtidos por Simulação Numérica da 1ª Fase de Ensaios Experimentais

#### Metodologia de Simulação

A simulação numérica foi realizada utilizando o *software SolidWorks Simulation*, recorrendo à malha *Blended Curvature-Based Mesh*. Foram definidos parâmetros específicos de malha para cada um dos três *Setups* considerados na 1ª fase de ensaios experimentais, de forma a garantir um equilíbrio entre a **precisão dos resultados** e o **tempo computacional** necessário.

Na Tabela 57 são apresentados os parâmetros utilizados para cada *Setup*.

Tabela 57 - Parâmetros de Malha da 1ª Fase

<i>Setup</i>	Tamanho Máximo do Elemento (mm)	Tamanho Mínimo do Elemento (mm)	Nº Mínimo de Elementos num Círculo	Grow Ratio
I	363	18	8	1,4
II	30	3	8	1,4
III	30	3	8	1,4

Para otimizar o processamento e reduzir o tempo de computação, foram realizadas simplificações nas geometrias dos modelos. Removeram-se furos, *fillets* e geometrias complexas que não interferissem significativamente no desempenho estrutural da peça.

Para os *Setups* II e III, foi conduzido um estudo de convergência da malha, garantindo que a malha tivesse uma boa capacidade de reproduzir o comportamento da estrutura. No *Setup* I, devido a limitações computacionais e de memória, não foi possível realizar esse estudo. Assim,

utilizou-se uma malha mais grosseira, permitindo obter resultados aproximados, mas com menor precisão.

**Setup I**

No **Setup I** a estrutura de análise foi a ponte do equipamento à qual foi aplicado **Mesh Control** a quatro componentes conforme evidenciado na Tabela 58.

Tabela 58 - *Mesh Control* aplicado no *Setup I*

<b>Mesh Control</b>		
<b>Componente</b>	<b>Tamanho Máx. Elemento [mm]</b>	<b>Tamanho Mín. Elemento [mm]</b>
MC0...672534	150	15
MC0...672535		
MC0...672536_AF0		
MC0...672536_AF1		

Foram ainda removidos do modelo certos componentes e substituídos por cargas aplicadas nos respectivos pontos, conforme ilustrado na Tabela 59.

Tabela 59 - Componentes Removidos na Análise ao *Setup I*

<b>Listagem</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Carga a Aplicar [kg]</b>
MC0...673003	1	95
Cremalheiras X	5	16
Guia X	2	116
Cabeçote	1	2040
Carga	1	1000

As condições de fronteira e cargas submetidas à estrutura podem ser ilustradas através da Figura 106. A ponte foi encastrada na zona de aplicação dos seus patins, representando as restrições impostas pelos trilhos de apoio. As cargas foram maioritariamente impostas ao longo da estrutura da ponte, com exceção da carga gravitacional do cabeçote e da carga externa aplicada para efeitos de ensaio. A carga do cabeçote foi considerada distribuída pelos quatro patins do eixo X, enquanto a carga externa adicional foi aplicada diretamente sobre os dois patins superiores desse mesmo eixo.

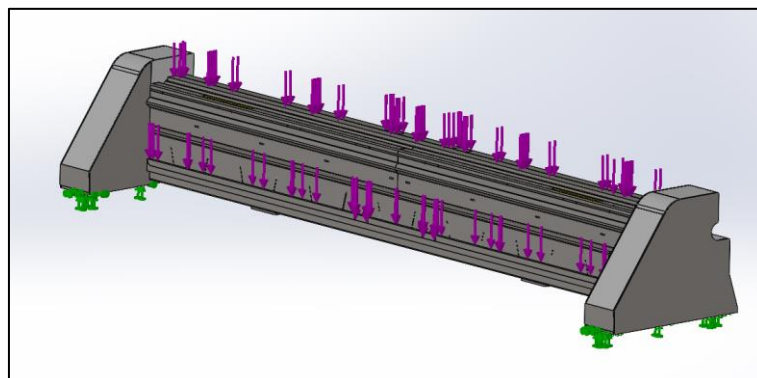


Figura 106 - Cargas e Condições de Fronteira do *Setup I*

A Figura 107, Figura 108 e Figura 109 representam os valores obtidos de tensão de von Mises, deslocamento e fator de segurança para este *Setup I*.

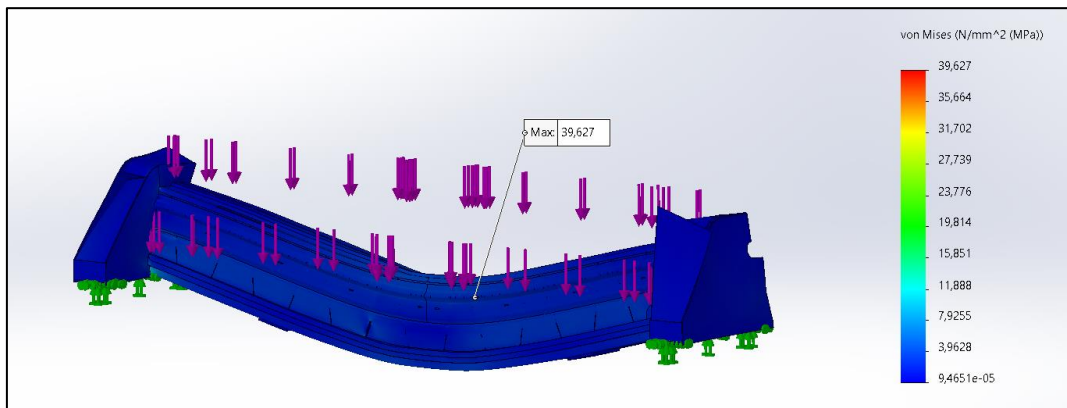


Figura 107 - Tensão de von Mises *Setup I* [MPa]

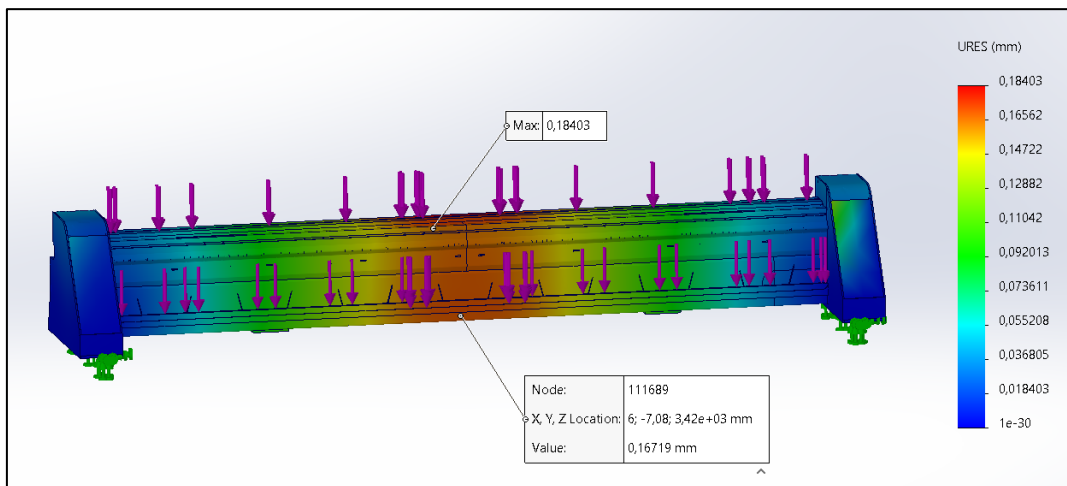


Figura 108 – Deslocamento *Setup I* [mm]

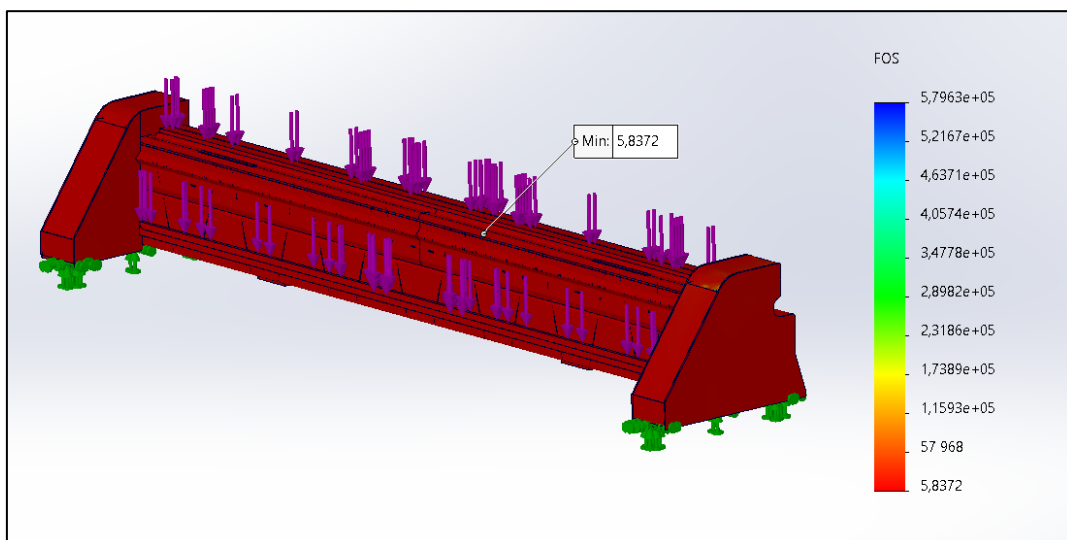


Figura 109 - Fator de Segurança *Setup I*

**Setup II**

No *Setup II* a análise já foi realizada na estrutura do montante e nesta não houve necessidade de aplicar algum controle de malha em determinados componentes. De igual modo substituíram-se componentes pelas suas cargas gravíticas conforme a Tabela 60 ilustra.

Tabela 60 - Componentes Removidos na Análise ao *Setup II*

Listagem	Quantidade	Carga a Aplicar [kg]
Cremalheiras Y	2	16
Guia Y	1	52
Ponte + Cabeçote	1	1400
Carga	1	1000

As condições de fronteira e carga estão evidenciadas na Figura 110. O montante foi considerado encastrado ao chão, representando a sua fixação estrutural. As cargas foram aplicadas ao longo da sua estrutura de forma distribuída, à exceção das massas correspondentes à ponte com o cabeçote e à carga externa aplicada para fins de ensaio. Estas últimas foram concentradas na zona dos dois patins lineares superiores, simulando com maior precisão a forma como a estrutura seria solicitada nessas regiões em situação de carga intensiva.

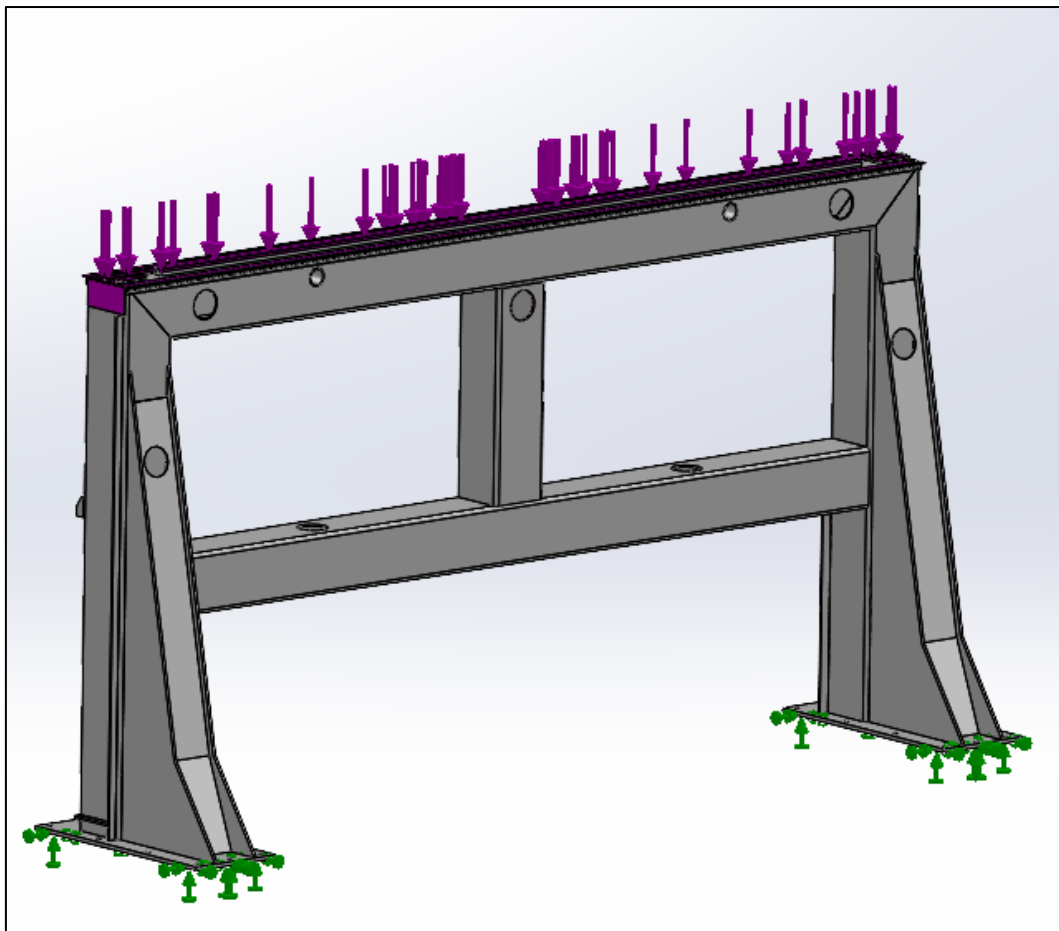


Figura 110 - Cargas e Condições de Fronteira do *Setup II*

A Figura 111, Figura 112 e Figura 113 representam os valores obtidos de tensão de von Mises, deslocamento e fator de segurança para este *Setup II*.

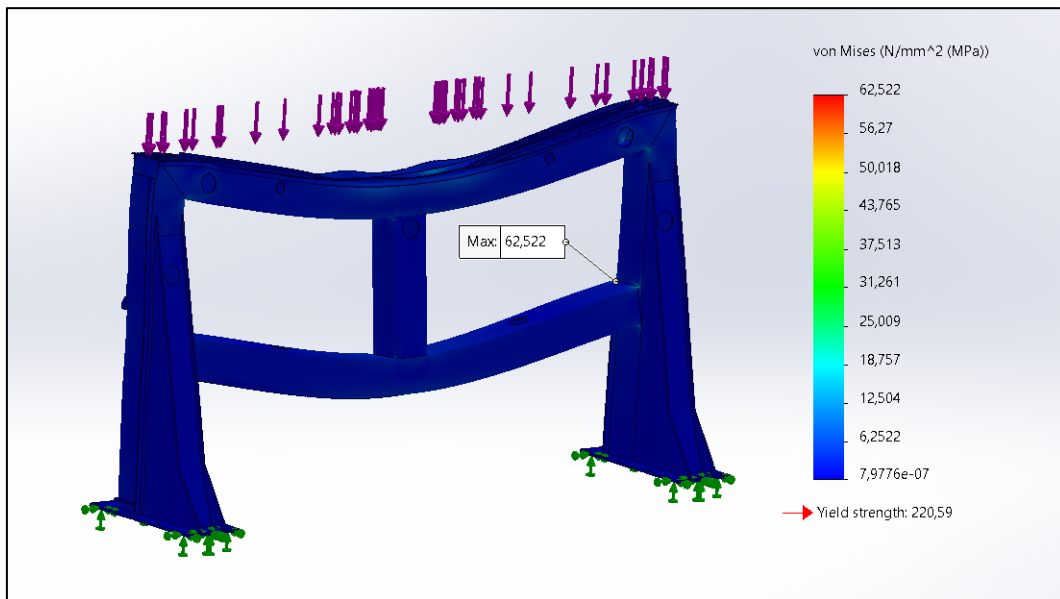


Figura 111 - Tensão de von Mises *Setup II* [MPa]

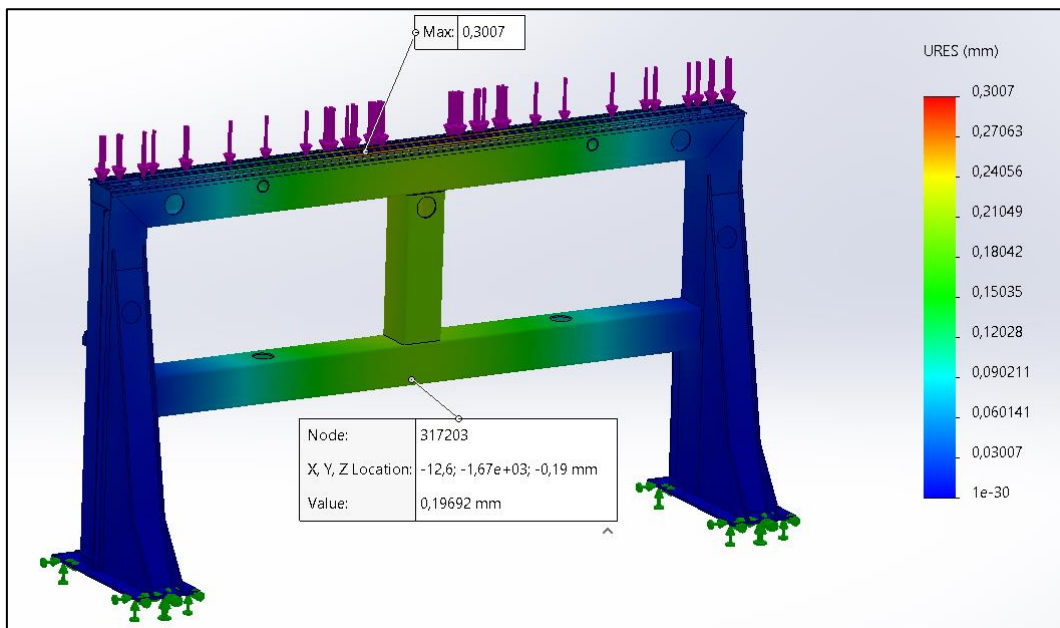


Figura 112 - Deslocamento *Setup II* [mm]

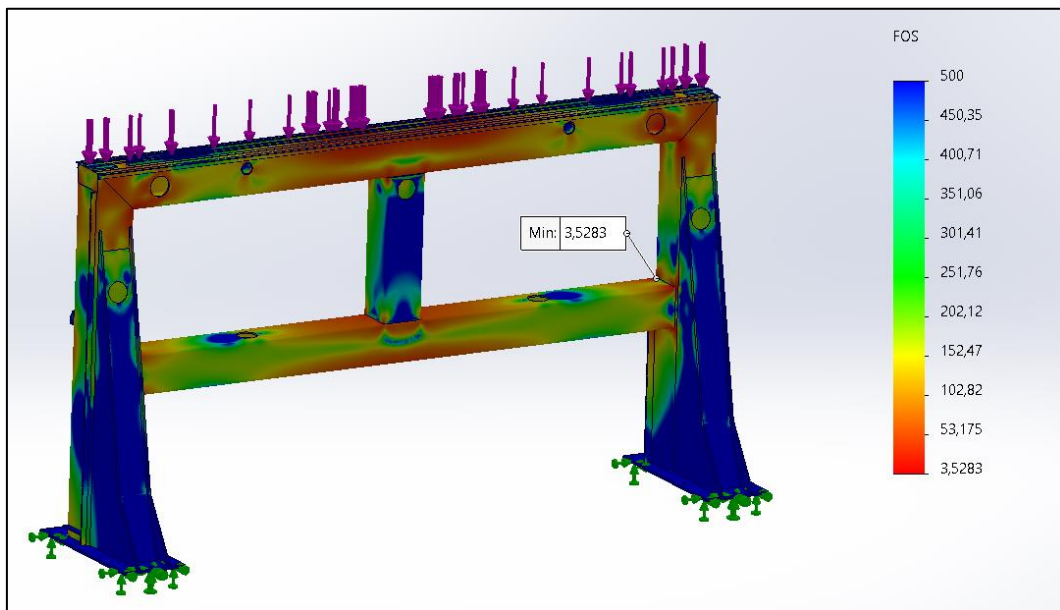


Figura 113 - Fator de Segurança *Setup II*

### **Setup III**

Este *Setup III* distingue-se apenas do *Setup II* na carga aplicada pois neste não existe carregamentos externos apenas cargas gravíticas que substituem os componentes ilustrados na Tabela 61. Desta forma as condições de fronteira e carregamento são idênticas à Figura 110.

Tabela 61 - Componentes Removidos na Análise ao *Setup III*

Listagem	Quantidade	Carga a Aplicar [kg]
Cremalheiras Y	2	16
Guia Y	1	52
Ponte + Cabeçote	1	1400

A Figura 114, Figura 115 e Figura 116 representam os valores obtidos de tensão de von Mises, deslocamento e fator de segurança para este *Setup III*.

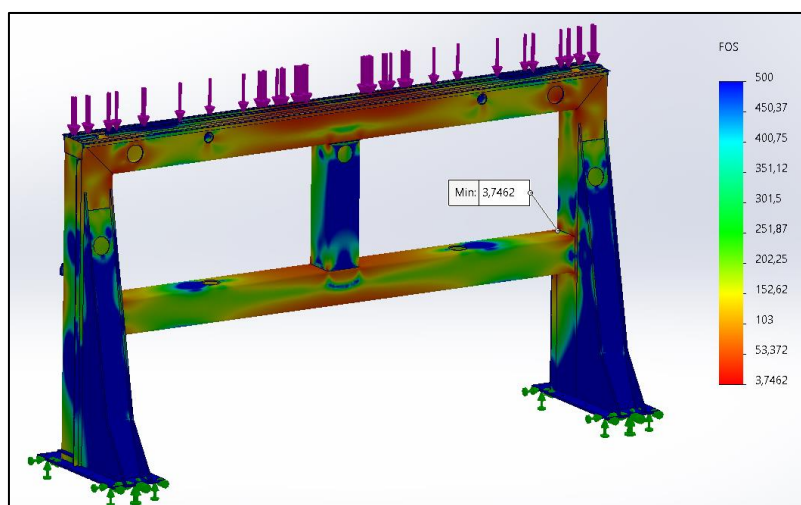


Figura 114 - Tensão de von Mises *Setup III* [MPa]

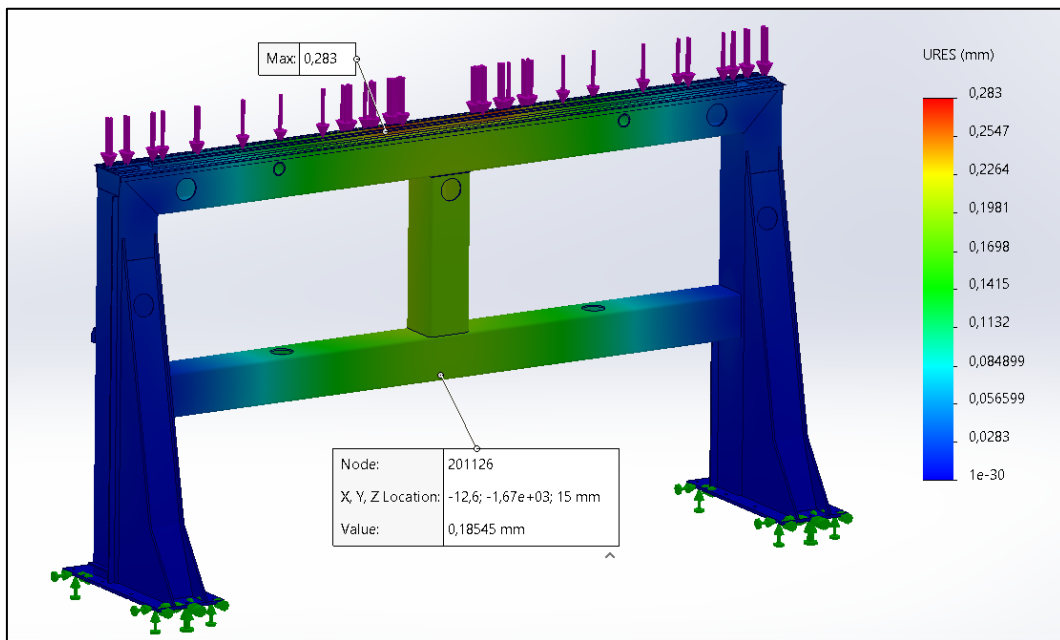


Figura 115 - Deslocamento Setup III [mm]

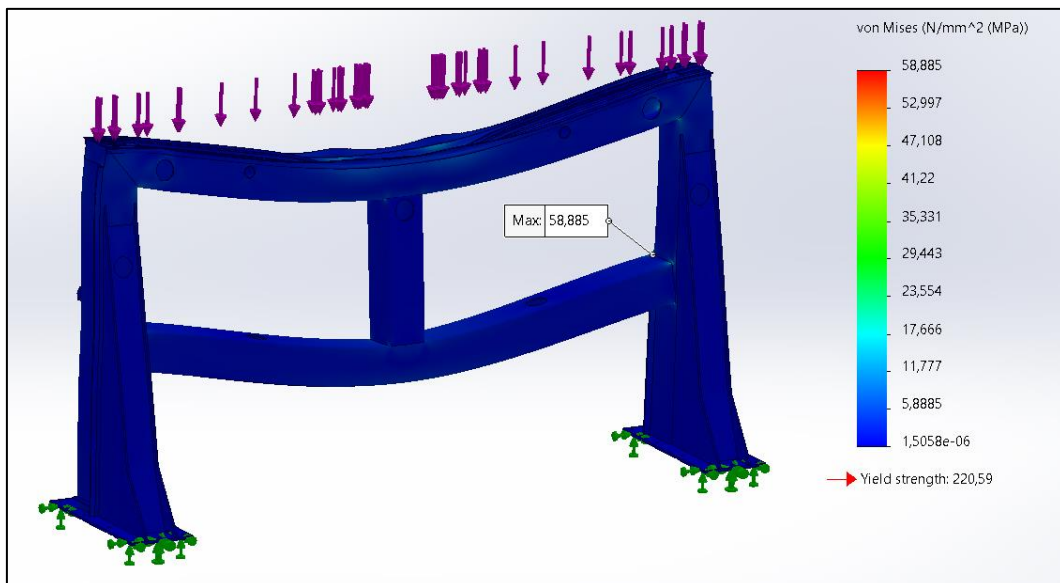


Figura 116 - Fator de Segurança Setup III



## Apêndice B – 2ª Fase de Ensaios Experimentais

Na 2ª fase de ensaios, foi realizada uma análise de convergência centrada na **estrutura da cabeça do 5º eixo**. Tal como na fase anterior, recorreu-se ao software *SolidWorks Simulation*, utilizando a malha do tipo *Blended Curvature-Based Mesh*.

Dado que todos os *Setups* desta fase analisavam a **mesma estrutura**, a **configuração da malha permaneceu constante** entre eles. A Tabela 62 apresenta os parâmetros de malha definidos para esta análise, após realização de uma análise de convergência.

Tabela 62 - Parâmetros de Malha da 2ª Fase

	Tamanho Máximo do Elemento (mm)	Tamanho Mínimo do Elemento (mm)	Nº Mínimo de Elementos num Círculo	Grow Ratio
<i>Setups</i>	30	1,5	8	1,4

As condições de fronteira aplicadas foram iguais em todos os *Setups* desta fase. A única variação introduzida foi a posição da aplicação da carga, mantendo-se constante a sua magnitude ao longo dos diferentes casos simulados. A carga aplicada em todos os *Setups* foi de 2000 N, correspondente à carga máxima dos ensaios realizados.

Neste caso, não foram aplicadas simplificações geométricas à estrutura da cabeça do 5º eixo. Devido às suas dimensões reduzidas, em comparação com outros elementos estruturais como os montantes e a ponte, o tempo de computação e o número de nós gerados foram compatíveis com a capacidade de processamento disponível, tornando desnecessárias quaisquer simplificações para fins de otimização.

Para todos os *Setups* foram aplicadas as cargas gravíticas dos componentes removidos conforme a Tabela 63.

Tabela 63 - Componentes Removidos na Análise ao *Setups* da 2ª Fase

Listagem	Quantidade	Carga a Aplicar [kg]
<i>Spindle</i> + Estrutura <i>Spindle</i>	1	200
Conjunto Motorreductor Eixo A	1	35
Carga	1	200

**Setup I**

A Figura 117, Figura 118 e Figura 119 representam os valores obtidos de tensão de von Mises, deslocamento e fator de segurança para este *Setup I*.

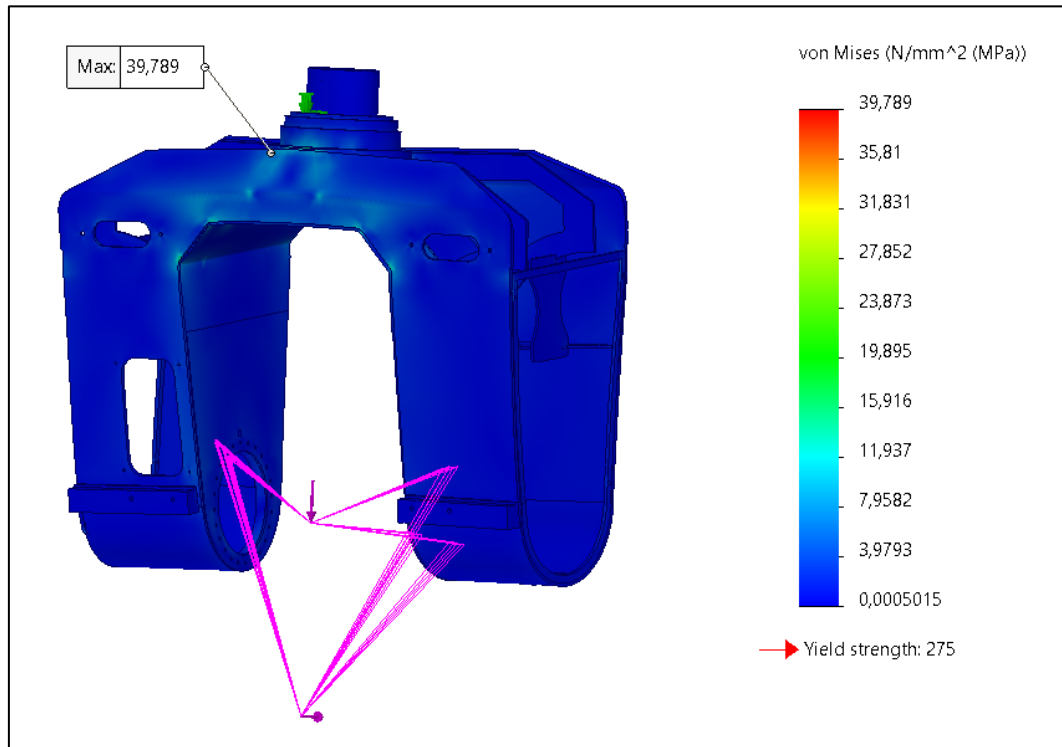


Figura 117 - Tensão de von Mises *Setup I* [MPa]

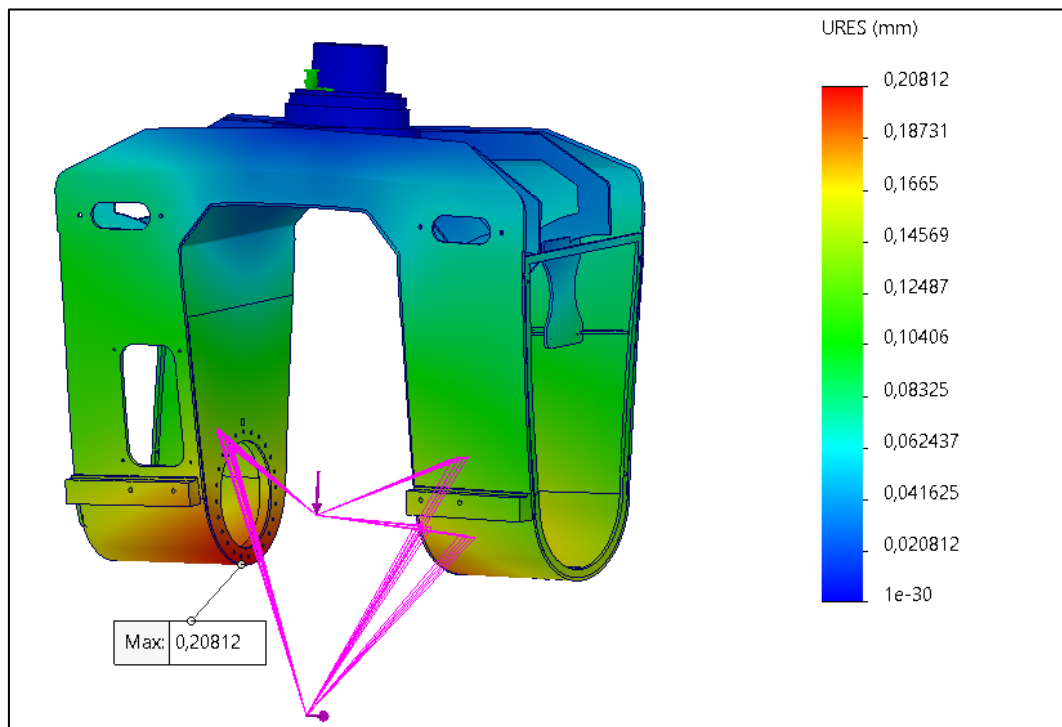


Figura 118 - Deslocamento *Setup I* [mm]

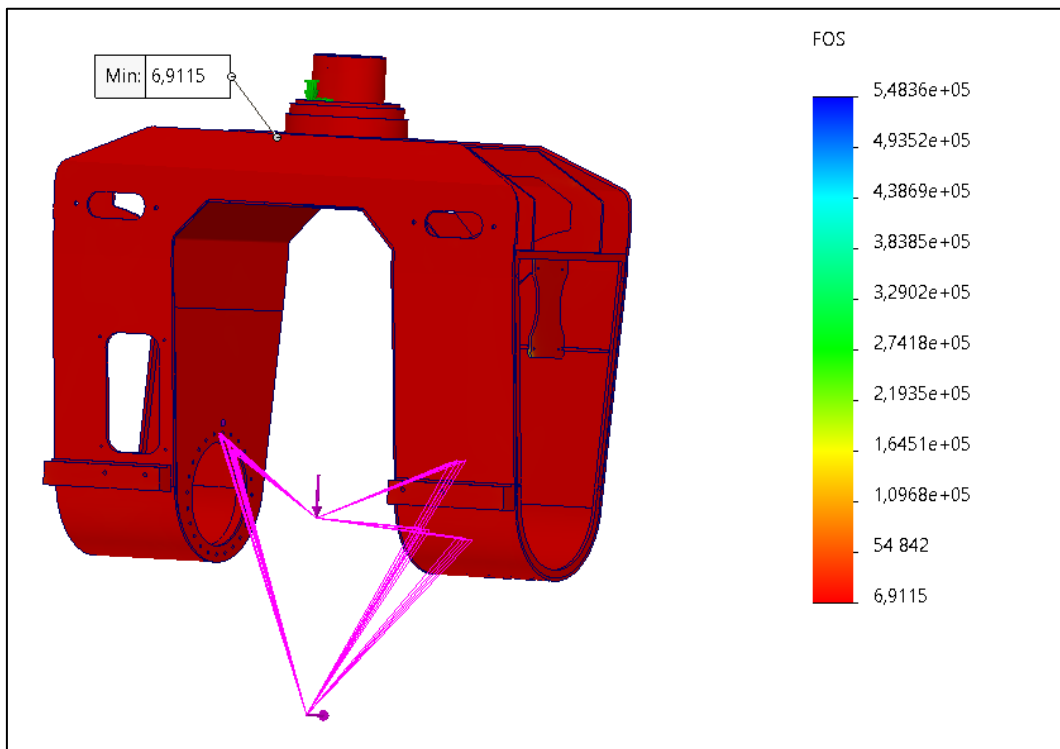


Figura 119 - Fator de Segurança *Setup I*

**Setup II**

A Figura 120, Figura 121 e Figura 122 representam os valores obtidos de tensão de von Mises, deslocamento e fator de segurança para este *Setup II*.

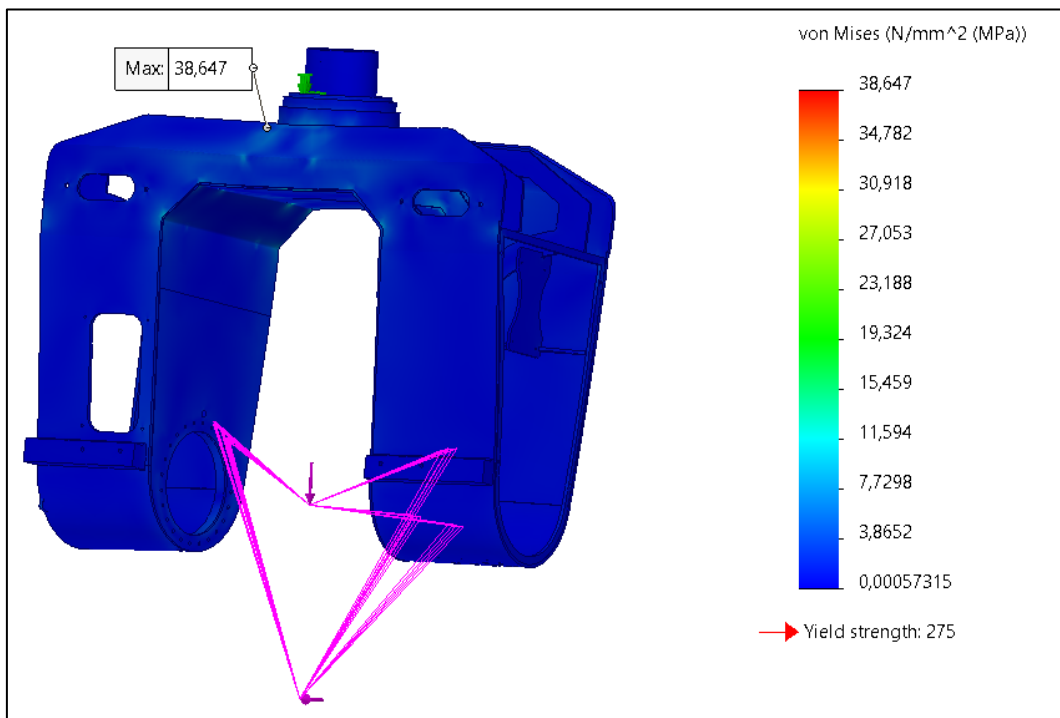


Figura 120 - Tensão de von Mises *Setup II* [MPa]

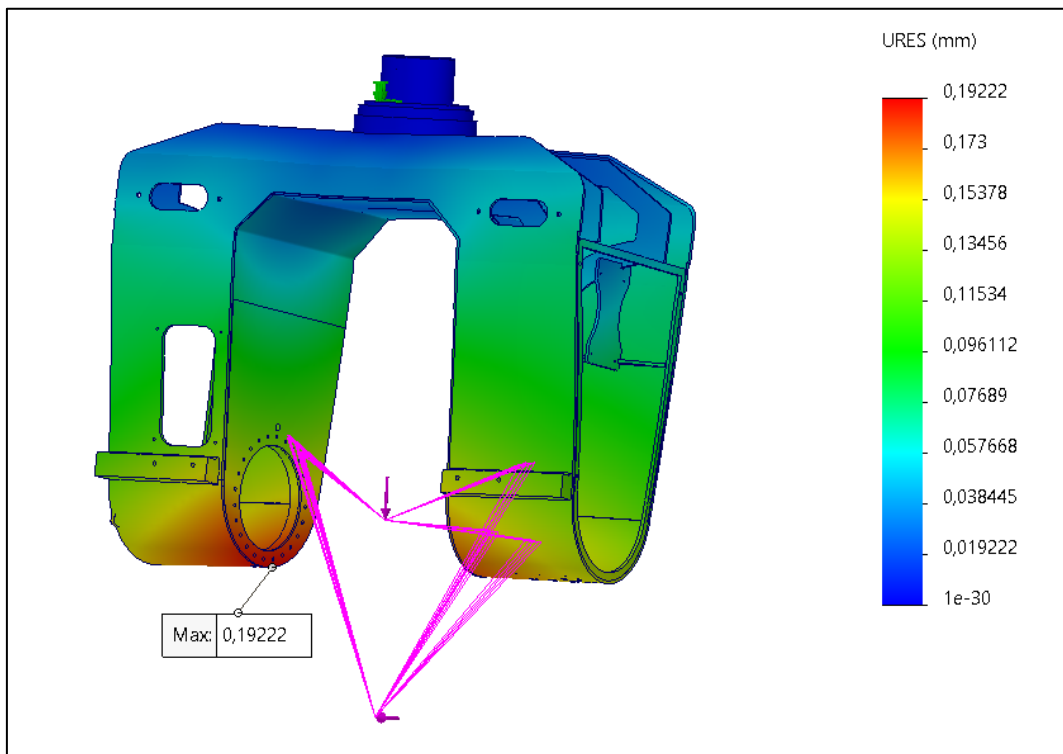


Figura 121 - Deslocamento Setup II [mm]

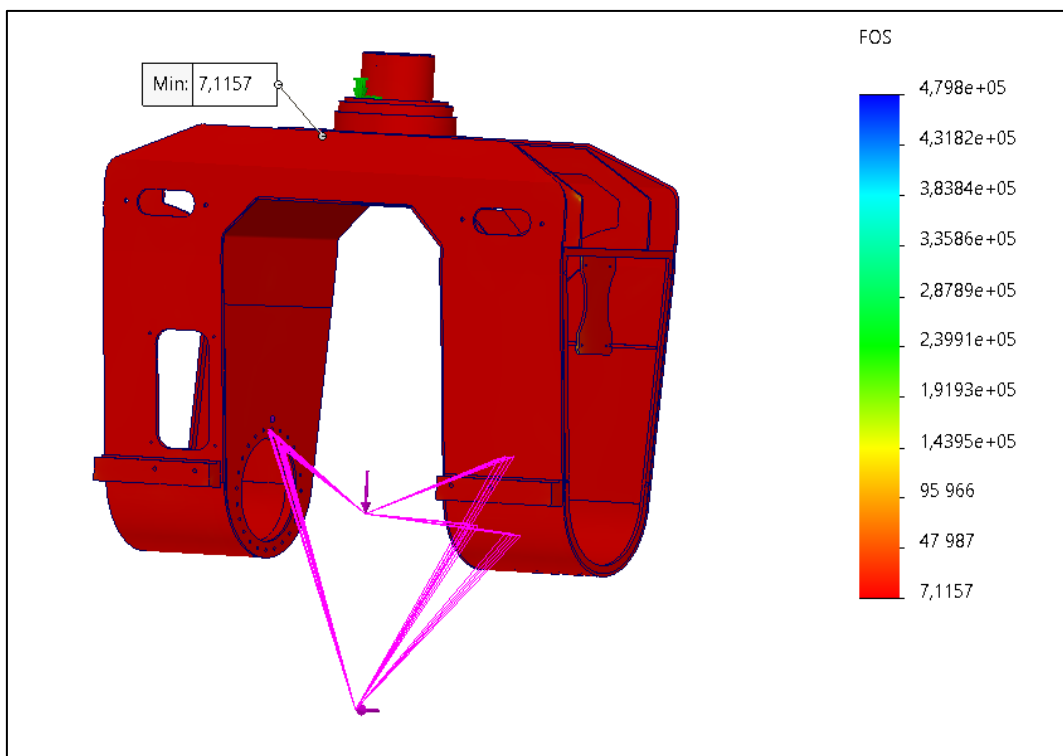


Figura 122 - Fator de Segurança Setup II

**Setup III**

A Figura 123, Figura 124 e Figura 125 representam os valores obtidos de tensão de von Mises, deslocamento e fator de segurança para este Setup III.

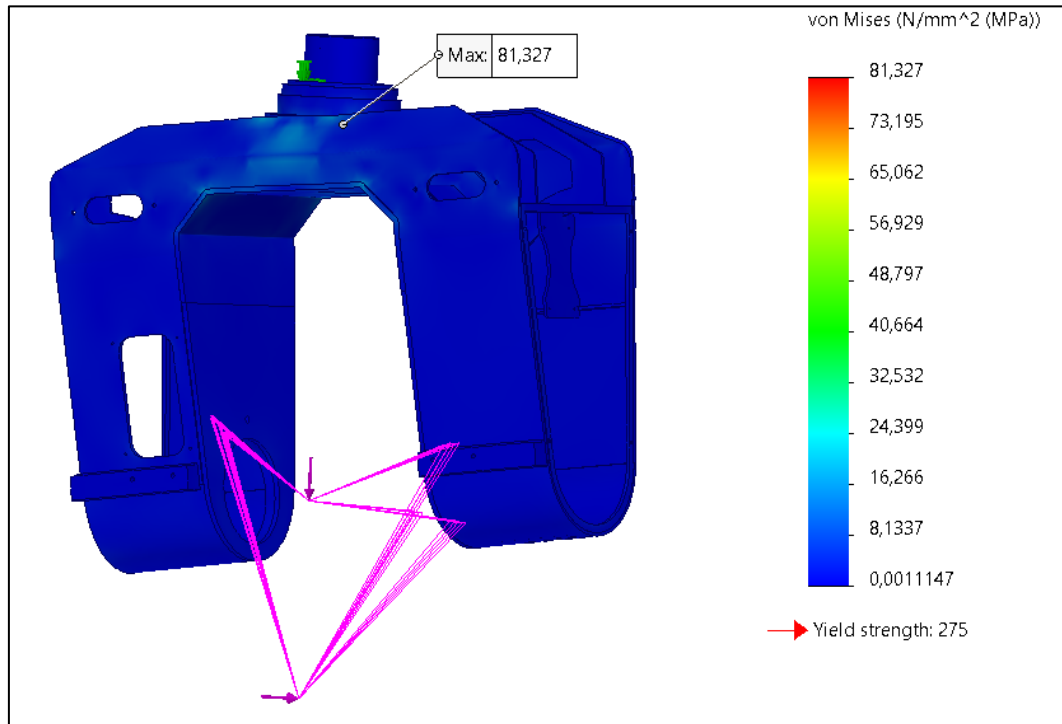


Figura 123 - Tensão de von Mises Setup III [MPa]

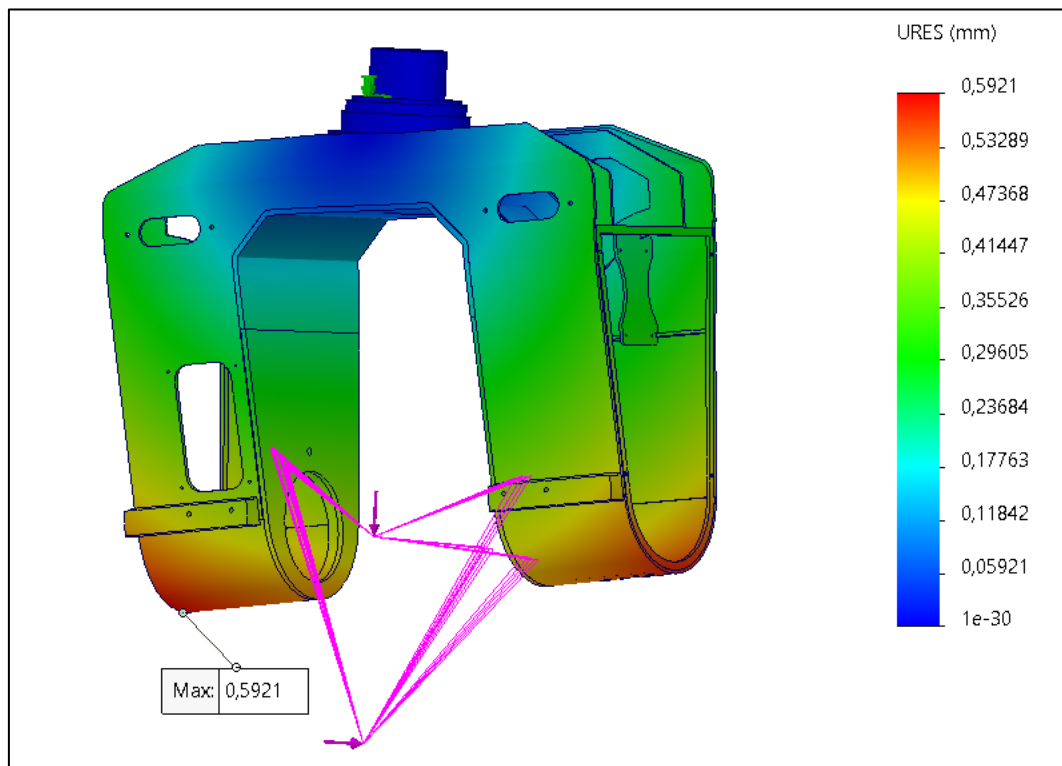


Figura 124 - Deslocamento Setup III [mm]

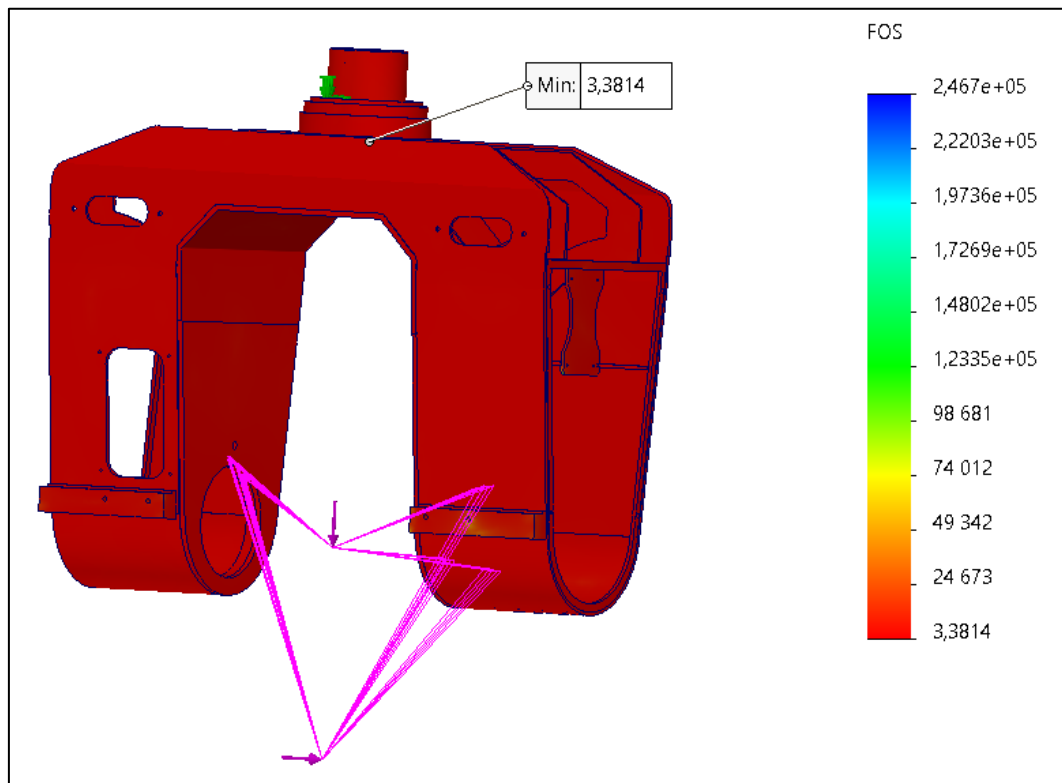


Figura 125 - Fator de Segurança *Setup III*

**Setup V**

A Figura 126, Figura 127 e Figura 128 representam os valores obtidos de tensão de von Mises, deslocamento e fator de segurança para este *Setup V*.

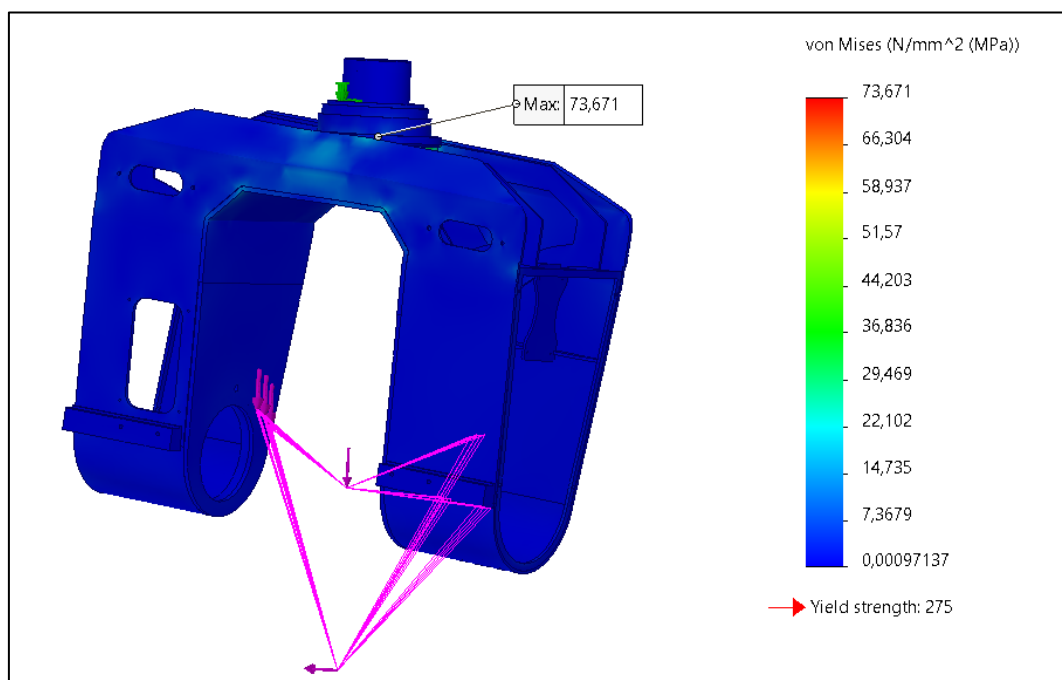


Figura 126 - Tensão de von Mises *Setup V* [MPa]

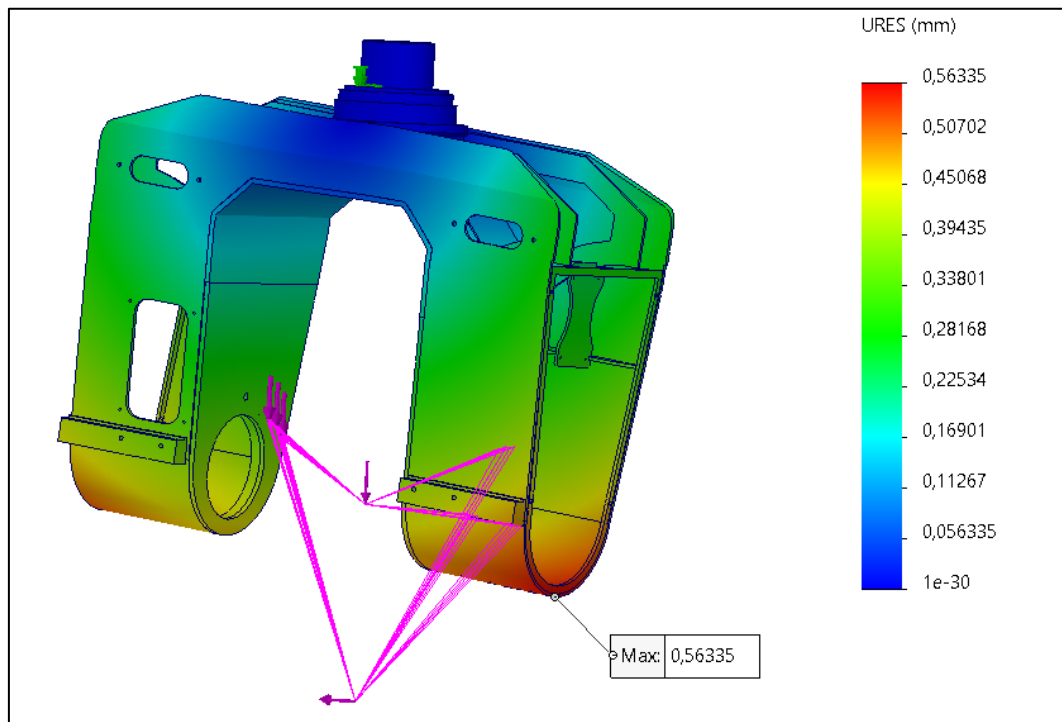


Figura 127 - Deslocamento Setup V [mm]

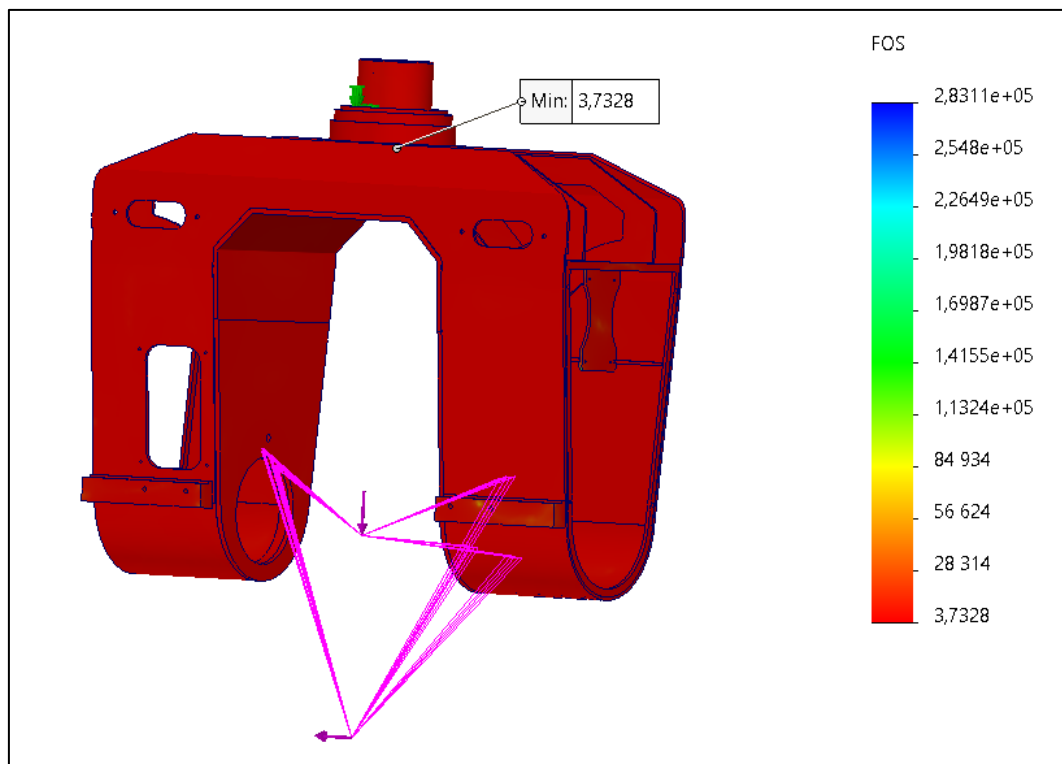


Figura 128 - Fator de Segurança Setup V

**Setup VI**

A Figura 129, Figura 130 e Figura 131 representam os valores obtidos de tensão de von Mises, deslocamento e fator de segurança para este Setup VI.

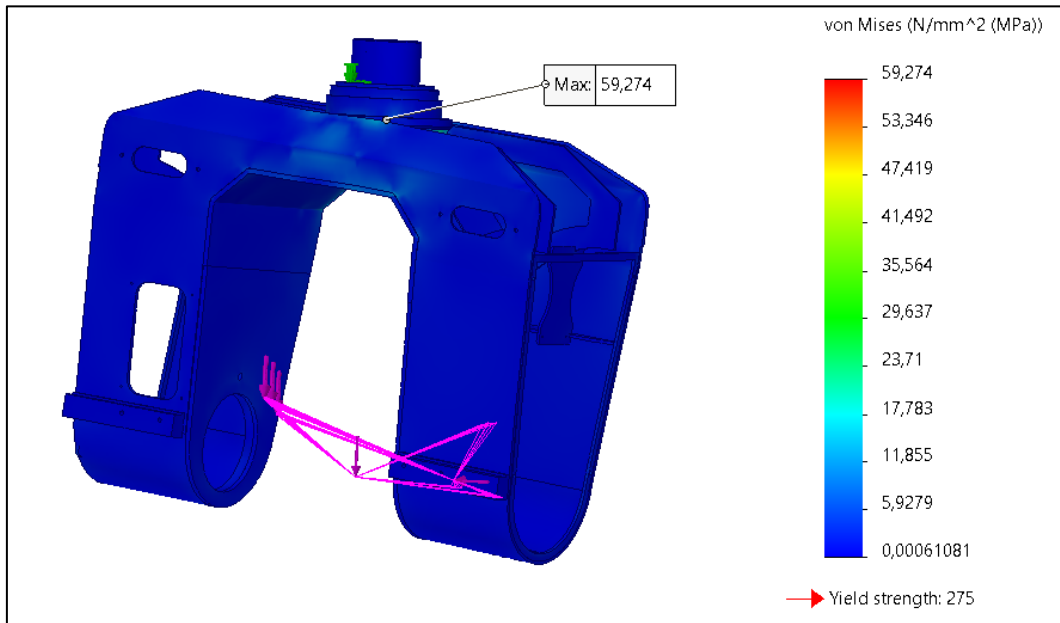


Figura 129 - Tensão de von Mises Setup VI [MPa]

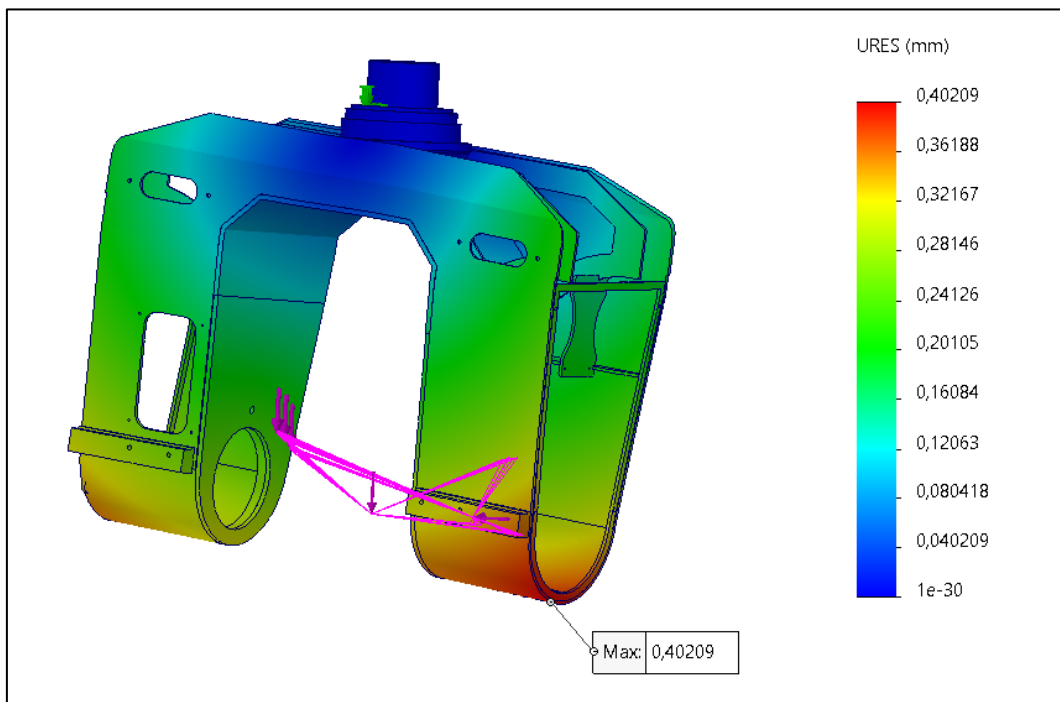


Figura 130 - Deslocamento Setup VI [mm]

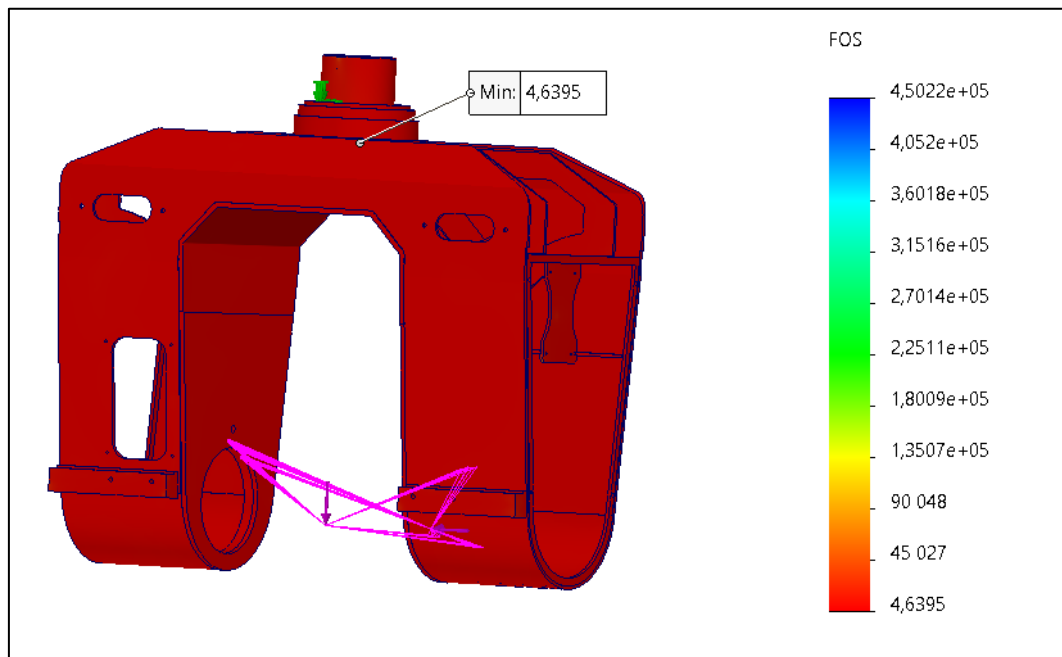


Figura 131 - Fator de Segurança *Setup VI*

**Setup VII**

A Figura 132, Figura 133 e Figura 134 representam os valores obtidos de tensão de von Mises, deslocamento e fator de segurança para este *Setup VII*.

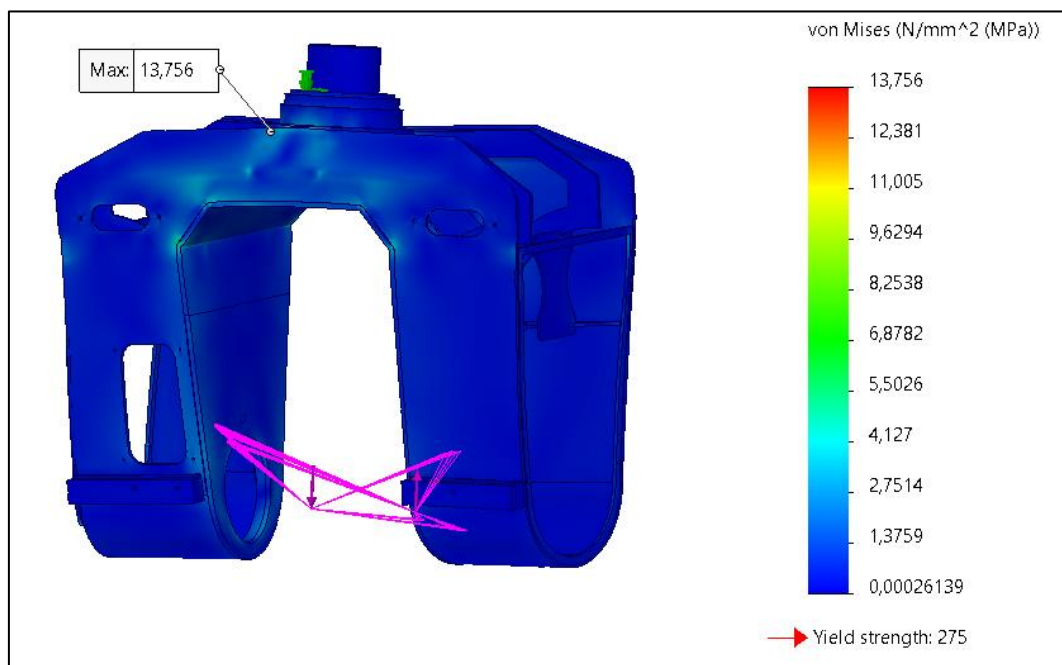


Figura 132 - Tensão de von Mises *Setup VII* [MPa]

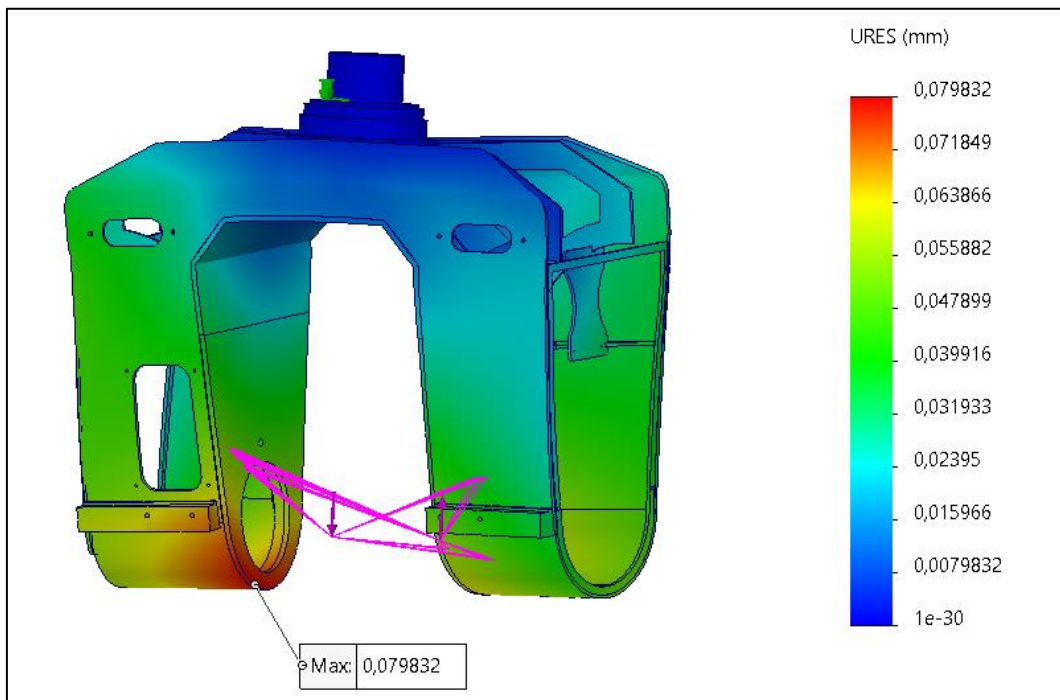


Figura 133 - Deslocamento *Setup VII* [mm]

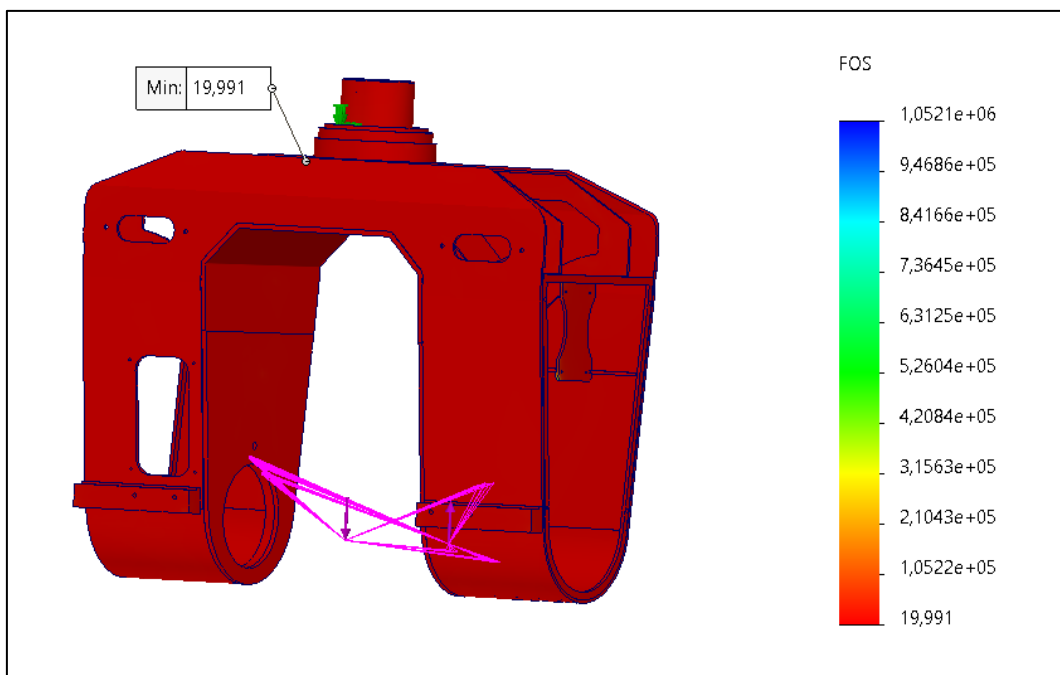


Figura 134 - Fator de Segurança *Setup VII*

**Setup VIII**

A Figura 135, Figura 136 e Figura 137 representam os valores obtidos de tensão de von Mises, deslocamento e fator de segurança para este Setup VIII.

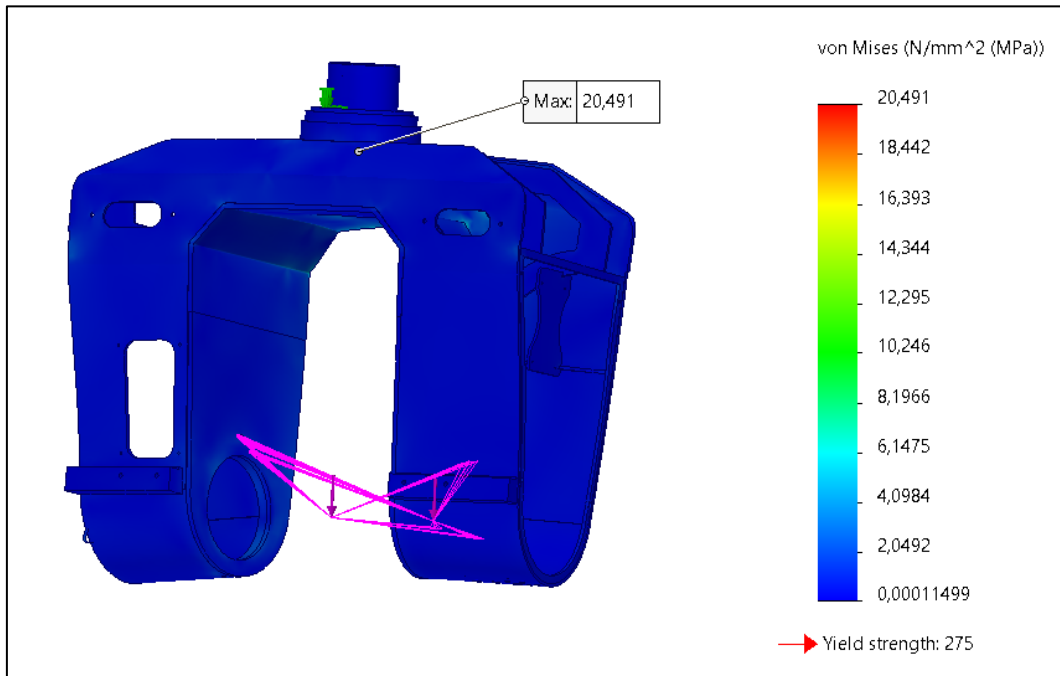


Figura 135 - Tensão de von Mises Setup VIII [MPa]

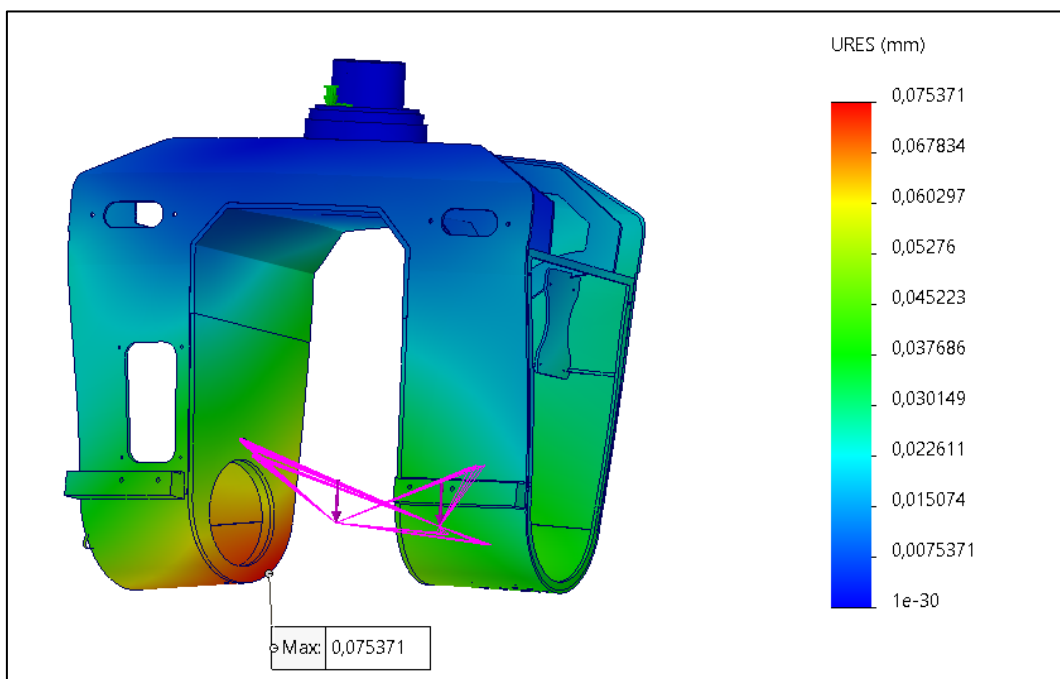


Figura 136 - Deslocamento Setup VIII [mm]

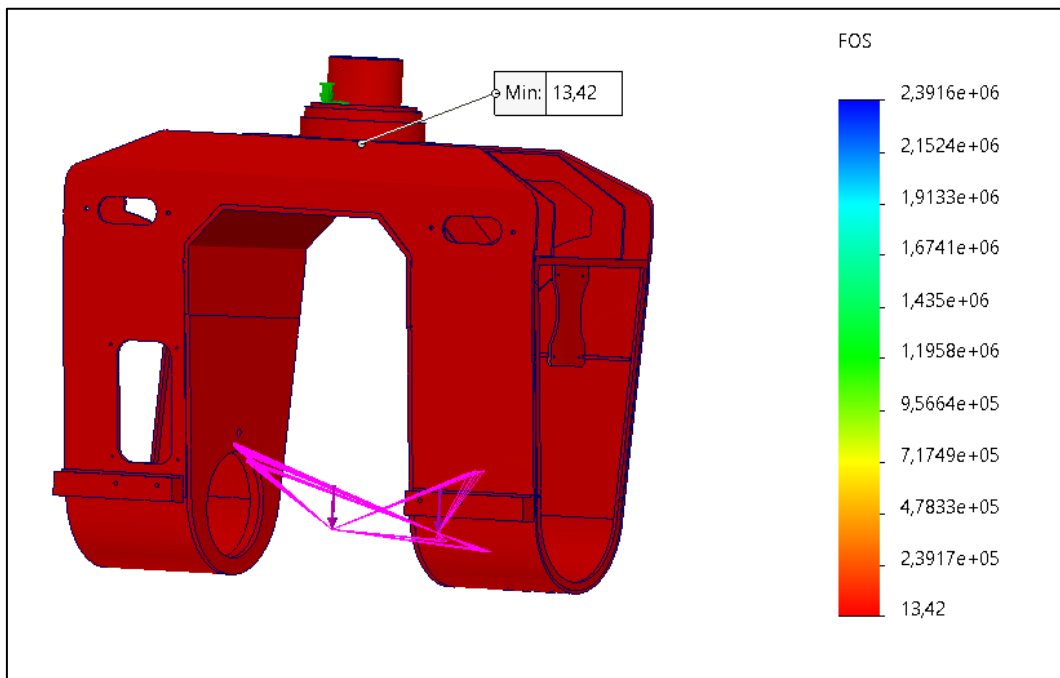
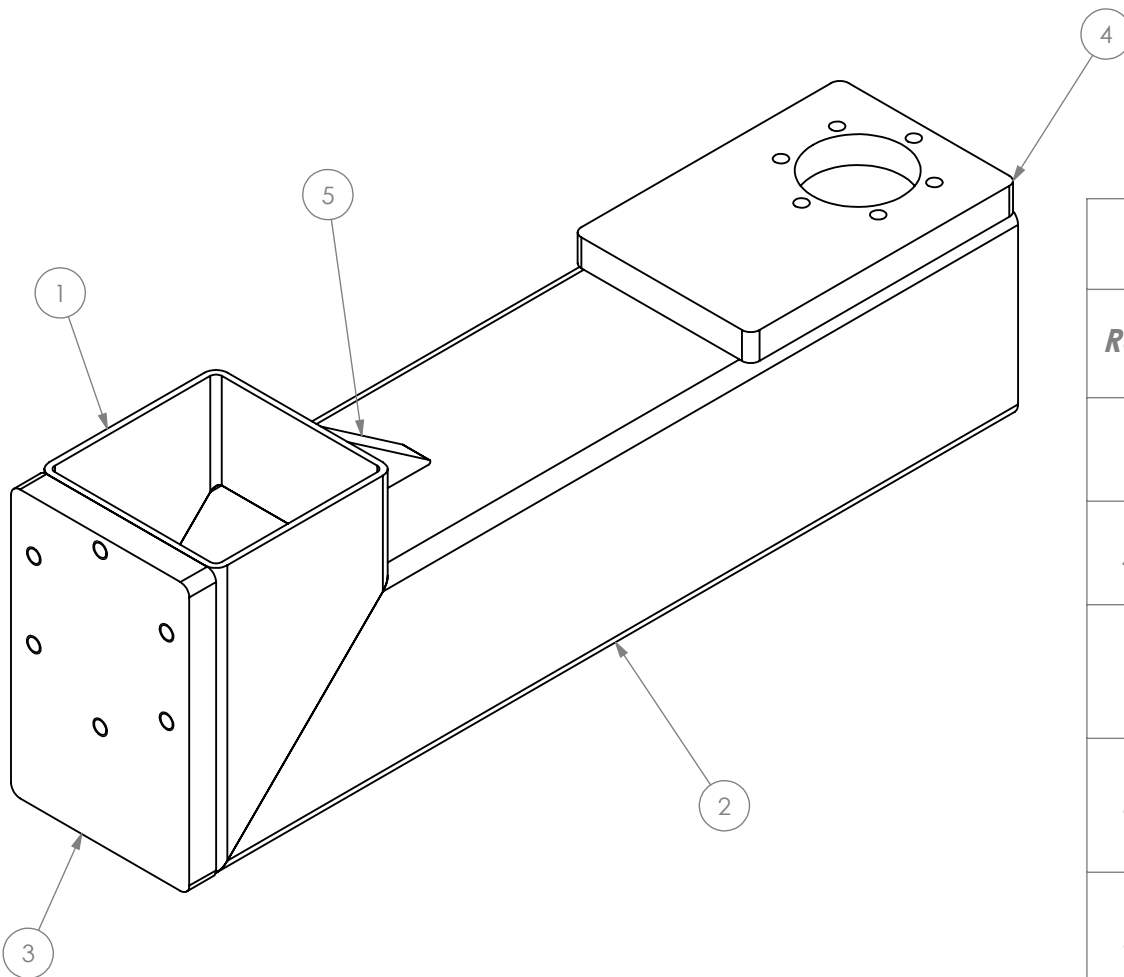





Figura 137 - Fator de Segurança Setup VIII

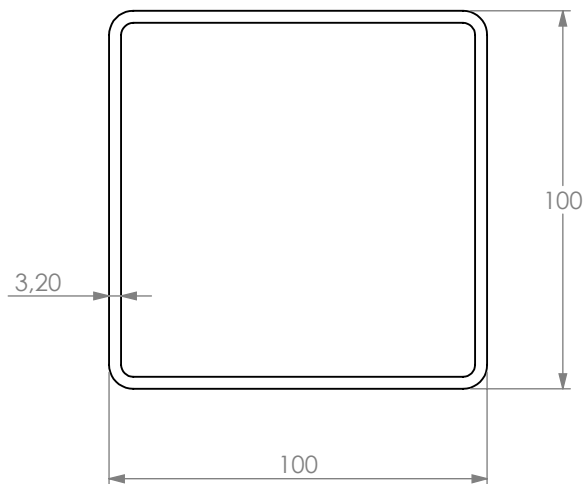
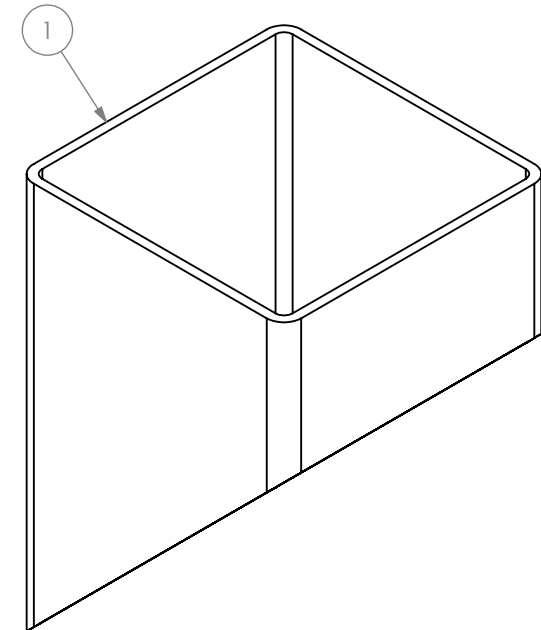
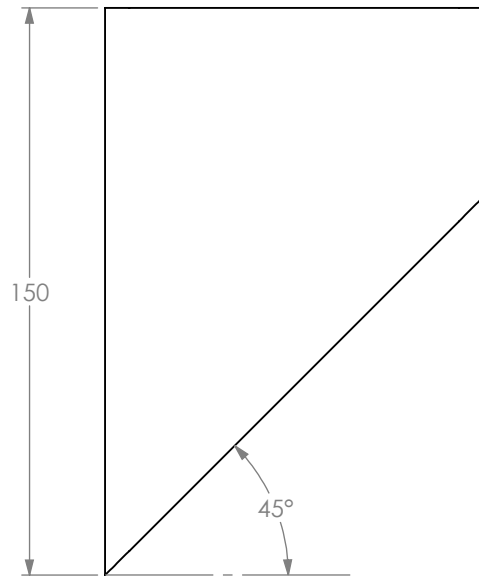
De seguida apresentam-se os desenhos de definição desenvolvidos para a construção dos componentes necessários à realização dos ensaios desta 2ª fase de ensaios.



### Lista de Corte

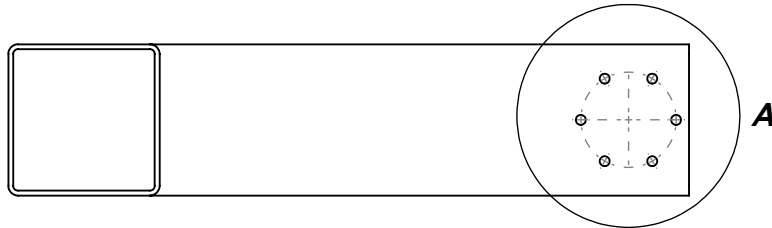
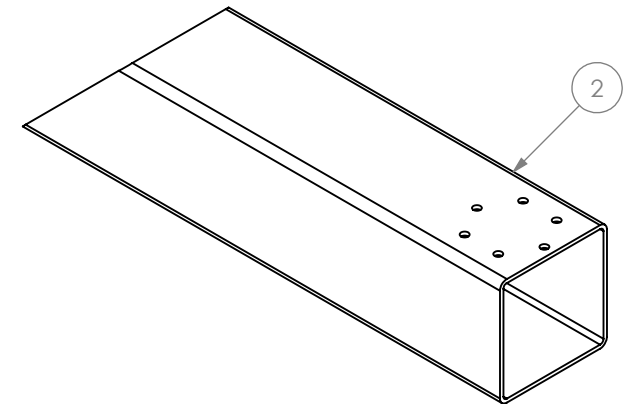
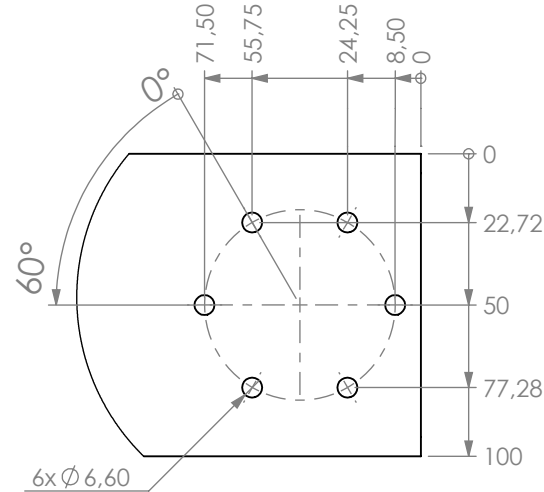
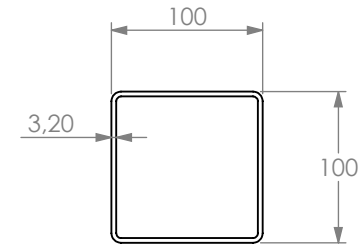
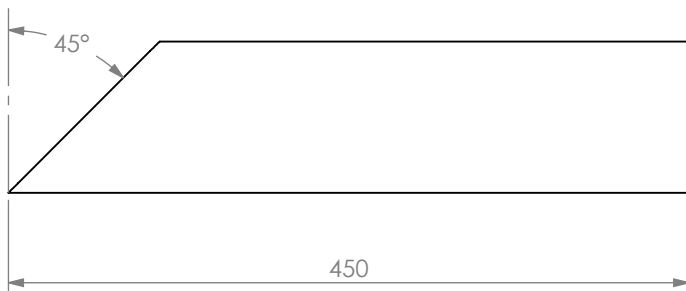
Ref.	Perfil	Dimensão (mm)	Qtd.	Ângulo 1 (°)	Ângulo 2 (°)	Peso (kg)
1	100 x 100 x 3.2	150	1	45°	0°	
2	100 x 100 x 3.2	450	1	0°	45°	
3	EQDIASTC5E XC014_01		1			1.73
4	EQDIASTC5E XC014_02		1			1.50
5	EQDIASTC5E XC014_03		1			

			Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 8.13 Kg		Folha 1 / 6												
			Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		Tratamento Superficial														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>Luis - Est.</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </tbody> </table>			A4	Data	Nome	Des.	09/04/2025	Luis - Est.	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	Designação : Tubo Apoio e Suporte		Tipo		Escala 1:3
			A4	Data	Nome														
			Des.	09/04/2025	Luis - Est.														
			Verif.																
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia																	
Área																			
N/D																			
N/D																			
			Notas:																
			Artigo / Desenho: EQDIASTC5EXC014				 NP 327 - ISO 128												
																			







Artigo	Código Barras
EQDIASTC5EXC014	

	Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 8.13 Kg	Folha <b>2</b> <hr/> <b>6</b>											
	Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		<b>Tratamento Superficial</b> Tipo      Área N/D      N/D N/D      N/D N/D      N/D												
<b>Designação :</b> Tubo Apoio e Suporte		Notas:		Escala <b>1:2</b>											
<table border="1"> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>Luis - Est.</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </table>	A4	Data	Nome		Des.	09/04/2025	Luis - Est.	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	Artigo / Desenho: <b>EQDIASTC5EXC014</b> 	
A4	Data	Nome													
Des.	09/04/2025	Luis - Est.													
Verif.															
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia													

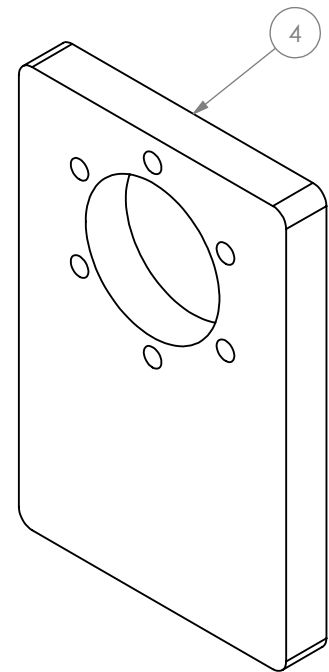
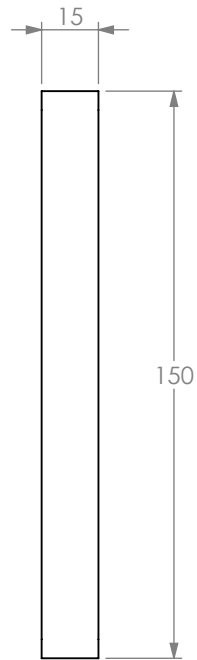
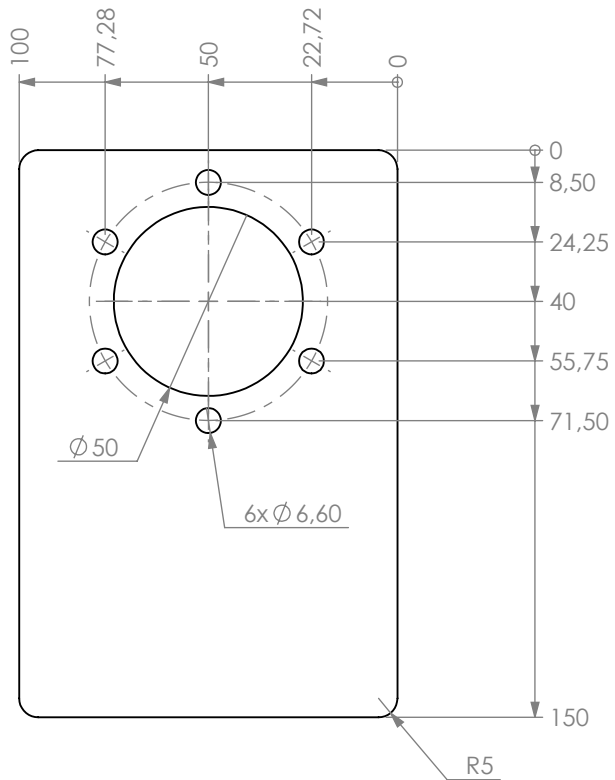


**DETAIL A**  
**SCALE 2 : 5**

Artigo	Código Barras
EQDIASTC5EXC014	

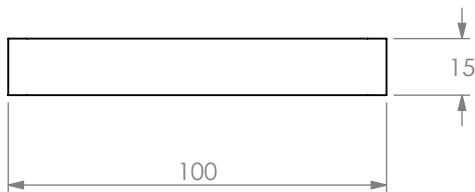
			Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 8.13 Kg	Folha <b>3</b> <hr/> <b>6</b>
			Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		Tratamento Superficial	
Designação : Tubo Apoio e Suporte			Tipo		Área	Escala <b>1:5</b>
			N/D		N/D	
			N/D		N/D	
			N/D		N/D	
Notas:						
A4   Data   Nome Des.   09/04/2025   Luís - Est. Verif.   Aprov.   09/04/2025   A. Gouveia			Artigo / Desenho: <b>EQDIASTC5EXC014</b> 			 NP 327 - ISO 128



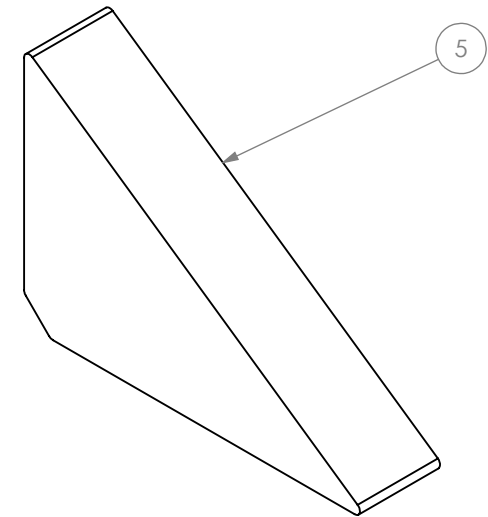
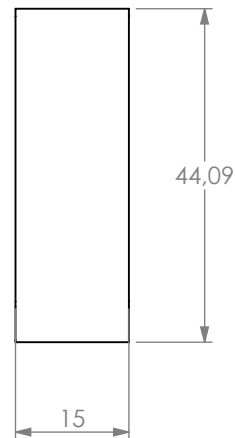
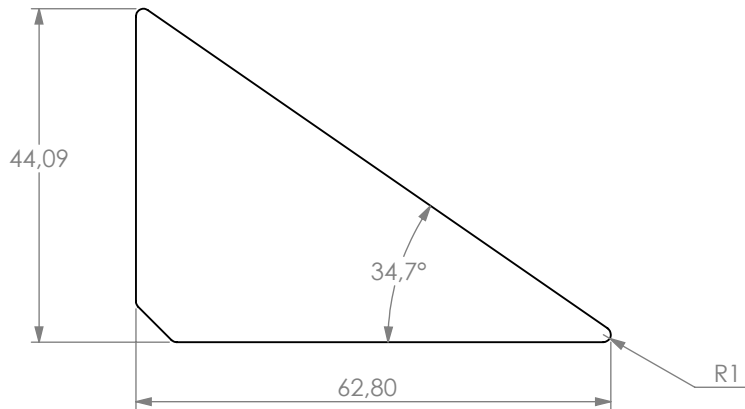


EQDIASTC5EXC014\_02

Artigo	Código Barras
EQDIASTC5EXC014	





	Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 8.13 Kg	Folha <b>5</b> <hr/> <b>6</b>										
	Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		<b>Tratamento Superficial</b>											
	Designação : Tubo Apoio e Suporte		<table border="1"> <tr> <th>Tipo</th> <th>Área</th> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> </table>	Tipo	Área	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	Escala <b>1:2</b>		
	Tipo	Área												
N/D	N/D													
N/D	N/D													
N/D	N/D													
<table border="1"> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>Luis - Est.</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </table>	A4	Data	Nome	Des.	09/04/2025	Luis - Est.	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	Notas:	
A4	Data	Nome												
Des.	09/04/2025	Luis - Est.												
Verif.														
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia												
Artigo / Desenho: <b>EQDIASTC5EXC014</b>														
				NP 327 - ISO 128										

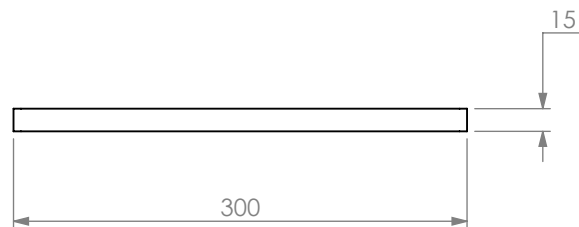
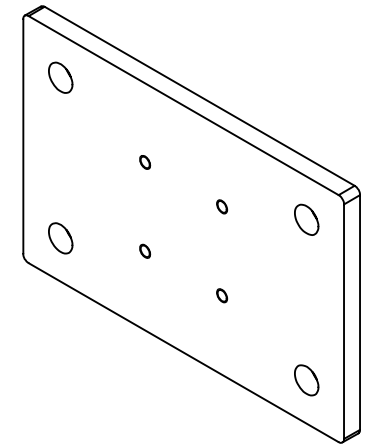
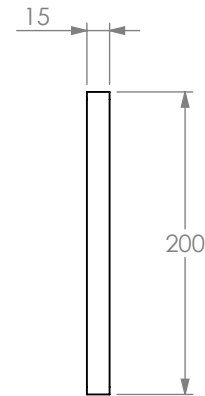
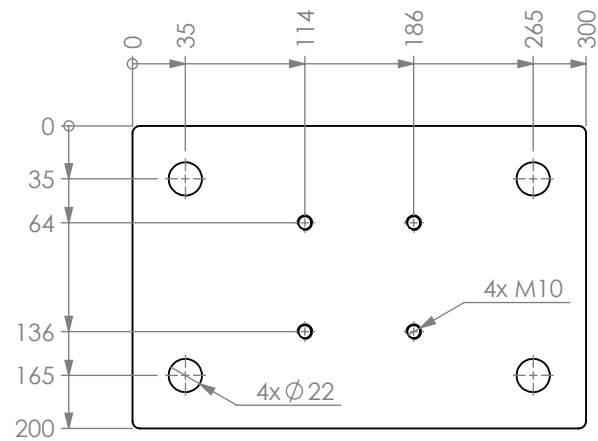


EQDIASC5EXC014\_03







Artigo	Código Barras
EQDIASC5EXC014	

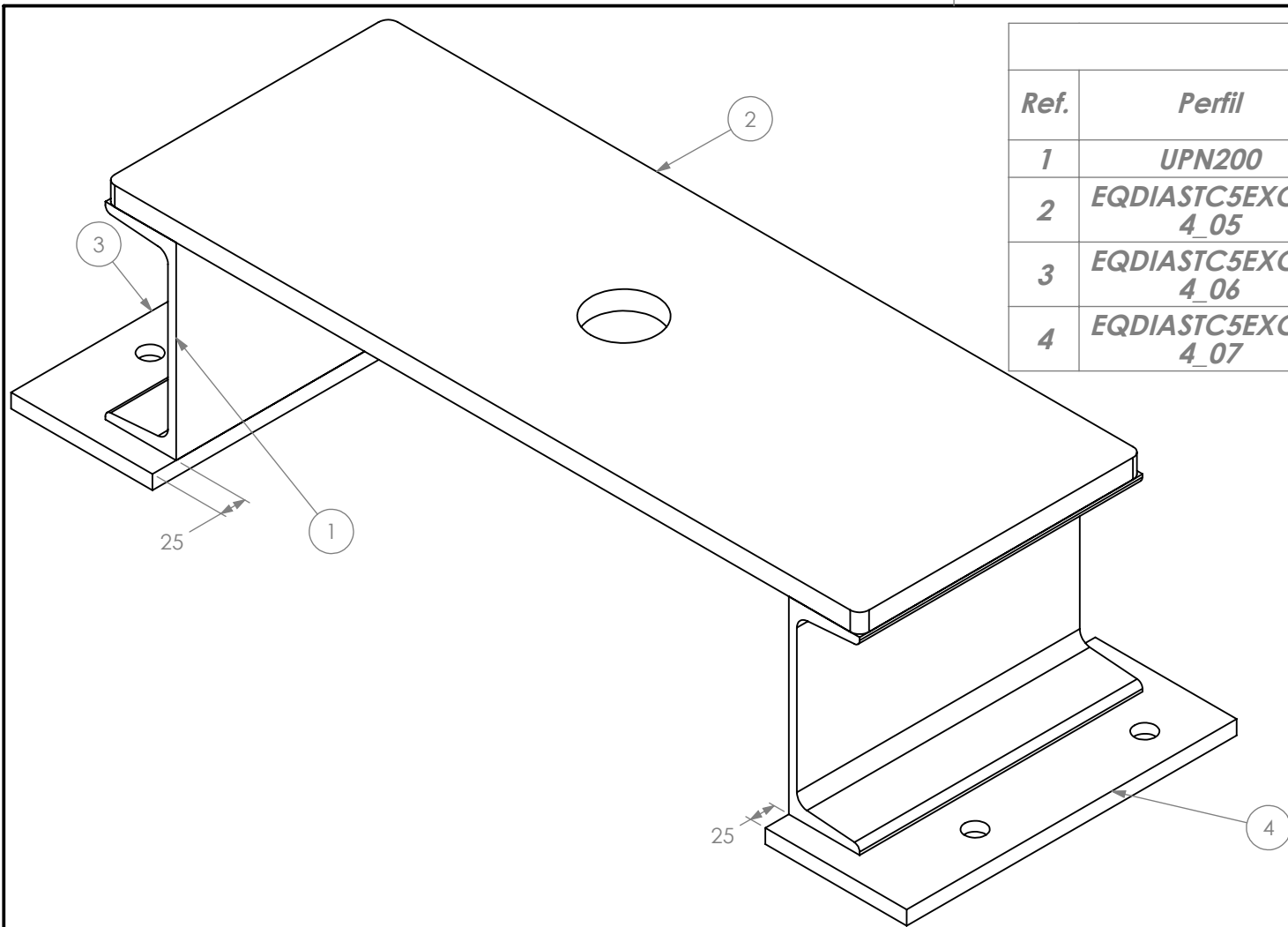
			Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 8.13 Kg	Folha 6 / 6													
			Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		Tratamento Superficial														
<table border="1"> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>Luis - Est.</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </table>			A4	Data	Nome	Des.	09/04/2025	Luis - Est.	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	Designação : Tubo Apoio e Suporte		Tipo		Escala 1:1
			A4	Data	Nome														
			Des.	09/04/2025	Luis - Est.														
			Verif.																
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia																	
Área																			
			N/D		N/D														
			N/D		N/D														
			Notas:																
Artigo / Desenho: EQDIASC5EXC014						 NP 327 - ISO 128													
																			



EQDIASTC5EXC014\_04




Artigo	Código Barras
EQDIASTC5EXC014	

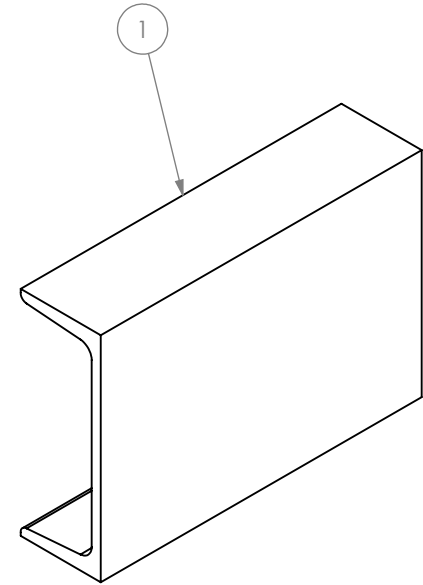
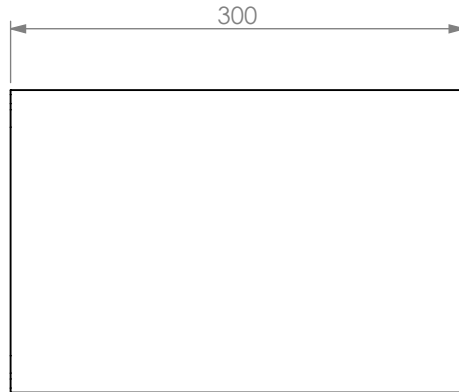
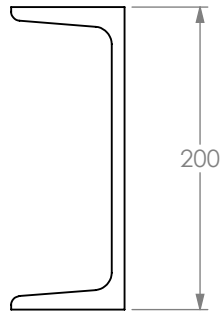
	Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 6.82 Kg	Folha 1 / 1 Escala 1:5											
	Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		<b>Tratamento Superficial</b>												
	Designação : Fixação Cilindro Chão		<b>Tipo</b> N/D		<b>Área</b> N/D										
			<b>N/D</b>		<b>N/D</b>										
<table border="1"> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>Luis - Est.</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </table>	A4	Data	Nome	Des.	09/04/2025	Luis - Est.	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	Notas:		
A4	Data	Nome													
Des.	09/04/2025	Luis - Est.													
Verif.															
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia													
Artigo / Desenho: EQDIASTC5EXC014 				 NP 327 - ISO 128											



### Lista de Corte

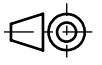
Ref.	Perfil	Dimensão (mm)	Qtd.	Ângulo 1 (°)	Ângulo 2 (°)	Peso (kg)
1	UPN200	300	2	0°	0°	
2	EQDIASTC5EXC01 4_05		1			
3	EQDIASTC5EXC01 4_06		1			6.08
4	EQDIASTC5EXC01 4_07		1			6.08

			Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 64.06 Kg	Folha 1 4																				
			Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		Tratamento Superficial																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>Luis - Est.</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </tbody> </table>			A4	Data	Nome	Des.	09/04/2025	Luis - Est.	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	Designação : Fixação Dinamómetro		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo</th> <th>Área</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo	Área	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	Escala 1:5
			A4	Data	Nome																					
			Des.	09/04/2025	Luis - Est.																					
			Verif.																							
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia																								
Tipo	Área																									
N/D	N/D																									
N/D	N/D																									
N/D	N/D																									
Notas:																										
Artigo / Desenho: EQDIASTC5EXC014																										
			NP 327 - ISO 128																							

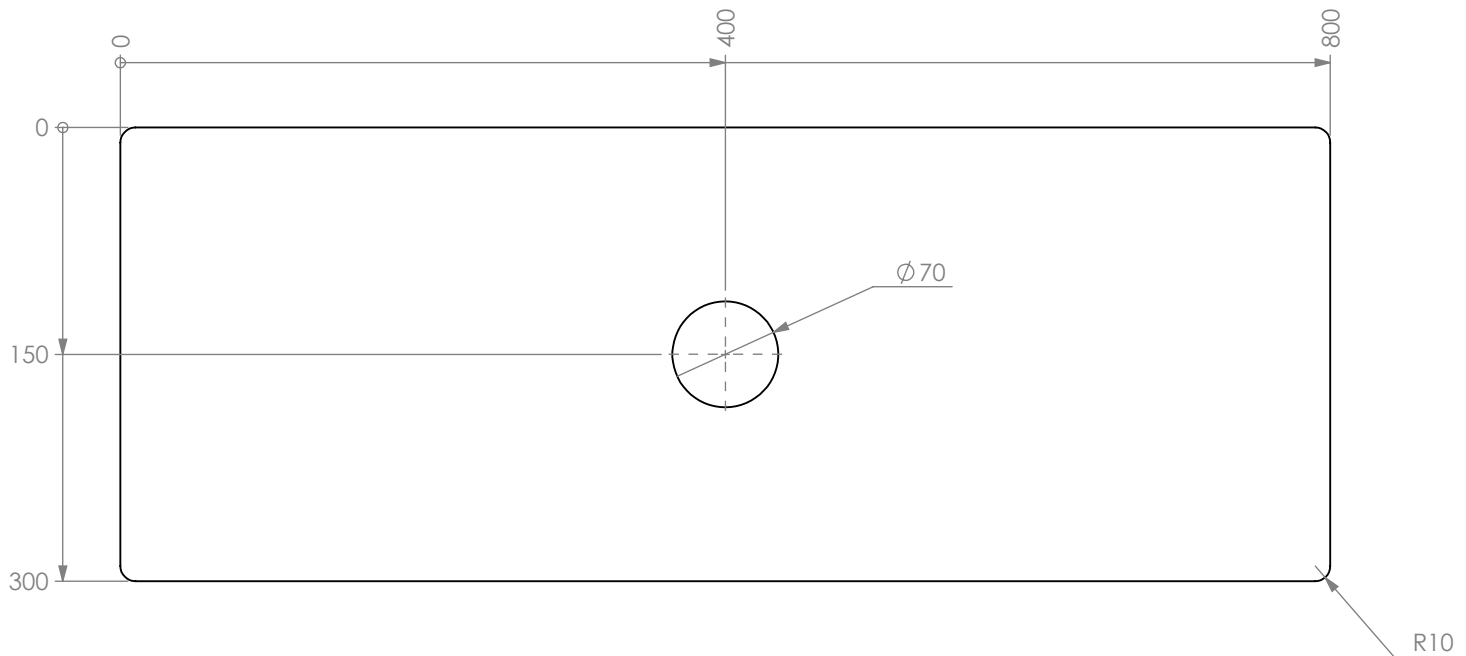


Artigo	Código Barras
EQDIASTC5EXC014	

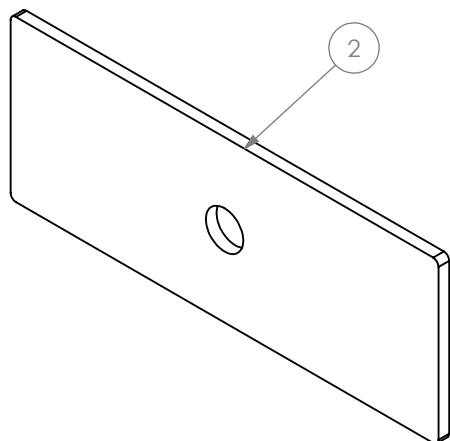
	Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 64.06 Kg	Folha <b>2</b> <b>4</b>	
	Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		Tratamento Superficial		
	Designação : Fixação Dinamómetro		Nota	Área	Escala 1:5
			N/D	N/D	
			N/D	N/D	
Notas:					
A4	Data	Nome	Artigo / Desenho: EQDIASTC5EXC014		
Des.	09/04/2025	Luis - Est.			
Verif.					
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia			




NP 327 - ISO 128



EQDIASC5EXC014\_05

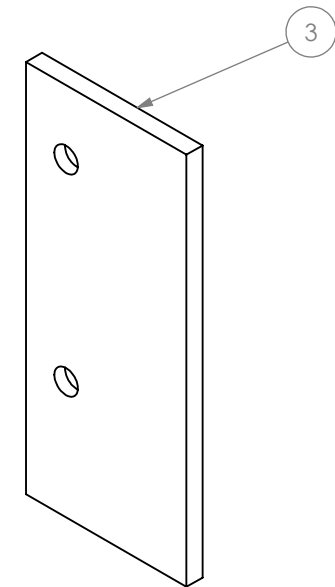
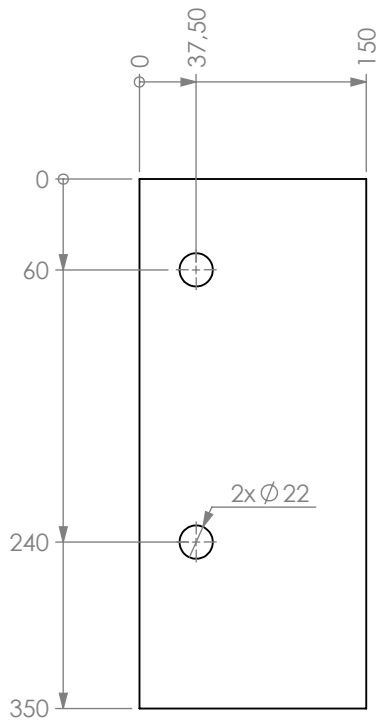


Artigo	Código Barras
EQDIASC5EXC014	

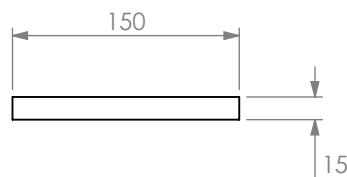
			Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 64.06 Kg	Folha <b>3</b> / 4																				
			Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		Tratamento Superficial																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>Luis - Est.</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </tbody> </table>			A4	Data	Nome	Des.	09/04/2025	Luis - Est.	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	Designação : Fixação Dinamómetro		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo</th> <th>Área</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo	Área	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	Escala 1:5
			A4	Data	Nome																					
			Des.	09/04/2025	Luis - Est.																					
			Verif.																							
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia																								
Tipo	Área																									
N/D	N/D																									
N/D	N/D																									
N/D	N/D																									
Notas:																										
Artigo / Desenho: EQDIASC5EXC014																										





NP 327 - ISO 128

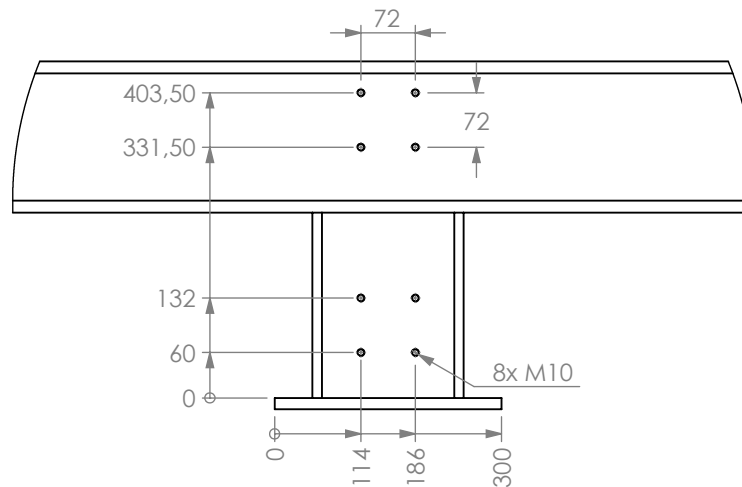
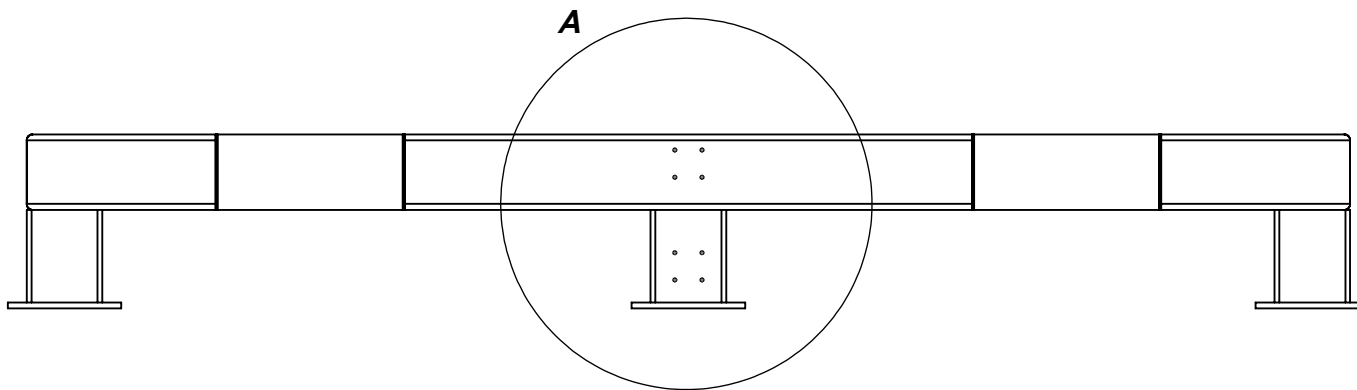


BARRA



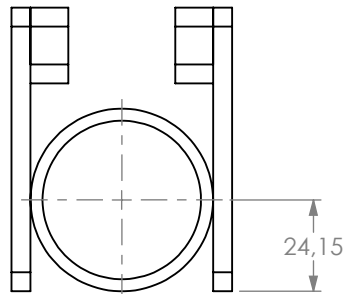
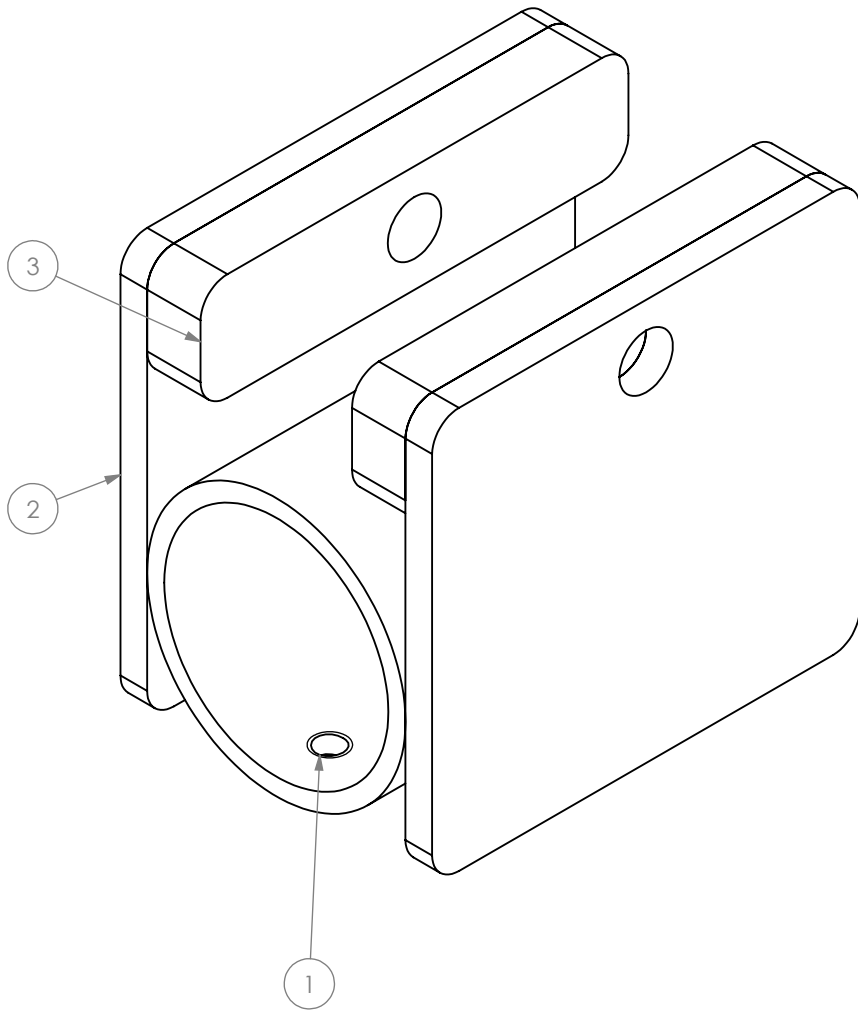
Artigo	Código Barras
EQDIASTC5EXC014	

			Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 64.06 Kg	Folha <b>4</b> <hr/> <b>4</b>																				
			Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		Tratamento Superficial																					
<table border="1"> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>Luis - Est.</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </table>			A4	Data	Nome	Des.	09/04/2025	Luis - Est.	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	Designação : Fixação Dinamómetro		<table border="1"> <tr> <th>Tipo</th> <th>Área</th> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>N/D</td> </tr> </table>	Tipo	Área	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	Escala 1:5
			A4	Data	Nome																					
			Des.	09/04/2025	Luis - Est.																					
			Verif.																							
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia																								
Tipo	Área																									
N/D	N/D																									
N/D	N/D																									
N/D	N/D																									
Notas:																										
Artigo / Desenho: EQDIASTC5EXC014																										
				NP 327 - ISO 128																						






**DETAIL A**  
**SCALE 1 : 10**

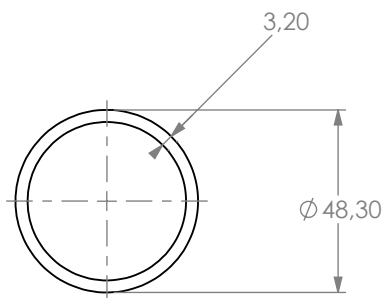
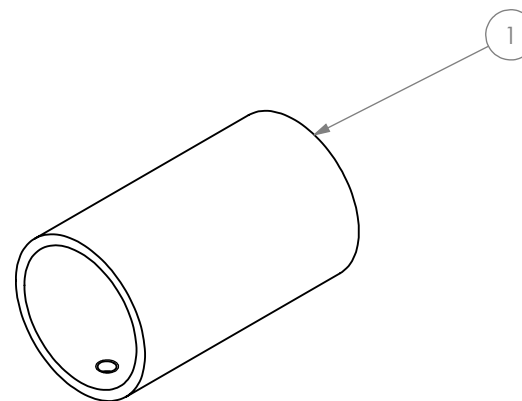
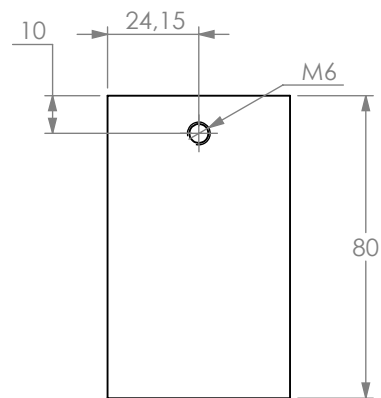
			<b>Material :</b> Aço S 235		<b>Peso :</b> 797.34 Kg	Folha <b>1</b> <hr/> <b>1</b>												
			Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		<b>Tratamento Superficial</b>													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>B. Silva</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </tbody> </table>			A4	Data	Nome	Des.	09/04/2025	B. Silva	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	<b>Designação :</b> Base Aço Bancada Fixa 3.5x1.8m		<b>Tipo</b>	<b>Área</b>
			A4	Data	Nome													
			Des.	09/04/2025	B. Silva													
			Verif.															
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia																
N/D	N/D																	
N/D	N/D																	
N/D	N/D																	
					<b>Notas:</b>	<b>Escala</b> 1:20												
			<b>Artigo / Desenho:</b> MCESTBASSTLB83A															
					NP 327 - ISO 128													




### Lista de Corte

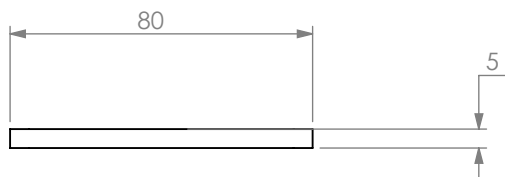
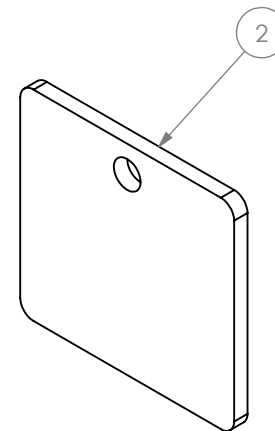
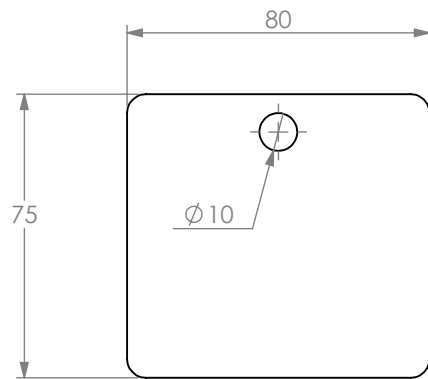
Ref.	Perfil	Dimensão (mm)	Qtd.	Ângulo 1 (°)	Ângulo 2 (°)	Peso (kg)
1	48.3 x 3.2	80	1	0°	0°	
2	EQDIASC 5EXC014_0 6		2			
3	EQDIASC 5EXC014_0 7		2			

			Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 0.98 Kg	Folha <b>1</b> <hr/> <b>4</b>											
			Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		<b>Tratamento Superficial</b> Tipo      Área N/D      N/D N/D      N/D N/D      N/D												
<b>Designação :</b> Peça Encosto Ensaio Dinam			<b>Notas:</b>		Escala 1:1												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>Luis - Est.</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </tbody> </table>			A4	Data	Nome	Des.	09/04/2025	Luis - Est.	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	Artigo / Desenho: EQDIASC5EXC014 		 NP 327 - ISO 128
A4	Data	Nome															
Des.	09/04/2025	Luis - Est.															
Verif.																	
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia															






Artigo	Código Barras
EQDIASTC5EXC014	

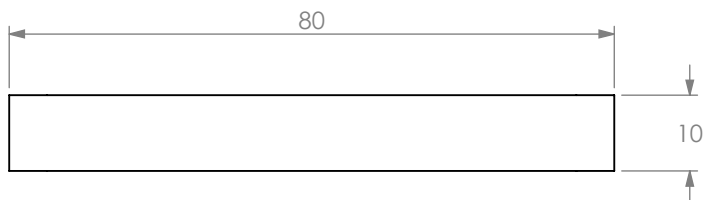
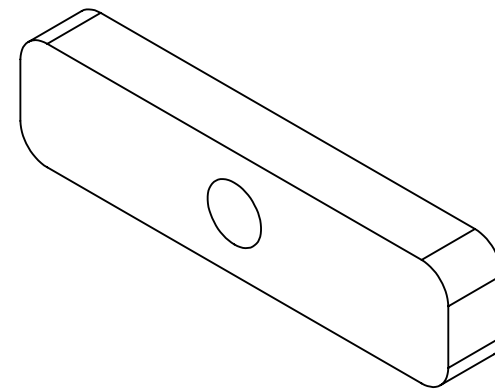
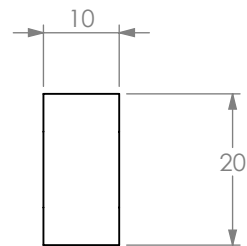
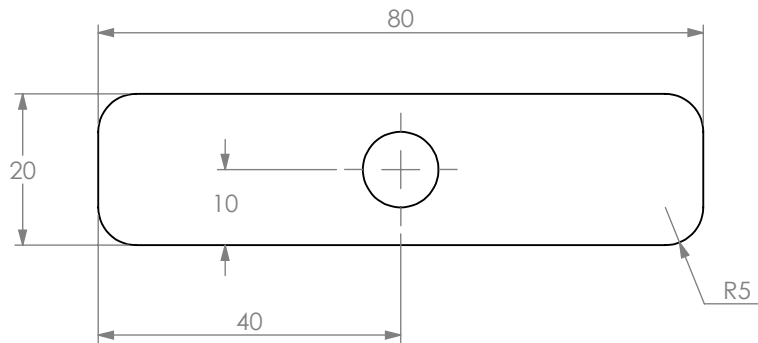
	Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 0.98 Kg	Folha <b>2</b> / 4
	Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		Tratamento Superficial	
	Designação : Peça Encosto Ensaio Dinam		Tipo	Área
			N/D	N/D
A4		Data	Nome	Escala 1:2
Des.		09/04/2025	Luis - Est.	
Verif.				
Aprov.		09/04/2025	A. Gouveia	 NP 327 - ISO 128
Artigo / Desenho: EQDIASTC5EXC014				
				




EQDIASC5EXC014\_06

Artigo	Código Barras
EQDIASC5EXC014	

	Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 0.98 Kg	Folha <b>3</b> <hr/> <b>4</b>	
	Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		Tratamento Superficial		
	Designação : Peça Encosto Ensaio Dinam		Tipo		Área
			N/D		N/D
A4		Notas:		Escala <b>1:2</b>	
Des.	09/04/2025	Luis - Est.			
Verif.					
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia			
Artigo / Desenho: EQDIASC5EXC014					
				NP 327 - ISO 128	



EQDIASTC5EXC014\_07

Artigo	Código Barras
EQDIASTC5EXC014	

			Material : 1.0037 (S235JR)		Peso : 0.98 Kg	Folha <b>4</b>													
			Copyright CEI, Lda - Propriedade Intelectual, não é autorizada a reprodução total ou parcial do presente documento		Tratamento Superficial														
<table border="1"> <tr> <th>A4</th> <th>Data</th> <th>Nome</th> </tr> <tr> <td>Des.</td> <td>09/04/2025</td> <td>Luis - Est.</td> </tr> <tr> <td>Verif.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprov.</td> <td>09/04/2025</td> <td>A. Gouveia</td> </tr> </table>			A4	Data	Nome	Des.	09/04/2025	Luis - Est.	Verif.			Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia	Designação : Peça Encosto Ensaio Dinam		Tipo		Escala 1:1
			A4	Data	Nome														
			Des.	09/04/2025	Luis - Est.														
Verif.																			
Aprov.	09/04/2025	A. Gouveia																	
Área																			
N/D	N/D																		
			N/D																
			N/D																
			Notas:																
Artigo / Desenho: EQDIASTC5EXC014																			
																			

NP 327 - ISO 128

# **Apêndice C – Gestão e Otimização de Materiais**

Tabela de Materiais CEI

	Material com melhor comportamento
	Material com segundo melhor comportamento
	Material com terceiro melhor comportamento

Materiais Metálicos												
	AISI	DIN	EURONORM EN10025	W. NR.	Soldadura	Quinagem	Jato de água	Maquinação	Custo	Observações		
										Formato	Aplicações Gerais	Aplicações específicas CEI
INOX	304	X 5 CrNiMo 18 10	AISI 304L	1.4307					2,98€ / Kg	Chapa	Indústria química e alimentar, serralharia, corrimões, puchadores, gradeamentos e ferragens	Chaparia e tampas
	316	X 5 CrNiMo 17 12 2	AISI 316L	1.4404					4,68€ / Kg	Chapa	Indústria química e alimentar, instrumentação médica e construções perto do mar	
AÇOS S/ TRATAMENTO	1045	Ck45	C45 E	1.1191 / 1.1730					1,10€ / m	Perfil laminado a quente	Órgãos de máquinas, veios e cavilhas, porcas e parafusos, peças para automóveis, navalhas, martelos e tesouras de poda	Veios que requerem melhor resistência
	1025	St 44-2 / 1.0044	S275 JR	1.0044					0,78€ / Kg	Chapa laminada a quente	Estruturas metálicas para navios, edifícios e armazéns	Utilização generalizada, corte 2D de planificados e construções soldadas
	1024	St 52-3 U	ST52 (= S355)	1.0553 / 1.0577					5,47€ / m	Perfil laminado a quente	Construção soldada e todo o tipo de estruturas: componentes de pontes, gruas, componentes de plataformas, equipamentos mineiros de carga e torres eólicas	5º Eixo, Eixo X, Eixo Z e Ponte (StoneCUT PRO e StoneCUT MASTER)
ALUMÍNIOS	-	AlMgSi0.5 / 3.3206	Al 6063	3.3206					2,45€ / Kg	-	Arquitetura e construção, corrimões e móveis, caixilhos de portas e janelas, canos e tubos para sistemas de irrigação, componentes elétricos, piso de camifões e rebocos, dissipadores de calor e escadas	Flanges de redutor, pratos da polidora e ventosas
	-	AlMgSi1 / 3.2315	Al 6082 (Retificado)	3.2315					13,4€ / Kg	Chapa	Fabrico de ferramentas, construção de máquinas e equipamentos, placas de base, tampos de mesa e placas de montagem	
AÇO GALVANIZADO	1008 / 1010 (Aço base galvanizado)	St 02 Z / St 01 Z	DX51D+Z	1.0917					0,95€ / Kg	Chapa	Construção metálica, construção civil, mobiliário e eletrodomésticos	Platinas de quadros elétricos
	1015 / 1018 (Aço base galvanizado)	St 37-2	S235 JR Galv	1.0038					42,35€ / m2	Chapa	Estruturas de construção em geral, andaimes e suportes de pontes	
AÇO ZINCADO	1006 / 1008 (Aço base zincado)	St 12 ZE	DC01+ZE	1.0330					1€ / Kg	-	Indústria automóvel, indústria da construção, equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos, fins decorativos e conservas de alimentos	Chaparia e tampas
BRONZE	-	CuSn5Zn5Pb5-C	CB1 (C90700)	2.1090					11,95€ / Kg	-	Casquilhos e fêmeas de acionamento	Casquilhos
	-	CuSn12-C	CB3 (C91700)	2.1052					13,58€ / Kg	-	Casquilhos, engrenagens, rodas de coroa e porcas	
COBRE	-	E-Cu57	B187 (C10100)	2.0060					32,94€ / Kg	-	Tubagens, indústria automóvel, indústria naval e equipamentos hospitalares	Terminal terra / Barramento dos quadros elétricos
LATÃO	-	CuZn37	Latão	2.0321					11,85€ / Kg	-	Válvulas, tubagens de água e tubos de conexão	-
	-	CuZn35	65Cu 35Zn	2.0265					9,44€ / Kg	-	Válvulas, terminais elétricos, parafusos e aparelhos médicos	

Tabela de Materiais CEI

Materiais Compósitos e Poliméricos									
	Família	Designação	Cores	Temperatura de serviço mínima (°C)	Temperatura de serviço máxima (°C)	Custo	Observações		
							Formato	Aplicações Gerais	Aplicações Específicas CEI
COMPÓSITOS	Aglomerados cimentícios (CBPB)	Cimento/Madeira Bruto (VIROC)	Várias	-	-	157,25€ / Placa	Placa	Fachadas, pisos, revestimento de paredes, cofragem, tetos falsos e construção modular	Revestimento de mesas de corte
	Borrachas	EPDM	Preto	-54	150	0,75€ / m	-	Construções automóveis e industriais	Ventosas
	Borrachas	EPDM 130	Preto	-55	130	17,72€ / m	-	Ambientes com condições extremas como elevadas temperaturas	
POLÍMEROS	PC - Policarbonato	Policarbonato Transparente	Translúcido	-40	100	20,65€ / Kg	Chapa	Fechos laterais	Revestimentos generalizados, nomeadamente de portas
		Policarbonato Opalino	Branco	-40	120	9,13€ / Kg	Chapa	Barreiras acústicas, janelas, divisórias, coberturas, proteção de cabines e máquinas e proteções de quadros elétricos	
	Acetal	POM	Várias	-50	100	Chapa: 14,55€ / Kg Perfil: 12,30€ / Kg	Chapa e varão redondo	Peças de precisão dimensionalmente estáveis; rodas dentadas de módulo pequeno; rolos e rolamentos para cargas pesadas; peças para indústria têxtil; peças que necessitem de um melhor acabamento e estabilidade dimensional; bobinas, casquilhos e parafusos; acoplamentos, luvas e elementos de válvulas; rolamentos e engrenagens com pequenas folgas e componentes para isolamento elétrico	Casquilhos, medidores de ferramentas e rodas de portas
	PE - Polietileno	PEHD (= PEAD = PE 500)	Branco, Preto, Verde e Vermelho	-100	80	7,52€ / Kg	-	Placas de corte para mesas de trabalho, elementos para drenagem de água e peças para aplicações mecânicas	Casquilhos, anéis separadores
				PELD	-60	65	4,29€ / Kg	Perfil	Embalagens, tubos e mangueiras
		PET	Branco e Preto	-60	130	34,76€ / Kg	Perfil	Embalagens e polímeros de engenharia como casquilhos, guias, e rodízios, engrenagens de baixo módulo sem impacto, peças de precisão e peças isoladoras:	-
		iglidur J	Amarelo	-50	90	732,1€ / m	-	Casquilhos	Anéis de união rotativa (Kiosk)
	PP - Polipropileno	PP	Amarelo, Branco e Verde	-20	80	5,5€ / Kg	Chapa	Tanques para produtos químicos, mesas para laboratórios e cepos para balancês de corte	(ATC) Pratos de polir
		PP-R		0 ou -10 (se garantida a ausência de água e aditivos específicos)	110	5,24€ / m	Perfil	Aplicações de distribuição de água e sistemas de climatização	
	Policloreto	PVC	Opaco e Translúcido	-20	60	13,35€ / Kg	Perfil	Revestimentos anti-ácidos e fabrico de peças mecanizadas	-

**QUINAGEM**

**AÇO INOX**

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Módulo Elasticidade	1
2	Tensão de Cedência	2
3	Tensão de Rotura	2
4	Tenacidade	2
5	Dureza	3
6	Alongamento na Rotura	3

		Ponderações							
NºProp.	Atributo	1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.	Imp.	wi	%
1	Módulo Elasticidade	70	70	70	80	80	1	0,358974359	35,8974359
2	Tensão de Cedência	30					0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
3	Tensão de Rotura		30				0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
4	Tenacidade			30			0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
5	Dureza				20		0,25	0,08974358974	8,974358974
6	Alongamento na Rotura					20	0,25	0,08974358974	8,974358974
SUM							2,785714286	1	100

Material	Módulo Elasticidade [MPa]	Tensão Cedência [MPa]	Tensão Rotura [MPa]	K_IC [MPa*m^0,5]	Dureza [HV]	Alongamento na Rotura [%]
INOX AISI 304	193	215	505	125	123	70
INOX AISI 316	193	290	580	160	79	50

Material	Atributo	Grau de Importância	Propriedades / Atributos										Índice de Desempenho		
			Módulo Elasticidade [MPa]		Tensão Cedência [MPa]		Tensão Rotura [MPa]		Tenacidade K_IC [MPa*m^0,5]		Dureza [HV]			Alongamento na Rotura [%]	
			0,358974359		0,1538461538		0,1538461538		0,1538461538		0,08974358974		0,08974358974		
INOX AISI 304	A	C	193	35,8974359	215	15,38461538	505	15,38461538	125	12,01923077	123	5,764019179	70	8,974358974	93,42427559
	B		100		100		78,125		64,22764228		100				
INOX AISI 316	A	C	193	35,8974359	290	11,40583554	580	13,39522546	160	15,38461538	79	8,974358974	50	6,41025641	91,46772767
	B		100		74,13793103		87,06896552		100		100		71,42857143		
	A	C													
	B														
	A	C													
	B														
	A	C													
	B														

QUINAGEM

AÇOS S/ TRATAMENTO

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Módulo Elasticidade	1
2	Tensão de Cedência	2
3	Tensão de Ruptura	2
4	Tenacidade	2
5	Dureza	3
6	Alongamento na Ruptura	3

NºProp.	Atributo	Ponderações						wi	%
		1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.	Imp.		
1	Módulo Elasticidade	70	70	70	80	80	1	0,358974359	35,8974359
2	Tensão de Cedência	30					0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
3	Tensão de Ruptura		30				0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
4	Tenacidade			30			0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
5	Dureza				20		0,25	0,08974358974	8,974358974
6	Alongamento na Ruptura					20	0,25	0,08974358974	8,974358974
SUM							2,785714286	1	100

Material	Módulo Elasticidade [MPa]	Tensão Cedência [MPa]	Tensão Ruptura [MPa]	K_IC [MPa*m <sup>0,5</sup> ]	Dureza [HV]	Alongamento na Ruptura [%]
C1	200	470	550	65	167	25
C45 E	206	530	700	30	179	12
S235 JR	200	225	400	70	110	24
S275 JR	200	275	450	65	150	20
S355 J2 H	200	355	500	100	170	20
ST12	200	185	300	50	95	28

Material	Propriedades / Atributos											Índice de Desempenho		
	Módulo Elasticidade [MPa]		Tensão Cedência [MPa]		Tensão Ruptura [MPa]		Tenacidade K_IC [MPa*m <sup>0,5</sup> ]		Dureza [HV]		Alongamento na Ruptura [%]			
	0,358974359		0,1538461538		0,1538461538		0,1538461538		0,08974358974		0,08974358974			
C1	A	200	34,85187951	470	7,36497545	550	8,391608392	65	10	167	5,105174267	25	8,012820513	73,72645813
	B	97,08737864		47,87234043		54,54545455		65	56,88622754	5,105174267	89,28571429	8,012820513		
C45 E	A	206	35,8974359	530	6,531204644	700	6,593406593	30	4,615384615	179	4,762927947	12	3,846153846	62,24651354
	B	100		42,45283019		42,85714286		30	53,0726257	4,762927947	42,85714286	3,846153846		
S235 JR	A	200	34,85187951	225	15,38461538	400	11,53846154	70	10,76923077	110	7,750582751	24	7,692307692	87,98707765
	B	97,08737864		100		75		70	86,36363636	7,750582751	85,71428571	7,692307692		
S275 JR	A	200	34,85187951	275	12,58741259	450	10,25641026	65	10	150	5,683760684	20	6,41025641	79,78971945
	B	97,08737864		81,81818182		66,66666667		65	63,33333333	5,683760684	71,42857143	6,41025641		
S355 J2 H	A	200	34,85187951	355	9,750812568	500	9,230769231	100	15,38461538	170	5,015082956	20	6,41025641	80,64341606
	B	97,08737864		63,38028169		60		100	55,88235294	5,015082956	71,42857143	6,41025641		
ST12	A	200	34,85187951	185	18,71101871	300	15,38461538	50	7,692307692	95	8,974358974	28	8,974358974	94,58853925
	B	97,08737864		121,6216216		100		50	100	8,974358974	100	8,974358974		

**QUINAGEM**

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Módulo Elasticidade	1
2	Tensão de Cedência	2
3	Tensão de Rotura	2
4	Tenacidade	2
5	Dureza	3
6	Alongamento na Rotura	3

**AÇO GALVANIZADO**

NºProp.	Atributo	Ponderações						wi	%
		1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.	Imp.		
1	Módulo Elasticidade	70	70	70	80	80	1	0,358974359	35,8974359
2	Tensão de Cedência	30					0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
3	Tensão de Rotura		30				0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
4	Tenacidade			30			0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
5	Dureza				20		0,25	0,08974358974	8,974358974
6	Alongamento na Rotura					20	0,25	0,08974358974	8,974358974
<b>SUM</b>							<b>2,785714286</b>	<b>1</b>	<b>100</b>

Material	Módulo Elasticidade [MPa]	Tensão Cedência [MPa]	Tensão Rotura [MPa]	K_IC [MPa*m^0,5]	Dureza [HV]	Alongamento na Rotura [%]
DX51D+Z	207,5	210	310	38	90	28
S235 JR Galv	190	220	320	40	120	25

Material	Atributo	Grau de Importância	Propriedades / Atributos						Índice de Desempenho	
			Módulo Elasticidade [MPa]	Tensão Cedência [MPa]	Tensão Rotura [MPa]	Tenacidade K_IC [MPa*m^0,5]	Dureza [HV]	Alongamento na Rotura [%]		
DX51D+Z	A	C	0,358974359	0,1538461538	0,1538461538	0,1538461538	0,08974358974	0,08974358974	8,974358974	99,23076923
	B		207,5	210	310	38	90	28		
S235 JR Galv	A	C	32,8699413	14,68531469	14,90384615	15,38461538	6,730769231	8,012820513	8,012820513	92,58730727
	B		190	220	320	40	120	25		
	A	C								
	B									
	A	C								
	B									
	A	C								
	B									



QUINAGEM

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Módulo Elasticidade	1
2	Tensão de Cedência	2
3	Tensão de Rotura	2
4	Tenacidade	2
5	Dureza	3
6	Alongamento na Rotura	3

ALUMÍNIO

NºProp.	Atributo	Ponderações						wi	%
		1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.	Imp.		
1	Módulo Elasticidade	70	70	70	80	80	1	0,358974359	35,8974359
2	Tensão de Cedência	30					0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
3	Tensão de Rotura		30				0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
4	Tenacidade			30			0,4285714286	0,1538461538	15,38461538
5	Dureza				20		0,25	0,08974358974	8,974358974
6	Alongamento na Rotura					20	0,25	0,08974358974	8,974358974
SUM							2,785714286	1	100

Material	Módulo Elasticidade [MPa]	Tensão Cedência [MPa]	Tensão Rotura [MPa]	K_IC [MPa*m^0,5]	Dureza [HV]	Alongamento na Rotura [%]
Al 2007	71	250	400	20	95	6,8
Al 5083	68	220	310	30	92,5	1,4
Al 5754	68	160	210	25	70	10,5
Al 6063	68	200	200	20	60	14,15
Al 6082	69	220	300	25	67,5	12,15
Al 7075	70	300	590	25	150	6,9

Material	Propriedades / Atributos								Índice de Desempenho
	Módulo Elasticidade [MPa]	Tensão Cedência [MPa]	Tensão Rotura [MPa]	Tenacidade K_IC [MPa*m^0,5]	Dureza [HV]	Alongamento na Rotura [%]			
Al 2007	71	250	400	20	95	6,8			73,67309004
	100	64	50	66,66666667	63,15789474	48,0565371			
Al 5083	68	220	310	30	92,5	1,4			77,58875598
	95,77464789	72,72727273	64,51612903	9,925558313	15,38461538	0,8879224427			
Al 5754	68	160	210	25	70	10,5			91,5895117
	95,77464789	100	95,23809524	14,65201465	12,82051282	74,204947			
Al 6063	68	200	200	20	60	14,15			90,27807873
	95,77464789	80	15,38461538	66,66666667	10,25641026	8,974358974			
Al 6082	69	220	300	25	67,5	12,15			84,8350811
	97,18309859	72,72727273	66,66666667	10,25641026	83,33333333	7,705898342			
Al 7075	70	300	590	25	150	6,9			69,59853587
	98,5915493	53,33333333	33,89830508	5,215123859	12,82051282	48,76325088			



**QUINAGEM**

**BRONZE**

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Módulo Elasticidade	1
2	Tensão de Cedência	2
3	Tensão de Rotura	2
4	Tenacidade	2
5	Dureza	3
6	Alongamento na Rotura	3

		Ponderações								
NºProp.	Atributo	1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.	Imp.	wi	%	
1	Módulo Elasticidade	70	70	70	80	80	1	0,358974359	35,8974359	
2	Tensão de Cedência	30					0,4285714286	0,1538461538	15,38461538	
3	Tensão de Rotura		30				0,4285714286	0,1538461538	15,38461538	
4	Tenacidade			30			0,4285714286	0,1538461538	15,38461538	
5	Dureza				20		0,25	0,08974358974	8,974358974	
6	Alongamento na Rotura					20	0,25	0,08974358974	8,974358974	
<b>SUM</b>								<b>2,785714286</b>	<b>1</b>	<b>100</b>

Material	Módulo Elasticidade [MPa]	Tensão Cedência [MPa]	Tensão Rotura [MPa]	K_IC [MPa*m^0,5]	Dureza [HV]	Alongamento na Rotura [%]
CB1	170	150	275	20	80	20
CB3	105	150	225	15	85	16

Material	Propriedades / Atributos											Índice de Desempenho	
	Módulo Elasticidade [MPa]		Tensão Cedência [MPa]		Tensão Rotura [MPa]		Tenacidade K_IC [MPa*m^0,5]		Dureza [HV]		Alongamento na Rotura [%]		
CB1	A	C	0,358974359	58,11965812	0,1538461538	12,58741259	0,1538461538	15,38461538	0,08974358974	8,974358974	0,08974358974	8,974358974	119,4250194
	B		170		150		275		20		80		
CB3	A	C	105	35,8974359	150	15,38461538	225	15,38461538	85	8,446455505	16	7,179487179	93,83107089
	B		105		150		225		15		85		
	A	C											
	B												
	A	C											
	B												
	A	C											
	B												

**QUINAGEM**

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Módulo Elasticidade	1
2	Tensão de Cedência	2
3	Tensão de Rotura	2
4	Tenacidade	2
5	Dureza	3
6	Alongamento na Rotura	3

**LATÃO**

NºProp.	Atributo	Ponderações						Imp.	wi	%
		1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.				
1	Módulo Elasticidade	70	70	70	80	80	1	0,358974359	35,8974359	
2	Tensão de Cedência	30					0,4285714286	0,1538461538	15,38461538	
3	Tensão de Rotura		30				0,4285714286	0,1538461538	15,38461538	
4	Tenacidade			30			0,4285714286	0,1538461538	15,38461538	
5	Dureza				20		0,25	0,08974358974	8,974358974	
6	Alongamento na Rotura					20	0,25	0,08974358974	8,974358974	
<b>SUM</b>							<b>2,785714286</b>	<b>1</b>	<b>100</b>	

Material	Módulo Elasticidade [MPa]	Tensão Cedência [MPa]	Tensão Rotura [MPa]	K_IC [MPa*m^0,5]	Dureza [HV]	Alongamento na Rotura [%]
Latão	100	360	500	45	96	35
65Cu 35Zn	103	97	315	45	110	65
Liga 360 (C36000)	97	217	404	23	130	53
Liga 464 (C46400)	100	207	400	27	260	45
CuZn37	105	255,5	475	25	110	65
CuZn40	105	145	430	25	120	45

Material	Propriedades / Atributos												Índice de Desempenho
	Módulo Elasticidade [MPa]		Tensão Cedência [MPa]		Tensão Rotura [MPa]		Tenacidade K_IC [MPa*m^0,5]		Dureza [HV]		Alongamento na Rotura [%]		
Latão	A	C	0,358974359		0,1538461538		0,1538461538		0,08974358974		0,08974358974		4,83234714
	B		100	34,18803419	360	4,145299145	500	9,692307692	45	15,38461538	96	8,974358974	
65Cu 35Zn	A	C	95,23809524		26,94444444		63		87,27272727		53,84615385		8,974358974
	B		103	35,21367521	97	15,38461538	315	15,38461538	45	15,38461538	110	7,832167832	
Liga 360 (C36000)	A	C	98,0952381		33,16239316		100		7,863247863		100		8,974358974
	B		97	33,16239316	217	6,876993974	404	11,99543031	23	7,863247863	130	6,627218935	
Liga 464 (C46400)	A	C	92,38095238		44,70046083		77,97029703		51,11111111		73,84615385		7,317554241
	B		100	34,18803419	207	7,209215905	400	12,11538462	27	9,230769231	260	3,313609467	
CuZn37	A	C	95,23809524		46,85990338		78,75		36,92307692		69,23076923		6,213017751
	B		105	35,8974359	255,5	5,840734608	475	10,20242915	25	8,547008547	110	7,832167832	
CuZn40	A	C	100		37,96477495		66,31578947		87,27272727		100		8,974358974
	B		105	35,8974359	145	10,29177719	430	11,27012522	25	8,547008547	120	7,179487179	
			100		66,89655172		73,25581395		55,55555556		80		6,213017751



**SOLDADURA**

**AÇOS S/ TRATAMENTO**

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	%Carbono	1
2	%Carbono Equivalente	2
3	Tensão de Rotura	3
4	Tenacidade	3
5	Dureza	3
6	Alongamento na Rotura	3

		Ponderações								
NºProp.	Atributo	1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.	Imp.	wi	%	
1	%Carbono	60	80	80	80	80	1	0,358974359	35,8974359	
2	%Carbono Equivalente	40					0,666666667	0,2393162393	23,93162393	
3	Tensão de Rotura		20				0,25	0,08974358974	8,974358974	
4	Tenacidade			20			0,25	0,08974358974	8,974358974	
5	Dureza				20		0,25	0,08974358974	8,974358974	
6	Alongamento na Rotura					20	0,25	0,08974358974	8,974358974	
SUM								2,666666667	0,9572649573	95,72649573

Material	%Carbono	%Carbono Equivalente	Tensão Rotura [MPa]	Tenacidade K_IC [MPa*m <sup>0,5</sup> ]	Dureza [HV]	Alongamento na Rotura [%]
C1	0,09	0,265	550	65	167	25
C45 E	0,5	0,65	700	30	179	12
S235 JR	0,17	0,337	400	70	110	24
S275 JR	0,18	0,347	450	65	150	20
S355 J2 H	0,2	0,467	500	100	170	20
ST12	0,07	0,12	300	50	95	28

		Propriedades / Atributos												
		%Carbono		%Carbono Equivalente		Tensão Rotura [MPa]		Tenacidade K_IC [MPa*m <sup>0,5</sup> ]		Dureza [HV]		Alongamento na Rotura [%]		
Material		0,358974359		0,2393162393		0,08974358974		0,08974358974		0,08974358974		0,08974358974		Índice de Desempenho
C1	A	0,09	27,92022792	0,265	10,83696178	550	4,895104895	65	5,833333333	167	5,105174267	25	8,012820513	62,60362271
	B	77,77777778		45,28301887		54,54545455		65	56,88622754	56,88622754		89,28571429		
C45 E	A	0,5	5,025641026	0,65	2,840236686	700	3,846153846	30	2,692307692	179	4,762927947	12	3,846153846	23,01342104
	B	14		18,46153846		42,85714286		30	53,0726257	53,0726257		42,85714286		
S235 JR	A	0,17	14,78129713	0,337	5,478201324	400	6,730769231	70	6,282051282	110	7,750582751	24	7,692307692	48,71520941
	B	41,17647059		35,60830861		75		70	86,36363636	86,36363636		85,71428571		
S275 JR	A	0,18	13,96011396	0,347	5,320328087	450	5,982905983	65	5,833333333	150	5,683760684	20	6,41025641	43,19069846
	B	38,88888889		34,58213256		66,66666667		65	63,33333333	63,33333333		71,42857143		
S355 J2 H	A	0,2	12,56410256	0,467	3,953220227	500	5,384615385	100	8,974358974	170	5,015082956	20	6,41025641	42,30163652
	B	35		25,69593148		60		100	55,88235294	55,88235294		71,42857143		
ST12	A	0,07	35,8974359	0,12	15,38461538	300	8,974358974	50	4,487179487	95	8,974358974	28	8,974358974	82,69230769
	B	100		100		100		50		100		100		





**SOLDADURA**

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Módulo Elasticidade	1
2	Tensão de Cedência	2
3	Tensão de Rotura	2
4	Tenacidade	2
5	Dureza	3
6	Alongamento na Rotura	3

**ALUMÍNIO**

NºProp.	Atributo	Ponderações						wi	%	
		1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.	Imp.			
1	Módulo Elasticidade	70	70	70	80	80	1	0,358974359	35,8974359	
2	Tensão de Cedência	30					0,4285714286	0,1538461538	15,38461538	
3	Tensão de Rotura		30				0,4285714286	0,1538461538	15,38461538	
4	Tenacidade			30			0,4285714286	0,1538461538	15,38461538	
5	Dureza				20		0,25	0,08974358974	8,974358974	
6	Alongamento na Rotura					20	0,25	0,08974358974	8,974358974	
SUM								2,785714286	1	100

Material	Módulo Elasticidade [MPa]	Tensão Cedência [MPa]	Tensão Rotura [MPa]	Tenacidade K_IC [MPa*m^0,5]	Dureza [HV]	Alongamento na Rotura [%]
Al 2007	71	250	400	20	95	6,8
Al 5083	68	220	310	30	92,5	1,4
Al 5754	68	160	210	25	70	10,5
Al 6063	68	200	200	20	60	14,15
Al 6082	69	220	300	25	67,5	12,15
Al 7075	70	300	590	25	150	6,9

Difíceis de soldar

Material	Propriedades / Atributos												Índice de Desempenho		
	Módulo Elasticidade [MPa]		Tensão Cedência [MPa]		Tensão Rotura [MPa]		Tenacidade K_IC [MPa*m^0,5]		Dureza [HV]		Alongamento na Rotura [%]				
	0,358974359		0,1538461538		0,1538461538		0,1538461538		0,08974358974		0,08974358974				
Al 2007	A	C	71	35,8974359	250	9,846153846	400	7,692307692	20	10,25641026	95	5,668016194	6,8	4,31276615	73,67309004
	B		100		64		50		66,66666667		63,15789474		48,0565371		
Al 5083	A	C	68	34,38064283	220	11,18881119	310	9,925558313	30	15,38461538	92,5	5,821205821	1,4	0,8879224427	77,58875598
	B		95,77464789		72,72727273		64,51612903		100		64,86486486		9,893992933		
Al 5754	A	C	68	34,38064283	160	15,38461538	210	14,65201465	25	12,82051282	70	7,692307692	10,5	6,65941832	91,5895117
	B		95,77464789		100		95,23809524		83,33333333		85,71428571		74,204947		
Al 6063	A	C	68	34,38064283	200	12,30769231	200	15,38461538	20	10,25641026	60	8,974358974	14,15	8,974358974	90,27807873
	B		95,77464789		80		100		66,66666667		100		100		
Al 6082	A	C	69	34,88624052	220	11,18881119	300	10,25641026	25	12,82051282	67,5	7,977207977	12,15	7,705898342	84,8350811
	B		97,18309859		72,72727273		66,66666667		83,33333333		88,88888889		85,86572438		
Al 7075	A	C	70	35,39183821	300	8,205128205	590	5,215123859	25	12,82051282	150	3,58974359	6,9	4,376189182	69,59853587
	B		98,5915493		53,33333333		33,89830508		83,33333333		40		48,76325088		





**SOLDADURA**

**LATÃO**

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	% Zinco	1
2	Tensão de Cedência	2
3	Tensão de Rotura	2
4	Tenacidade	2
5	Dureza	2
6	Alongamento na Rotura	2

NºProp.	Atributo	Ponderações						Imp.	wi	%
		1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.				
1	% Zinco	90	90	90	90	90	1	0,358974359	35,8974359	
2	Tensão de Cedência	10					0,1111111111	0,03988603989	3,988603989	
3	Tensão de Rotura		10				0,1111111111	0,03988603989	3,988603989	
4	Tenacidade			10			0,1111111111	0,03988603989	3,988603989	
5	Dureza				10		0,1111111111	0,03988603989	3,988603989	
6	Alongamento na Rotura					10	0,1111111111	0,03988603989	3,988603989	
<b>SUM</b>								<b>1,555555556</b>	<b>0,5584045584</b>	<b>55,84045584</b>

Material	% Zinco	Tensão Cedência [MPa]	Tensão Rotura [MPa]	K_IC [MPa*m^0,5]	Dureza [HV]	Alongamento na Rotura [%]
Latão	43,5	360	500	45	96	35
65Cu 35Zn	33	97	315	45	110	65
Liga 360 (C36000)	35,5	217	404	23	130	53
Liga 464 (C46400)	39,25	207	400	27	260	45
CuZn37 (C33500)	34,5	255,5	475	25	110	65
CuZn40 (C28000)	40	145	430	25	120	45

Material	Propriedades / Atributos												Índice de Desempenho
	Módulo Elasticidade [MPa]		Tensão Cedência [MPa]		Tensão Rotura [MPa]		Tenacidade K_IC [MPa*m^0,5]		Dureza [HV]		Alongamento na Rotura [%]		
Latão	A	C	0,358974359	27,23253758	0,03988603989	1,074707186	0,03988603989	3,988603989	0,03988603989	3,988603989	0,03988603989	2,14770984	40,94498309
	B		43,5		360		500		45		96		
65Cu 35Zn	A	C	75,86206897	35,8974359	26,94444444	3,988603989	3,988603989	3,988603989	87,27272727	3,480963481	100	3,988603989	55,33281533
	B		33		97		315		45		110		
Liga 360 (C36000)	A	C	100	33,36944745	100	1,782924364	3,109926377	2,038619816	100	2,945430638	100	3,252246329	46,49859498
	B		35,5		217		404		23		130		
Liga 464 (C46400)	A	C	92,95774648	30,18128368	44,70046083	1,869055975	51,11111111	2,393162393	73,84615385	1,472715319	81,53846154	2,761341223	41,81858424
	B		39,25		207		400		27		260		
CuZn37 (C33500)	A	C	84,07643312	34,33667781	46,85990338	1,514264528	3,141025641	2,215891105	36,92307692	3,480963481	60	3,988603989	48,18147514
	B		34,5		255,5		475		25		110		
CuZn40 (C28000)	A	C	95,65217391	29,61538462	37,96477495	2,66823853	2,645074224	2,215891105	87,27272727	3,190883191	100	2,761341223	43,37362298
	B		40		145		430		25		120		
			82,5		66,89655172		73,25581395		55,55555556		80		



JATO DE ÁGUA

AÇOS S/ TRATAMENTO

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Densidade	3
2	Dureza	1
3	Módulo de Corte	2
4	Módulo de Elasticidade	2
5	Porosidade	2
6	Resistência à Tração	2

		Ponderações							
NºProp.	Atributo	1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.	Imp.	wi	%
2	Dureza	70	70	70	70	80	1	0,3373493976	33,73493976
3	Módulo de Corte	30					0,4285714286	0,1445783133	14,45783133
4	Módulo de Elasticidade		30				0,4285714286	0,1445783133	14,45783133
5	Porosidade			30			0,4285714286	0,1445783133	14,45783133
6	Resistência à Tração				30		0,4285714286	0,1445783133	14,45783133
1	Densidade					20	0,25	0,0843373494	8,43373494
SUM							2,964285714	1	100

Material	Densidade	Dureza	Módulo de Corte	Módulo de Elasticidade	Porosidade	Resistência à Tração
C1 (AISI 1215)	7,87	167	80	200	0,01	525
C45 E	7,85	179	80	206	0,025	625
S235 JR	7,85	110	80	200	0,025	405
S275 JR	7,85	150	80	200	0,025	485
S355 J2 H	7,85	170	80	200	0,025	560
ST12 (AISI 1012)	7,87	95	80	200	0,025	330

Material	Propriedades / Atributos												Índice de Desempenho		
	Densidade		Dureza		Módulo de Corte		Módulo de Elasticidade		Porosidade		Resistência à Tração				
C1 (AISI 1215)	A	C	7,87	167	8,412302322	19,19053459	80	14,45783133	200	14,45783133	0,01	5,78313253	525	9,08777969	71,38941179
	B		99,74587039				56,88622754		100		100		40		
C45 E	A	C	7,85	179	8,43373494	17,90401831	80	14,45783133	206	14,03672944	0,025	14,45783133	625	7,63373494	76,92388028
	B		100				53,0726257		100		97,08737864		100		
S235 JR	A	C	7,85	110	8,43373494	29,1347207	80	14,45783133	200	14,45783133	0,025	14,45783133	405	11,78045515	92,72240477
	B		100				86,36363636		100		100		81,48148148		
S275 JR	A	C	7,85	150	8,43373494	21,36546185	80	14,45783133	200	14,45783133	0,025	14,45783133	485	9,837287294	83,00997806
	B		100				63,33333333		100		100		68,04123711		
S355 J2 H	A	C	7,85	170	8,43373494	18,8518781	80	14,45783133	200	14,45783133	0,025	14,45783133	560	8,51979346	79,17890048
	B		100				55,88235294		100		100		58,92857143		
ST12 (AISI 1012)	A	C	7,87	95	8,412302322	33,73493976	80	14,45783133	200	14,45783133	0,025	14,45783133	330	14,45783133	99,97856738
	B		99,74587039				100		100		100				





JATO DE ÁGUA

ALUMÍNIO

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Densidade	3
2	Dureza	1
3	Módulo de Corte	2
4	Módulo de Elasticidade	2
5	Porosidade	2
6	Resistência à Tração	2

		Ponderações							
NºProp.	Atributo	1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.	Imp.	wi	%
2	Dureza	70	70	70	70	80	1	0,3373493976	33,73493976
3	Módulo de Corte	30					0,4285714286	0,1445783133	14,45783133
4	Módulo de Elasticidade		30				0,4285714286	0,1445783133	14,45783133
5	Porosidade			30			0,4285714286	0,1445783133	14,45783133
6	Resistência à Tração				30		0,4285714286	0,1445783133	14,45783133
1	Densidade					20	0,25	0,0843373494	8,43373494
SUM							2,964285714	1	100

Material	Densidade	Dureza	Módulo de Corte	Módulo de Elasticidade	Porosidade	Resistência à Tração
Al 2007	2,85	95	27	71	0,025	395
Al 5083	2,7	92,5	26	68	0,025	340
Al 5754	2,7	70	26	68	0,025	265
Al 6063	2,7	60	26	68	0,025	205
Al 6082	2,7	67,5	26	69	0,025	240
Al 7075	3	150	26	70	0,025	415

Material	Propriedades / Atributos												Índice de Desempenho		
	Densidade		Dureza		Módulo de Corte		Módulo de Elasticidade		Porosidade		Resistência à Tração				
	0,0843373494		0,3373493976		0,1445783133		0,1445783133		0,1445783133		0,1445783133				
Al 2007	A	C	2,85	7,989854153	95	21,30627774	27	13,92235609	71	13,84693704	0,025	14,45783133	395	7,503431447	79,0266878
	B		94,73684211		63,15789474		96,2962963	95,77464789		100		51,89873418			
Al 5083	A	C	2,7	8,43373494	92,5	21,88212309	26	14,45783133	68	14,45783133	0,025	14,45783133	340	8,717221828	82,40657383
	B		100		64,86486486		100	100		100		60,29411765			
Al 5754	A	C	2,7	8,43373494	70	28,91566265	26	14,45783133	68	14,45783133	0,025	14,45783133	265	11,18436008	91,90725165
	B		100		85,71428571		100	100		100		77,35849057			
Al 6063	A	C	2,7	8,43373494	60	33,73493976	26	14,45783133	68	14,45783133	0,025	14,45783133	205	14,45783133	100
	B		100		100		100	100		100		100			
Al 6082	A	C	2,7	8,43373494	67,5	29,98661312	26	14,45783133	69	14,24829754	0,025	14,45783133	240	12,34939759	93,93370584
	B		100		88,88888889		100	98,55072464		100		85,41666667			
Al 7075	A	C	3	7,590361446	150	13,4939759	26	14,45783133	70	14,04475043	0,025	14,45783133	415	7,141820293	71,18657072
	B		90		40		100	97,14285714		100		49,39759036			





**JATO DE ÁGUA**

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Densidade	3
2	Dureza	1
3	Módulo de Corte	2
4	Módulo de Elasticidade	2
5	Porosidade	2
6	Resistência à Tração	2

**LATÃO**

NºProp.	Atributo	Ponderações						Imp.	wi	%
		1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.				
2	Dureza	70	70	70	70	80	1	0,3373493976	33,73493976	
3	Módulo de Corte	30					0,4285714286	0,1445783133	14,45783133	
4	Módulo de Elasticidade		30				0,4285714286	0,1445783133	14,45783133	
5	Porosidade			30			0,4285714286	0,1445783133	14,45783133	
6	Resistência à Tração				30		0,4285714286	0,1445783133	14,45783133	
1	Densidade					20	0,25	0,0843373494	8,43373494	
SUM								2,964285714	1	100

Material	Densidade	Dureza	Módulo de Corte	Módulo de Elasticidade	Porosidade	Resistência à Tração
Latão	8,445	96	35,5	100	0,05	525,4
65Cu 35Zn	8,47	110	35	103	0,05	315
Liga 360 (C36000)	8,94	130	37	97	0,025	403,5
Liga 464 (C46400)	8,41	260	39	100	0,025	427
CuZn37 (C33500)	8,47	110	39	105	0,05	413,5
CuZn40 (C28000)	8,39	120	39	105	0,05	370

Material	Propriedades / Atributos										Índice de Desempenho				
	Densidade		Dureza		Módulo de Corte		Módulo de Elasticidade		Porosidade			Resistência à Tração			
Latão	A	C	8,445	8,378808306	96	33,73493976	35,5	14,2541999	100	14,02409639	0,05	14,45783133	525,4	8,668094533	93,51797021
	B		99,34872706		100		98,5915493		97		100		59,95432052		
65Cu 35Zn	A	C	8,47	8,354077467	110	29,44140197	35	14,45783133	103	13,61562756	0,05	14,45783133	315	14,45783133	94,78460097
	B		99,05548996		87,27272727		100		94,17475728		100		100		
Liga 360 (C36000)	A	C	8,94	7,914881001	130	24,91195551	37	13,67632693	97	14,45783133	0,025	7,228915663	403,5	11,28678282	79,47669325
	B		93,84787472		73,84615385		94,59459459		100		14,45783133		50		
Liga 464 (C46400)	A	C	8,41	8,413678495	260	12,45597776	39	12,97497683	100	14,02409639	0,025	7,228915663	427	10,66561327	65,7632584
	B		99,76218787		36,92307692		89,74358974		97		50		73,7704918		
CuZn37 (C33500)	A	C	8,47	8,354077467	110	29,44140197	39	12,97497683	105	13,35628227	0,05	14,45783133	413,5	11,01382556	89,59839542
	B		99,05548996		87,27272727		89,74358974		92,38095238		100		76,1789601		
CuZn40 (C28000)	A	C	8,39	8,43373494	120	26,98795181	39	12,97497683	105	13,35628227	0,05	14,45783133	370	12,30869424	88,51947141
	B		100		80		89,74358974		92,38095238		100		85,13513514		



MAQUINAGEM

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Densidade	3
2	Dureza	1
3	Maquinabilidade	1
4	Módulo de Elasticidade	3
5	Resistência à Tração	2
6	Tensão de Cedência	2

AÇOS S/ TRATAMENTO

NºProp.	Atributo	Ponderações						Imp.	wi	%
		1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.				
2	Dureza	50	60	60	70	80	1	0,2492581602	24,92581602	
3	Maquinabilidade	50					1	0,2492581602	24,92581602	
5	Resistência à Tração		40				0,6666666667	0,1661721068	16,61721068	
6	Tensão de Cedência			40			0,6666666667	0,1661721068	16,61721068	
1	Densidade				30		0,4285714286	0,1068249258	10,68249258	
4	Módulo de Elasticidade					20	0,25	0,06231454006	6,231454006	
<b>SUM</b>								<b>4,011904762</b>	<b>1</b>	<b>100</b>

Material	Densidade	Dureza	Maquinabilidade	Módulo de Elasticidade	Resistência à Tração	Tensão de Cedência
C1 (AISI 1215)	7,87	167	140	200	525	470
C45 E	7,85	179	55	206	625	530
S235 JR	7,85	110	57,5	200	405	225
S275 JR	7,85	150	52,5	200	485	275
S355 J2 H	7,85	170	45	200	560	355
ST12 (AISI 1012)	7,87	95	55	200	330	185

Material	Propriedades / Atributos							Índice de Desempenho				
	Densidade	Dureza	Maquinabilidade	Módulo de Elasticidade	Resistência à Tração	Tensão de Cedência						
C1 (AISI 1215)	A	C	7,87	167	140	200	525	470	72,97789248			
	B		99,74587039	10,65534521	56,88622754	14,17935642	100	24,92581602		100	6,231454006	62,85714286
C45 E	A	C	7,85	179	55	206	625	530	54,3277522			
	B		100	10,68249258	53,0726257	13,22878504	39,28571429	9,792284866		97,08737864	6,049955346	52,8
S235 JR	A	C	7,85	110	57,5	200	405	225	75,88116576			
	B		100	10,68249258	86,36363636	21,52684111	41,07142857	10,23738872		100	6,231454006	81,48148148
S275 JR	A	C	7,85	150	52,5	200	485	275	64,53288429			
	B		100	10,68249258	63,33333333	15,78635015	37,5	9,347181009		100	6,231454006	68,04123711
S355 J2 H	A	C	7,85	170	45	200	560	355	57,30690655			
	B		100	10,68249258	55,88235294	13,92913248	32,14285714	8,011869436		100	6,231454006	58,92857143
ST12 (AISI 1012)	A	C	7,87	95	55	200	330	185	84,83932147			
	B		99,74587039	10,65534521	100	24,92581602	39,28571429	9,792284866		100	6,231454006	100





**MAQUINAGEM**

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Densidade	3
2	Dureza	1
3	Maquinabilidade	1
4	Módulo de Elasticidade	3
5	Resistência à Tração	2
6	Tensão de Cedência	2

**ALUMÍNIO**

		Ponderações								
NºProp.	Atributo	1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.	Imp.	wi	%	
2	Dureza	50	60	60	70	80	1	0,2492581602	24,92581602	
3	Maquinabilidade	50					1	0,2492581602	24,92581602	
5	Resistência à Tração		40				0,6666666667	0,1661721068	16,61721068	
6	Tensão de Cedência			40			0,6666666667	0,1661721068	16,61721068	
1	Densidade				30		0,4285714286	0,1068249258	10,68249258	
4	Módulo de Elasticidade					20	0,25	0,06231454006	6,231454006	
SUM								4,011904762	1	100

Material	Densidade	Dureza	Maquinabilidade	Módulo de Elasticidade	Resistência à Tração	Tensão de Cedência
Al 2007	2,85	95	80	71	395	250
Al 5083	2,7	92,5	25	68	340	220
Al 5754	2,7	70	25	68	265	160
Al 6063	2,7	60	55	68	205	200
Al 6082	2,7	67,5	50	69	240	220
Al 7075	3	150	75	70	415	300

Propriedades / Atributos													Índice de Desempenho
Material	Densidade		Dureza		Maquinabilidade		Módulo de Elasticidade		Resistência à Tração		Tensão de Cedência		
	0,1068249258		0,2492581602		0,2492581602		0,06231454006		0,1661721068		0,1661721068		
Al 2007	A	2,85	95	15,74262065	80	24,92581602	71	395	51,89873418	8,624122	250	10,63501484	51,09016675
	B	94,73684211	10,12025613	63,15789474	100	95,77464789	5,968153132	64	10,01920056	72,72727273	64	12,08524413	
Al 5083	A	2,7	92,5	16,16809688	25	7,789317507	68	340	60,29411765	10,01920056	220	12,08524413	55,18648816
	B	100	10,68249258	64,86486486	31,25	6,231454006	100	265	77,35849057	12,85482336	72,72727273	16,61721068	
Al 5754	A	2,7	70	21,36498516	25	7,789317507	68	265	12,85482336	10,01920056	160	16,61721068	67,75096579
	B	100	10,68249258	85,71428571	31,25	6,231454006	100	77,35849057	12,85482336	100	16,61721068		
Al 6063	A	2,7	60	24,92581602	55	17,13649852	68	205	16,61721068	10,01920056	200	13,29376855	71,75074184
	B	100	10,68249258	100	68,75	6,231454006	100	100	16,61721068	10,01920056	80	12,08524413	
Al 6082	A	2,7	67,5	22,15628091	50	15,57863501	69	240	14,19386746	10,01920056	220	12,08524413	65,25902816
	B	100	10,68249258	88,88888889	62,5	98,55072464	6,141143078	85,41666667	14,19386746	72,72727273	72,72727273	12,08524413	
Al 7075	A	3	150	9,970326409	75	23,36795252	70	415	8,208501662	10,01920056	300	8,862512364	42,70899622
	B	90	9,614243323	40	93,75	97,14285714	6,053412463	49,39759036	8,208501662	53,33333333	8,862512364		





**MAQUINAGEM**

NºProp.	Propriedades a Analisar	Grau de Importância
1	Densidade	3
2	Dureza	1
3	Maquinabilidade	1
4	Módulo de Elasticidade	3
5	Resistência à Tração	2
6	Tensão de Cedência	2

**LATÃO**

NºProp.	Atributo	Ponderações						Imp.	wi	%
		1/2.	1/3.	1/4.	1/5.	1/6.				
2	Dureza	50	60	60	70	80	1	0,2492581602	24,92581602	
3	Maquinabilidade	50					1	0,2492581602	24,92581602	
5	Resistência à Tração		40				0,6666666667	0,1661721068	16,61721068	
6	Tensão de Cedência			40			0,6666666667	0,1661721068	16,61721068	
1	Densidade				30		0,4285714286	0,1068249258	10,68249258	
4	Módulo de Elasticidade					20	0,25	0,06231454006	6,231454006	
<b>SUM</b>								<b>4,011904762</b>	<b>1</b>	<b>100</b>

Material	Densidade	Dureza	Maquinabilidade	Módulo de Elasticidade	Resistência à Tração	Tensão de Cedência
Latão	8,445	96	63	100	525,4	360
65Cu 35Zn	8,47	110	30	103	315	97
Liga 360 (C36000)	8,94	130	100	97	403,5	217
Liga 464 (C46400)	8,41	260	30	100	427	207
CuZn37 (C33500)	8,47	110	60	105	413,5	255,5
CuZn40 (C28000)	8,39	120	40	105	370	145

Material	Propriedades / Atributos										Índice de Desempenho		
	Densidade		Dureza		Maquinabilidade		Módulo de Elasticidade		Resistência à Tração			Tensão de Cedência	
Latão	0,1068249258		0,2492581602		0,2492581602		0,06231454006		0,1661721068		0,1661721068		71,72666176
65Cu 35Zn	A	8,445	96	63	15,70326409	100	6,044510386	525,4	9,962735754	360	4,477415101	78,91565766	
	B	99,34872706	100	63	7,477744807	97	59,95432052	9,962735754	26,94444444	4,477415101			
Liga 360 (C36000)	A	8,47	110	30	7,477744807	103	5,868456685	315	16,61721068	97	16,61721068	79,98983214	
	B	99,05548996	87,27272727	30	94,17475728	100	6,231454006	403,5	12,97254366	100	7,427969752		
Liga 464 (C46400)	A	8,94	130	100	24,92581602	97	6,231454006	403,5	12,97254366	217	7,427969752	53,42812865	
	B	93,84787472	73,84615385	100	100	100	78,0669145	78,0669145	44,70046083	44,70046083			
CuZn37 (C33500)	A	8,41	260	30	7,477744807	100	6,044510386	427	12,25859804	207	7,786808871	72,01470591	
	B	99,76218787	36,92307692	30	97	97	73,7704918	73,7704918	46,85990338	46,85990338			
CuZn40 (C28000)	A	8,47	110	60	14,95548961	105	5,756676558	413,5	12,6588183	255,5	6,308686639	71,61357408	
	B	99,05548996	87,27272727	60	92,38095238	92,38095238	5,756676558	76,1789601	37,96477495	37,96477495			

## Apêndice D – Seleção de Parâmetros Estruturais

Os parâmetros estruturais selecionados para a otimização foram definidos com base na análise das tensões induzidas na estrutura sob condições de carga. A escolha recaiu sobre componentes cuja variação geométrica tem maior influência no comportamento global do sistema, permitindo uma análise mais eficaz e direcionada dos efeitos estruturais resultantes.

As figuras seguintes (Figura 138 a Figura 145) ilustram os componentes considerados e identificam graficamente os respectivos parâmetros estruturais selecionados para o estudo.

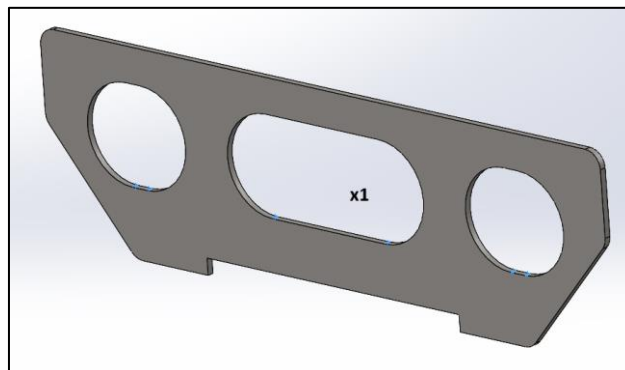


Figura 138 - Componente MC0...438648\_12\_AF1 (Espessura -  $x_1$ )

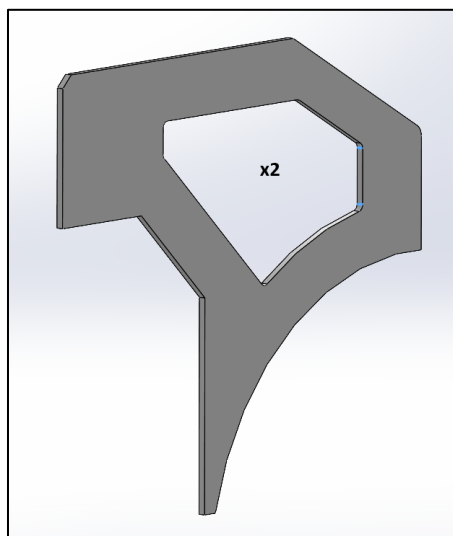


Figura 139 - Componente MC0...438648\_16\_AF2 (Espessura -  $x_2$ )

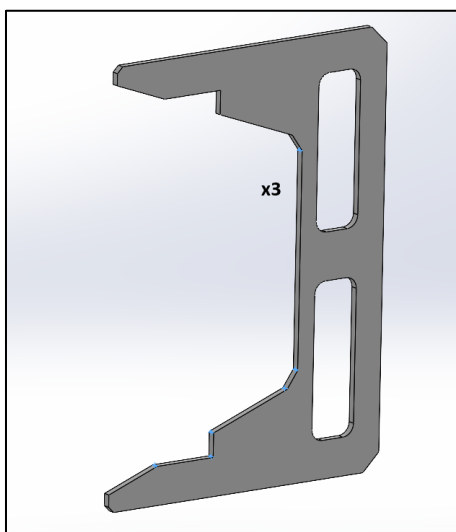


Figura 140 - Componente MC0...438648\_17\_AF0 (Espessura -  $x_3$ )

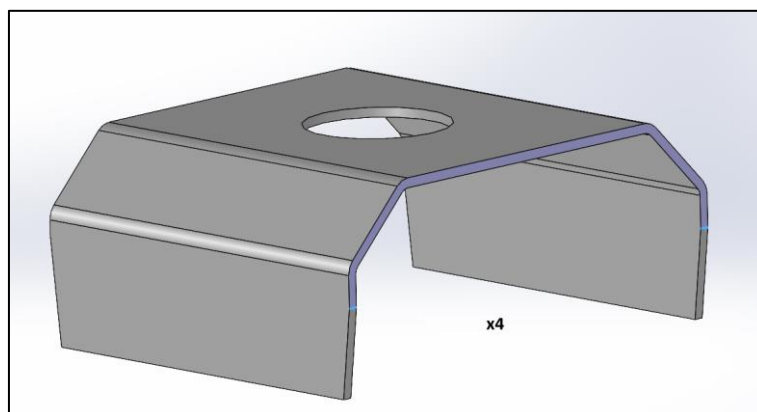


Figura 141 - Componente MC0...438648\_9\_AF1 (Espessura -  $x_4$ )

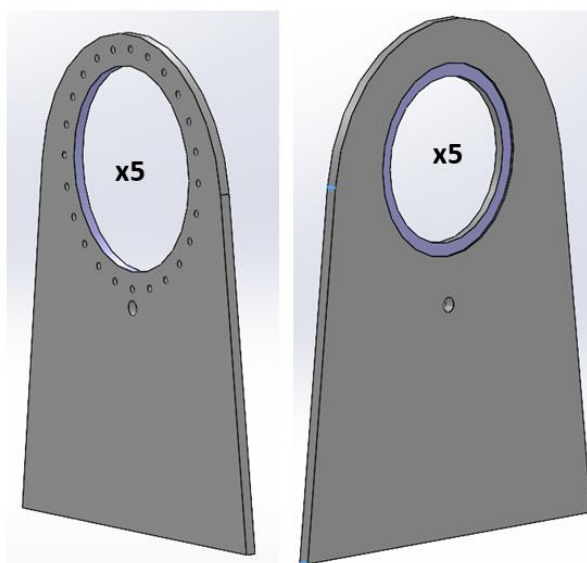


Figura 142 - Componentes MC...438648\_8\_AF1 e MC...438648\_7\_AF1 (Espessura -  $x_5$ )

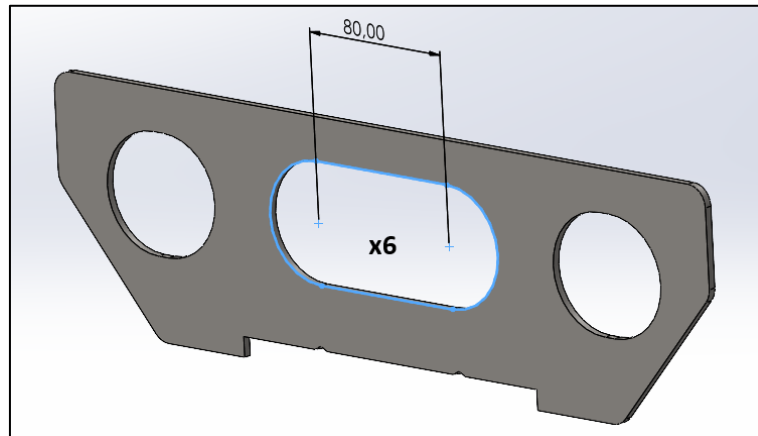


Figura 143 - Componente MC0...438648\_12\_AF1 (Comprimento Rasgo Interno -  $x_6$ )

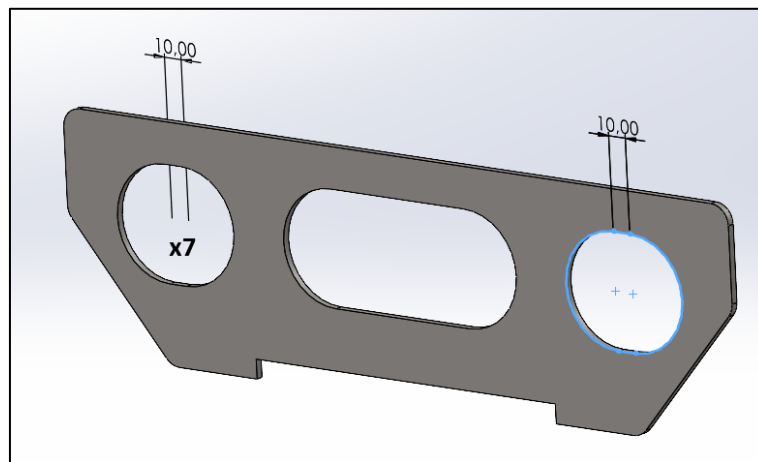


Figura 144 - Componente MC0...438648\_12\_AF1 (Comprimento Rasgos -  $x_7$ )

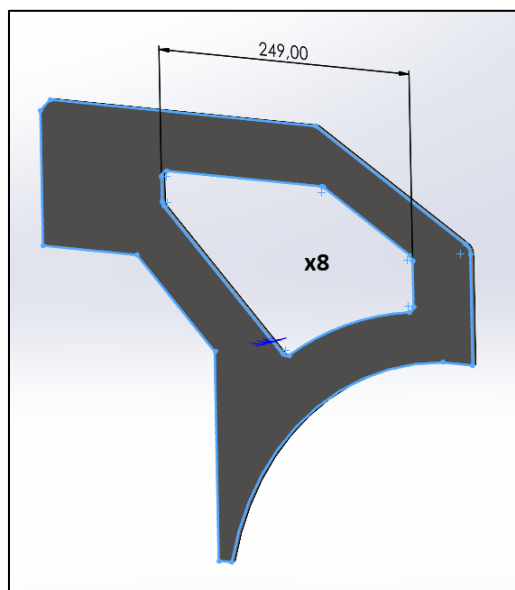


Figura 145 - Componente MC0...438648\_16\_AF2 (Comprimento Rasgo Interior -  $x_8$ )



# Apêndice E – Programação Desenvolvida em *Software Octave*

A programação aqui descrita corresponde à base computacional utilizada na resolução do problema de otimização estrutural, integrando os algoritmos, funções e procedimentos necessários ao funcionamento do modelo.

## Código de Programação:

```
% --- INICIALIZAÇÃO COM SEMENTE FIXA ---  
rand("seed", 10); % Garante sempre o mesmo resultado ao executar  
  
% --- MODELOS APROXIMADOS (RSM) ---  
function y = E(x)  
    X = x(:)'; % Garante vetor linha  
    y = 23668.589 + ...  
        243.373*X(1) + 46.444*X(2) + 49.254*X(3) + 3.476*X(4) + ...  
        79.258*X(5) + 20.072*X(6) + 10.564*X(7) + 0.355*X(8) + ...  
        -12.705*X(1)^2 + -4.438*X(2)^2 + -9.482*X(3)^2 + ...  
        -0.759*X(4)^2 + -2.606*X(5)^2 + -0.282*X(6)^2 + ...  
        -0.056*X(7)^2 + -0.0001*X(8)^2;  
end  
  
function y = f1(x)  
    X = x(:)';  
    y = -124.852 + ...  
        4.285*X(1) + 4.428*X(2) + 3.745*X(3) + 1.446*X(4) + ...  
        1.713*X(5) + 0.198*X(6) + 0.234*X(7) + 0.0066*X(8) + ...  
        -0.252*X(1)^2 + -0.282*X(2)^2 + -0.240*X(3)^2 + ...  
        -0.045*X(4)^2 + -0.061*X(5)^2 + -0.0017*X(6)^2 + ...  
        -0.0046*X(7)^2 + -0.00003*X(8)^2;
```

## Apêndice E

```
end
function y = Dmax(x)
X = x(:)';
y = 0.392 + ...
    -0.0069*X(1) + -0.0094*X(2) + -0.0086*X(3) + -0.0031*X(4) + ...
    -0.0047*X(5) + -0.0003*X(6) + -0.0007*X(7) + -0.00003*X(8) + ...
    0.00013*X(1)^2 + 0.00018*X(2)^2 + 0.00018*X(3)^2 + ...
    0.00003*X(4)^2 + 0.00005*X(5)^2 + 0.000001*X(6)^2 + ...
    0.000002*X(7)^2 + 0.00000001*X(8)^2;
end
function y = sigma(x)
X = x(:)';
y = -9.375 + ...
    1.725*X(1) + 2.442*X(2) + 1.748*X(3) + 1.365*X(4) + ...
    2.003*X(5) + 0.186*X(6) + 0.171*X(7) + 0.0194*X(8) + ...
    -0.094*X(1)^2 + -0.142*X(2)^2 + -0.086*X(3)^2 + ...
    -0.049*X(4)^2 + -0.079*X(5)^2 + -0.0011*X(6)^2 + ...
    -0.0011*X(7)^2 + -0.00007*X(8)^2;
end
% --- FUNÇÃO OBJETIVO COM CLIPPING DURO ---
function F = objective(x)
mu_E = 31148.043216; sigma_E = 78.832750;
mu_f1 = 48.254050; sigma_f1 = 3.694189;
mu_D = 0.203951; sigma_D = 0.024706;
mu_s = 51.518150; sigma_s = 8.829476;

Ex = E(x);
f1x = f1(x);
Dmaxx = Dmax(x);
sigmax = sigma(x);
```

```

if Dmaxx > 0.3 || Dmaxx < 0.2 || ...
    sigmax > 180 || sigmax < 80 || ...
    f1x < 30 || f1x > 60 || ...
    Ex > 30999 || Ex < 29000 || ...
    abs(x(1) - x(2)) > 1e-3 || abs(x(1) - x(3)) > 1e-3 || abs(x(2) - x(3)) > 1e-3 || ...
    abs(x(4) - x(5)) > 1e-3
    F = 1e6; % Penalização pesada
    return;
end
En = (Ex - mu_E) / sigma_E;
f1n = (f1x - mu_f1) / sigma_f1;
Dn = (Dmaxx - mu_D) / sigma_D;
sn = (sigmax - mu_s) / sigma_s;

F = 0.99698 * En + 0.03294 * f1n - 0.00023 * Dn - 0.01839 * sn;
end
% --- OTIMIZAÇÃO COM PSO ---
function best = pso_optimize()
nVar = 8;
nPop = 500;
MaxIt = 100;
w = 0.9; wdamp = 0.95;
c1 = 2; c2 = 2;

VarMin = [3, 3, 3, 6, 6, 50, 5, 200];
VarMax = [6, 6, 6, 10, 10, 80, 20, 250];

BestCost = zeros(MaxIt, 1);

for i = 1:nPop
    particle(i).Position = VarMin + rand(1, nVar).*(VarMax - VarMin);

```

## Apêndice E

```
particle(i).Velocity = zeros(1, nVar);
particle(i).Cost = objective(particle(i).Position);
particle(i).Best = particle(i);
end
[~, idx] = min([particle.Cost]);
GlobalBest = particle(idx).Best;

for it = 1:MaxIt
    for i = 1:nPop
        r1 = rand; r2 = rand;
        particle(i).Velocity = ...
            w * particle(i).Velocity ...
            + c1*r1 * (particle(i).Best.Position - particle(i).Position) ...
            + c2*r2 * (GlobalBest.Position - particle(i).Position);

        particle(i).Position += particle(i).Velocity;
        particle(i).Position = max(particle(i).Position, VarMin);
        particle(i).Position = min(particle(i).Position, VarMax);

        particle(i).Cost = objective(particle(i).Position);

        if particle(i).Cost < particle(i).Best.Cost
            particle(i).Best = particle(i);
            if particle(i).Best.Cost < GlobalBest.Cost
                GlobalBest = particle(i).Best;
            end
        end
    end
end
BestCost(it) = GlobalBest.Cost;
w *= wdamp;
fprintf('Iteração %d: Melhor Custo = %.6f\n', it, GlobalBest.Cost);
```

```

end
figure;
plot(BestCost, 'LineWidth', 2);
xlabel('Iteração');
ylabel('Melhor valor de F(x)');
title('Evolução da Função Objetivo');
grid on;

best = GlobalBest;
end
% --- EXECUTAR OTIMIZAÇÃO ---
best_solution = pso_optimize();
% --- APRESENTAR RESULTADOS ---
fprintf('\n--- MELHOR SOLUÇÃO ENCONTRADA ---\n');
fprintf('Parâmetros x = [']; fprintf('%3f ', best_solution.Position); fprintf(']\n');
fprintf('F_obj = %6f\n', best_solution.Cost);
fprintf('\n--- INDICADORES DE DESEMPENHO ---\n');
fprintf('E (energia) = %3f J\n', E(best_solution.Position));
fprintf('f1 (freq. natural) = %3f Hz\n', f1(best_solution.Position));
fprintf('Dmax (deslocamento) = %5f mm\n', Dmax(best_solution.Position));
fprintf('Sigma (tensão) = %3f MPa\n', sigma(best_solution.Position));

```



## Apêndice F – Simulações da Otimização e Parâmetros Estruturais

Neste apêndice são apresentados os resultados das simulações realizadas no âmbito do processo de otimização estrutural. As análises incidiram sobre a estrutura da cabeça do 5º eixo, utilizando os **parâmetros otimizados obtidos através do algoritmo PSO**.

As **condições de fronteira e cargas aplicadas** nas simulações de otimização correspondem às definidas no **Setup I** da segunda fase de ensaios, assegurando assim a **comparabilidade direta entre os resultados** da solução original e da solução otimizada.

A **configuração da malha** utilizada nestas simulações seguiu os mesmos critérios definidos para a 2ª fase de ensaios, conforme os parâmetros apresentados na Tabela 62, garantindo coerência entre os diferentes modelos analisados.

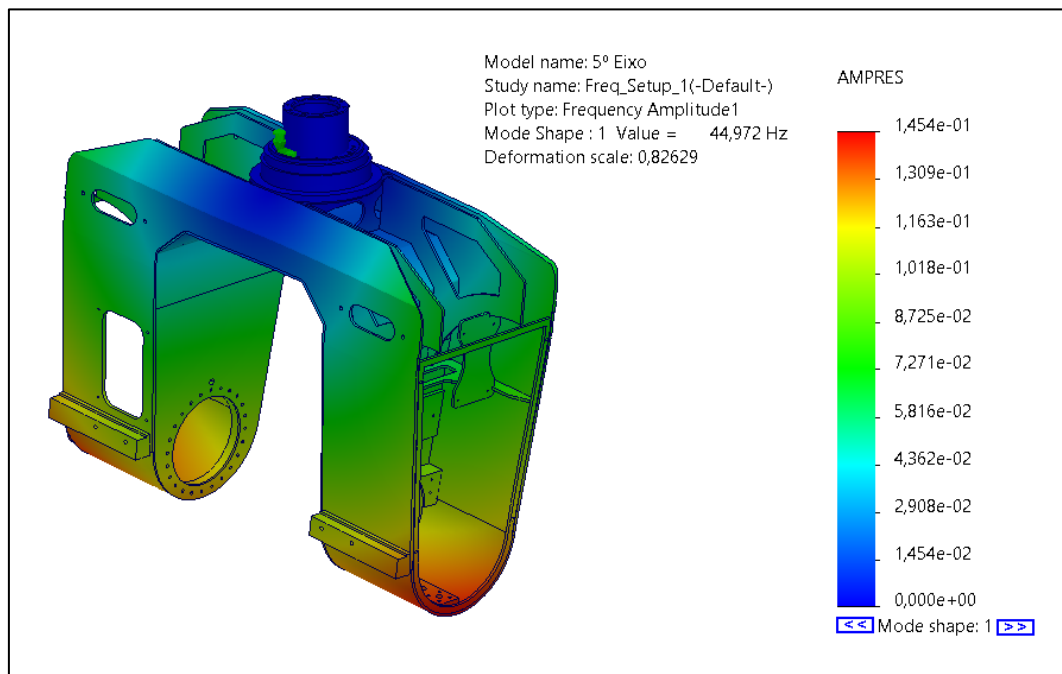


Figura 146 - 1ª Frequência Natural de Vibração (Estrutura Original)

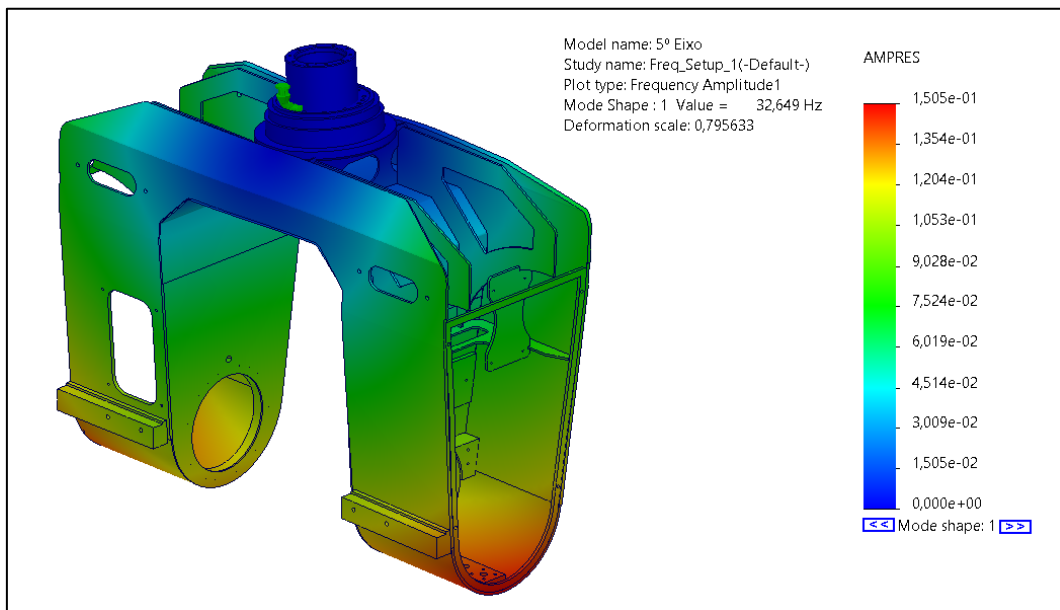


Figura 147 - 1ª Frequência Natural de Vibração (Estrutura Otimizada)

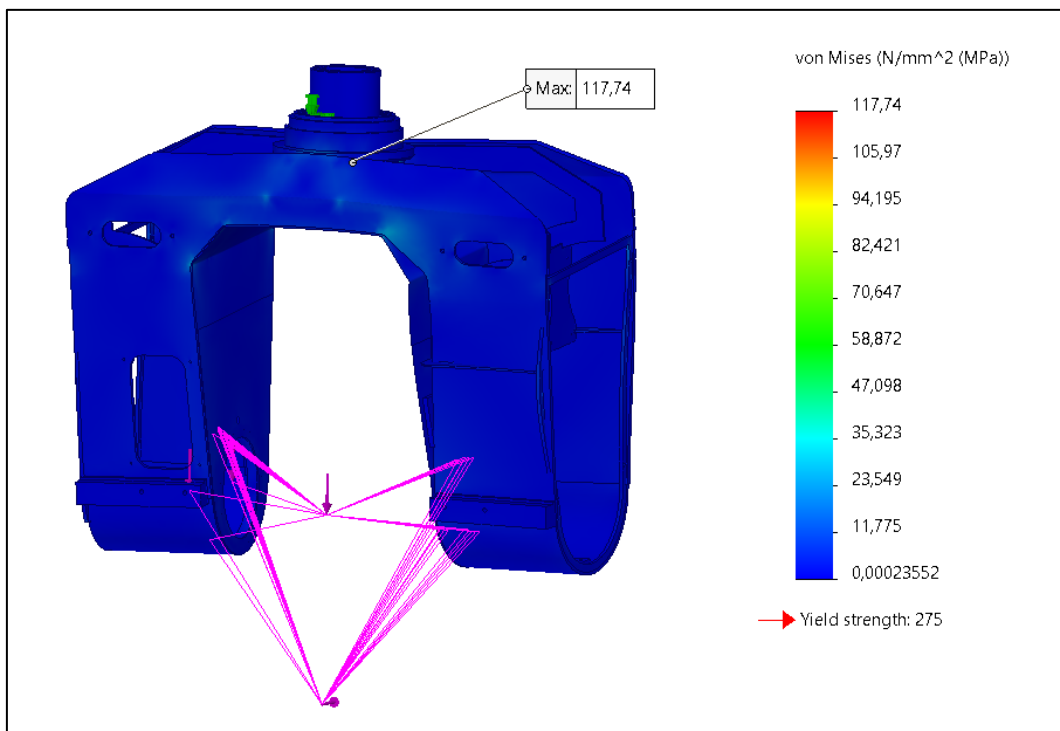


Figura 148 - Tensão de von Mises Otimização [MPa]

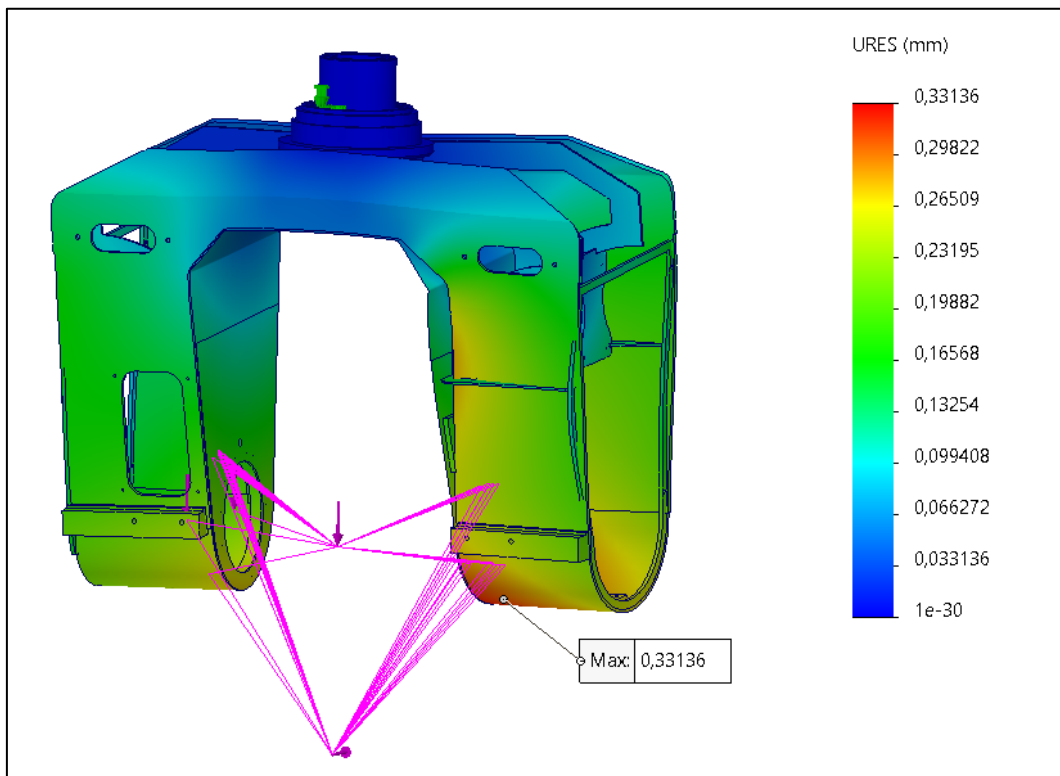


Figura 149 - Deslocamento Otimização [mm]

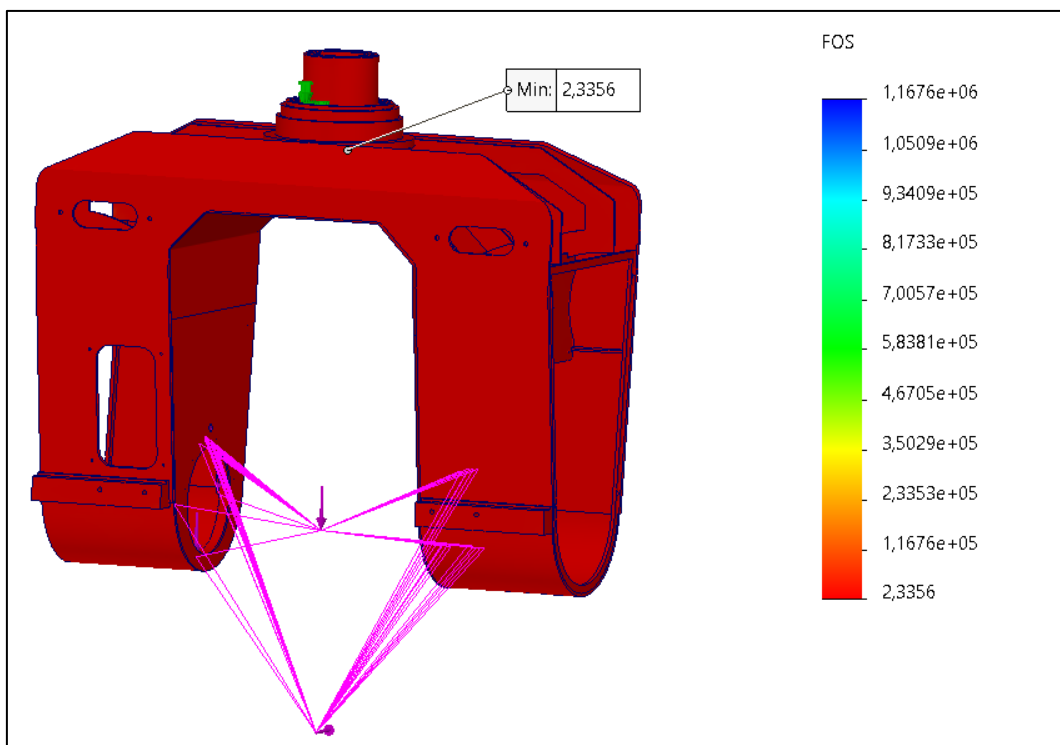


Figura 150 - Fator de Segurança Otimização



# **Anexo A – Catálogos de Componentes Normalizados Utilizados ou Estudados**

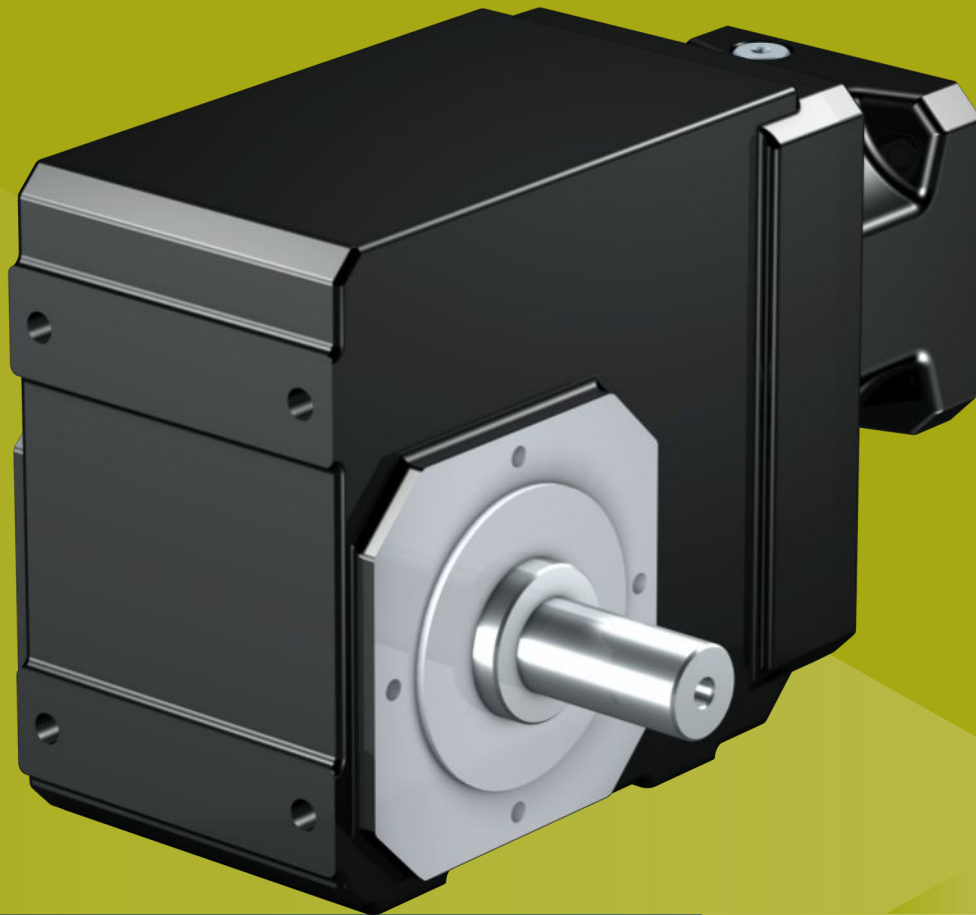


# STÖBER compact

System technology  
for drives and  
automation



**STÖBER**



## 2.15 Helical bevel gear units

# K

Highly rigid, helical-gear right-angle gear units

### Features

Power density	★★★★☆
Backlash	★★★★☆
Price category	€€
Shaft load	★★★★☆
Smooth operation	★★★★☆
Torsional stiffness	★★★★☆
Mass moment of inertia	★★★★☆
Helical gearing	✓
Maintenance-free (K1 – K4)	✓
FKM seal ring at the input	✓
Reinforced output bearing (K5 – K8)	✓ (on request)
Easy and reliable attachment to any synchronous servo motor	✓

Key ★☆☆☆☆ good | ★★★★★ excellent  
 € Economy | €€€€€ Premium

## Technical data

Type	i	M <sub>zacc</sub> [Nm]	n <sub>1maxZB</sub> [rpm]	Δφ <sub>2</sub> [arcmin]	C <sub>2</sub> [Nm/arcmin]
K102	4 – 70	60 – 135	5000 – 7000	6 – 12	6.3 – 6.8
K202	4 – 69	102 – 220	4500 – 6500	1.5 – 10	9.7 – 11
K203	39 – 272	159 – 220	6500	2.5 – 10	11
K302	4 – 69	173 – 385	4000 – 6000	1.5 – 10	16
K303	33 – 272	238 – 385	6000	2.5 – 10	16
K402	4 – 69	323 – 600	3800 – 5500	1.5 – 10	30 – 31
K403	32 – 272	340 – 600	5500	2.5 – 10	31
K513	7.3 – 97	827 – 1000	3200 – 5000	2 – 10	49 – 50
K514	85 – 374	827 – 1000	5000	3 – 10	49 – 50
K613	7.3 – 95	984 – 1600	3000 – 4500	2 – 10	81 – 82
K614	111 – 294	1448 – 1600	4500	3 – 10	82 – 83
K713	7.6 – 99	1802 – 2600	2700 – 4200	2 – 10	122 – 126
K714	89 – 381	1626 – 2600	4200	3 – 10	126
K813	7.4 – 97	2135 – 4650	2600 – 4000	2 – 10	187 – 196
K814	67 – 311	3537 – 4650	4000	3 – 10	196
K913	13 – 95	3592 – 7700	2800 – 3800	5 – 10	367 – 379
K914	92 – 374	2895 – 7700	3800	5 – 10	379
K1013	39 – 94	7330 – 13200	3500	5 – 10	722 – 724
K1014	93 – 290	10621 – 13200	3500	5 – 10	724 – 725

Shaft design	
Solid shaft with feather key	✓
Solid shaft without feather key	K1 – K4: ✓ Starting at K5: Request
Solid shaft on both sides	✓
Hollow shaft with keyway	✓
Hollow shaft with shrink ring	✓

Housing design	
Pitch circle diameter	K1 – K9: ✓
Round flange	K1 – K9: ✓
Pitch circle diameter + torque arm bracket	K1 – K9: ✓
Foot + pitch circle diameter + torque arm bracket	K10: ✓
Foot + pitch circle diameter	✓
Foot + round flange	✓

Motor adapter design	
Motor adapter with EasyAdapt coupling (ME)	✓
Motor adapter with curved tooth coupling (MR)	✓
Motor adapter with plug-in coupling (MQ)	✓
Motor adapter with ServoStop brake (MB)	✓

On request, you can receive the gear units with ME, MQ and MR motor adapters in ATEX design (Directive 2014/34/EU).

## Input options

ME motor adapter for attaching synchronous servo motors



Catalog ID 443054\_en

MB motor adapter for attaching synchronous servo motors



Catalog ID 443234\_en

MR motor adapter for attaching asynchronous motors



On request

EZ synchronous servo motor



Catalog ID 442437\_en

MB motor adapter + EZ synchronous servo motor



Catalog ID 443311\_en

LM Lean motor



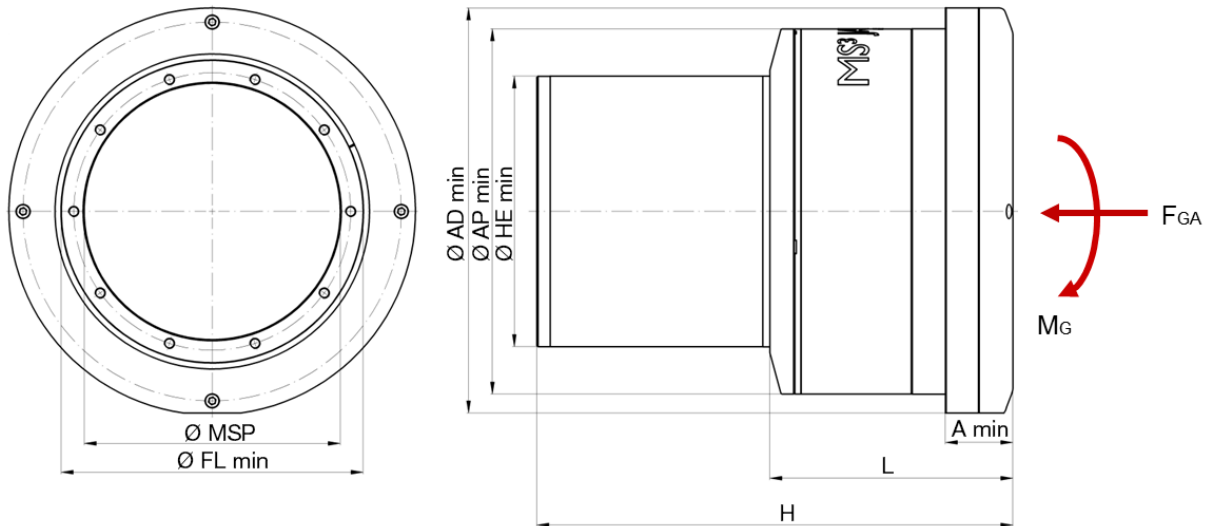
Catalog ID 443016\_en

The corresponding catalogs can be found at <http://www.stoeber.de/en/downloads/>

Enter the ID of the catalog in the Search term field.

# Motor Spindle Safety System I Series MS<sup>3</sup>

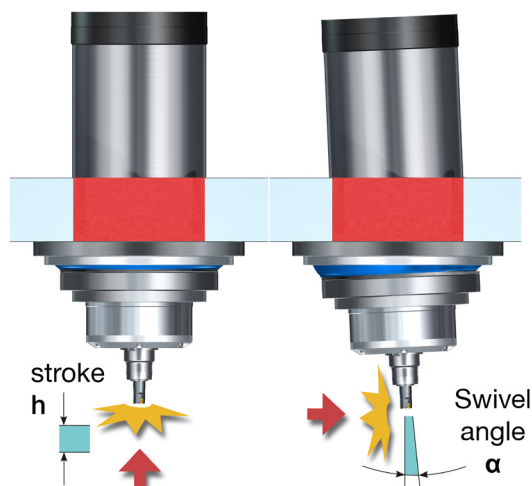
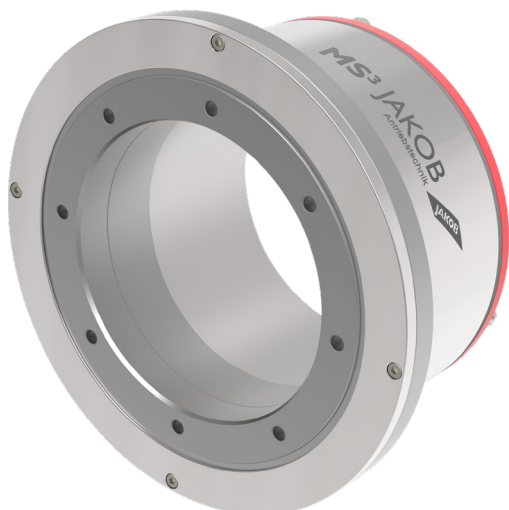
- /// Adjustments to your machine possible
- /// Detects tool collisions
- /// Energy self-sufficient
- /// Protects against spindle damage
- /// Increases machine availability
- /// Offers complete all-round protection
- /// High rigidity and holding force thanks to permanent holding magnets



Technical data and dimensions [mm]: Length dimensions according to DIN ISO 2768 mH

Parameter	Symbol / Unit	Interface DIN 68 893-1 A63				
Motor spindle fit	Ø MSP [mm]	170	190	210	230	270
Headstock fit	Ø AP [mm]	250	270	290	310	350
Flange outside diameter	Ø AD [mm]	280	300	320	340	380
Length	A min [mm]	55	55	55	55	55
Axial Stroke	h [mm]	10-25				
Swivel angle	α [°]	4				
Axial limit holding force	F <sub>GA</sub> [N]	10.000 - 30.000				
Limit bending moment	M <sub>G</sub> [N]	2.000 - 5.000				
System weight	m [kg]	20-35				

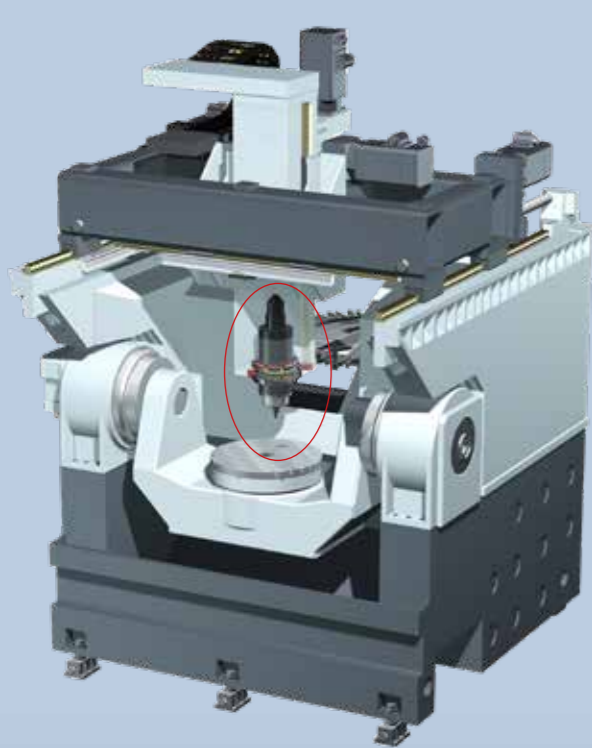
Subject to change, application-specific drawing on request. Please contact us for the precise adjustment of the MS<sup>3</sup> to your machine at +49 (0) 6022 2208-0 or at the e-mail address [info@jakobantriebstechnik.de](mailto:info@jakobantriebstechnik.de).



## Application Areas

The safety system is integrated into the machine tool by the machine tool producer. It is designed for vertical and horizontal machining centers, which are typically used in tool and mold making or in applications with high varieties in working piece dimensions (toll manufacturers).

## Motor Spindle Safety System MS<sup>3</sup>

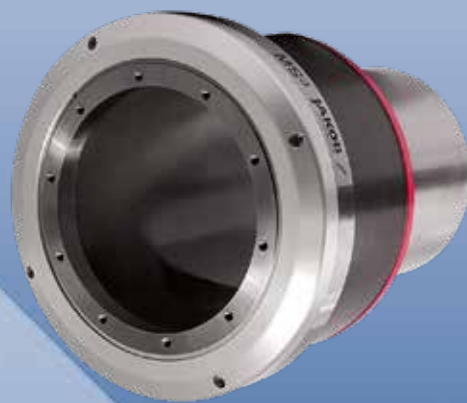


vertical machining center



horizontal machining center

Various different solutions already exist for spindles with HSK-63 and SK-40 interfaces, including the stand-alone version for optional fitting or the compact spindle-integrated version as retro-fit solution. Numerous tests during development have proven that perfect stiffness and precision of the machine tool remain intact after installation.



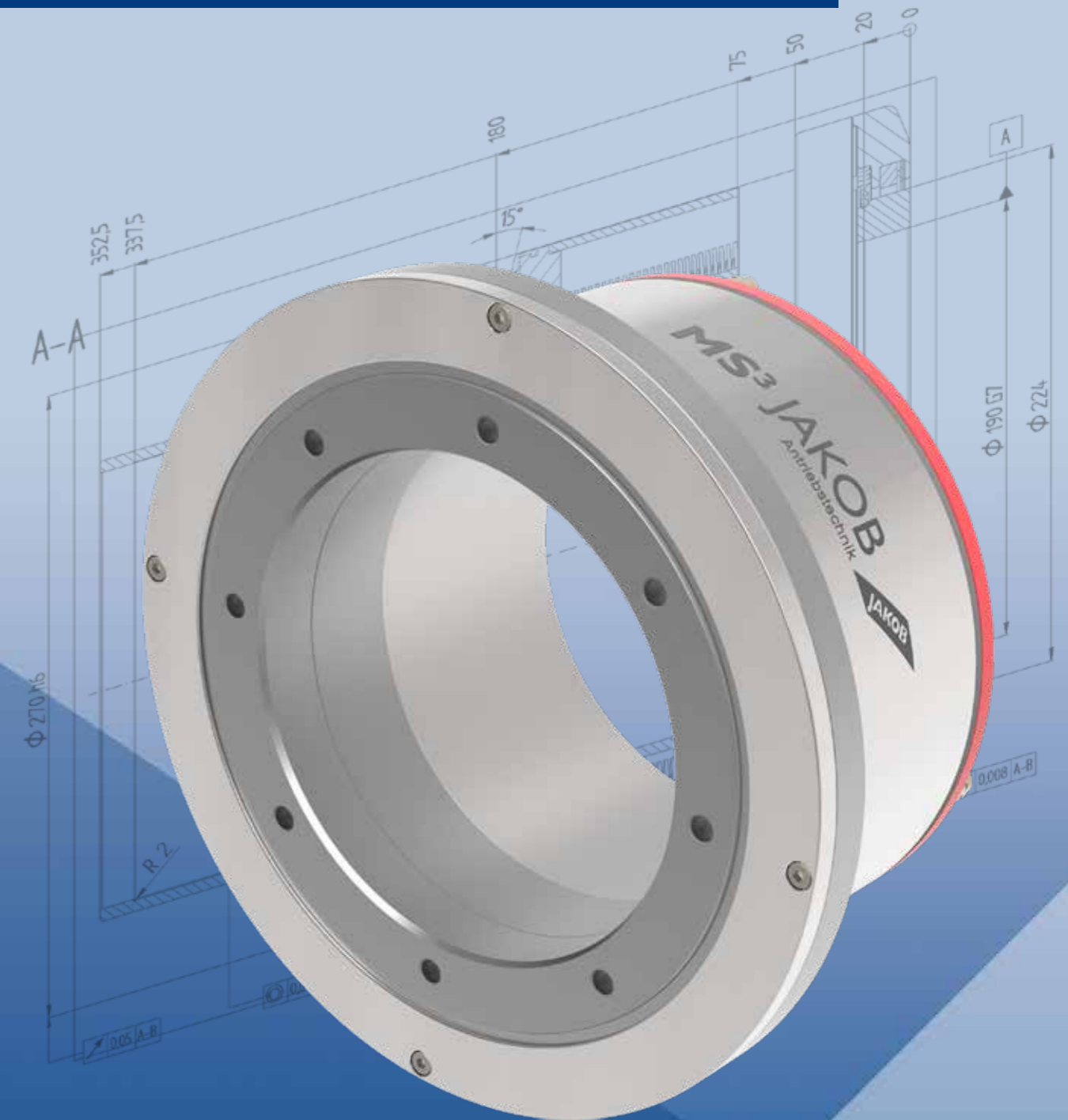
stand-alone version



MS<sup>3</sup> integrated in spindle housing

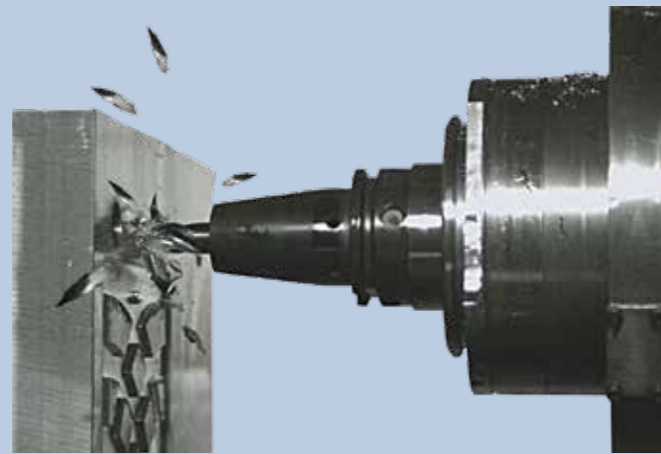
## Further Advantages

- ✓ adaptable to all common motor spindle geometries
- ✓ hybrid protection through provision of alarm signal and decoupling paths
- ✓ increase of machine availability through prevention of overload damages
- ✓ maintenance-free



## Collision Protection

Collisions with high feed rates in the working space of cutting machine tools can lead to substantial damages. Studies show, that about 70% of all machine down times are caused by crashes. These often result in damages to sensitive components such as bearings, guides and measuring systems. The costs of repairs and the loss of production average around 25,000€ according to evaluations.



machine tool collision



collision costs and damages

Repair Cost Calculation	
cause: zero point wrong	
spindle crash into workpiece with high feed rate	
Repair Costs:	
exchange of spindle	20.000,- €
installation costs	3.900,- €
traveling costs	380,- €
shipping	290,- €
<b>total</b>	<b>24.570,- €</b>

To protect the machine from costly damages in case of overload and collision, a protective system that prevents unallowable load in machine tools' flux is required.

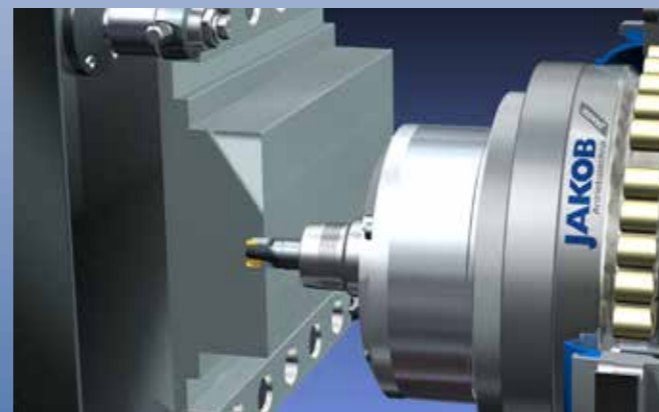
## Motor Spindle Safety System MS<sup>3</sup>

The motor spindle safety system MS<sup>3</sup> safeguards the heart of the machine tool, the motor spindle, from collision-induced overload at the tool.

Whenever the allowable force is exceeded, MS<sup>3</sup> disconnects the flux at the connection of machine tool and motor spindle. Depending on the collision direction, the system decouples through axial stroke or a pivoting motion of the spindle. The effective impact force is absorbed effectively. Built-in sensors detect the decoupling and allow for counter measures by the machine control, such as emergency stop or reversing of the feed motion.



axial collision

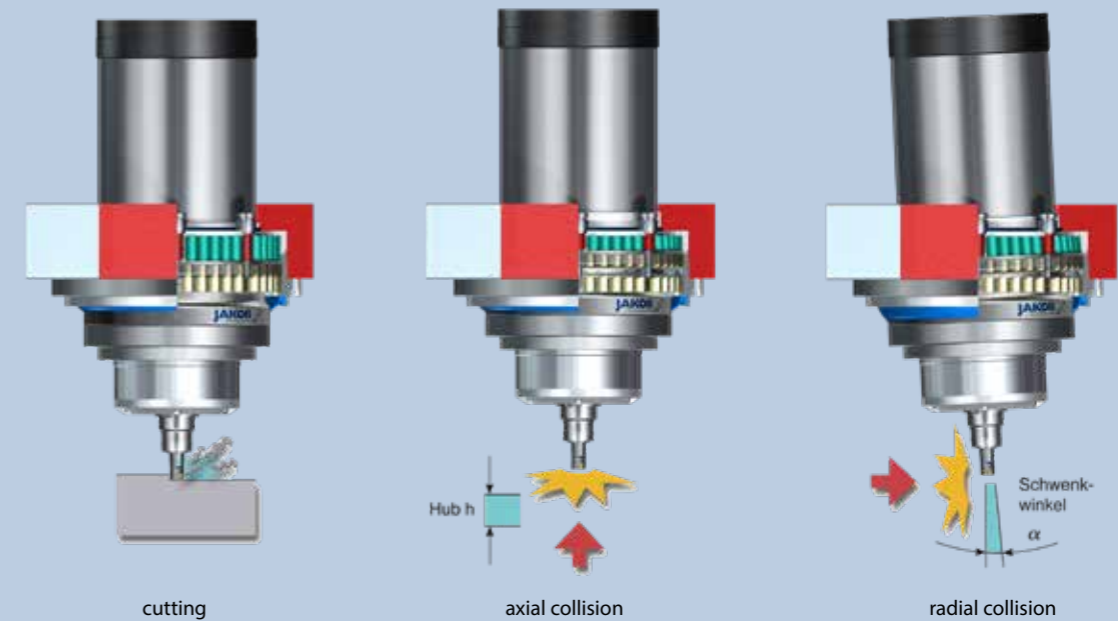


radial collision

The reaction and braking distance of the feed axis is well within the axial stroke and pivot path of the safety system. After retreating from the point of impact, the spindle returns precisely to its initial position thanks to the resetting mechanism. MS<sup>3</sup> can therefore be considered a hybrid protection system and has huge advantages in comparison to electronic monitoring systems.

## Protective Function

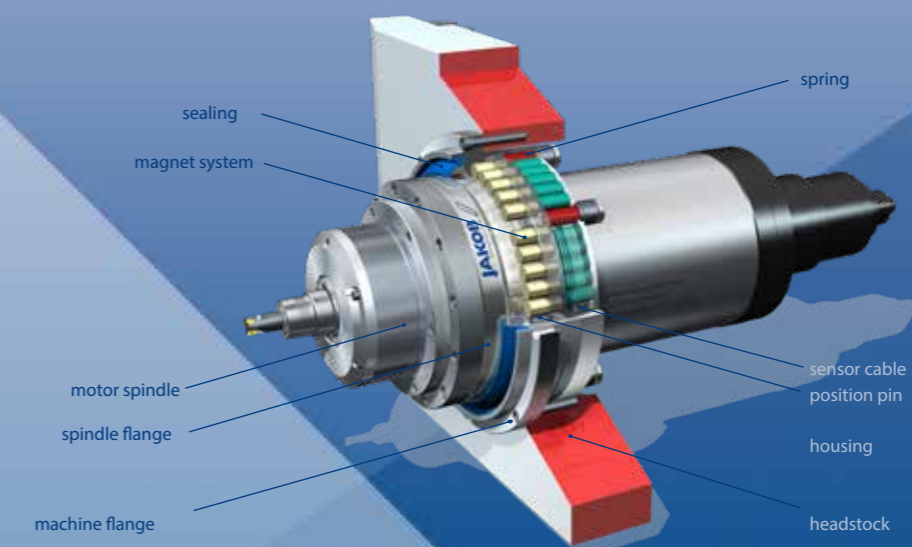
The safety system provides all-around protection and prevents damages in case of axial as well as radial collisions with high feed rates.



- cutting: spindle remains in initial position
- axial collision: spindle moves from initial position with stroke h
- radial collision: spindle pivots by  $\alpha$  from initial position

## System Design

MS<sup>3</sup> consists of two flange halves, one mounted to the motor and one mounted to the spindle. Permanent magnets supply high adhesive forces and static stiffness until the decoupling force is reached. The tapered division area as well as the indexing of the interface guarantee a high joining precision. A resetting mechanism accomplished by preloaded spring force absorbs forces during a crash and returns the spindle back into its initial position. Sophisticated sealing prevents dirt, coolant, and chips from permeating the housing. Three digital sensors constantly monitor the spindle state and generate a condition signal for machine control.



# MS<sup>3</sup>. SISTEMA DE SEGURIDAD PARA ELECTROHUSILLOS DE MÁQUINA HERRAMIENTA

## PROTECCIÓN CONTRA COLISIONES

Las colisiones a velocidades de avance elevadas pueden provocar daños sustanciales. Se han realizado estudios que indican que aproximadamente el 70% de los periodos de inactividad de la maquinaria es debido a colisiones.

Con frecuencia, estas colisiones dañan componentes como rodamientos, guías y sistemas de medición.

En promedio, los costes de las reparaciones y las pérdidas de producción pueden ascender a unos 25.000 euros, según las estimaciones realizadas.

Para proteger la máquina frente a costosos daños por sobrecarga y colisión se requiere un sistema de protección que prevenga contra cargas no permisibles.

### Colisión de la herramienta

### Costes y daños por colisión

Bastidor  
FUENTE: GMN

Pinza de sujeción  
FUENTE: GMN

Accionador  
FUENTE: GMN

Rodamiento  
FUENTE: IDEAL BEARINGS

Repair Cost Calculation

cause: zero point wrong;  
spindle crash into workpiece with high feed rate

Repair Costs:

exchange of spindle	20.050,- €
installation costs	3950,- €
traveling costs	350,- €
shipping	290,- €
<b>total</b>	<b>24.640,- €</b>

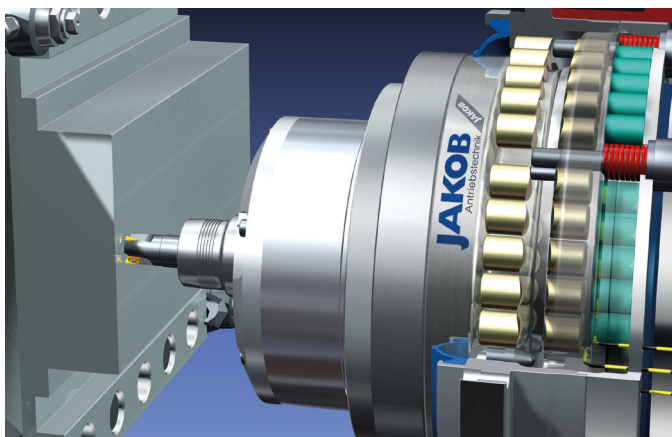
## SISTEMA DE SEGURIDAD PARA ELECTROHUSILLOS DE MÁQUINA HERRAMIENTA MS<sup>3</sup>

El sistema MS<sup>3</sup> (Motor Spindle Safety System) protege el electrohusillo de la máquina herramienta contra sobrecargas inducidas por una colisión en la herramienta.

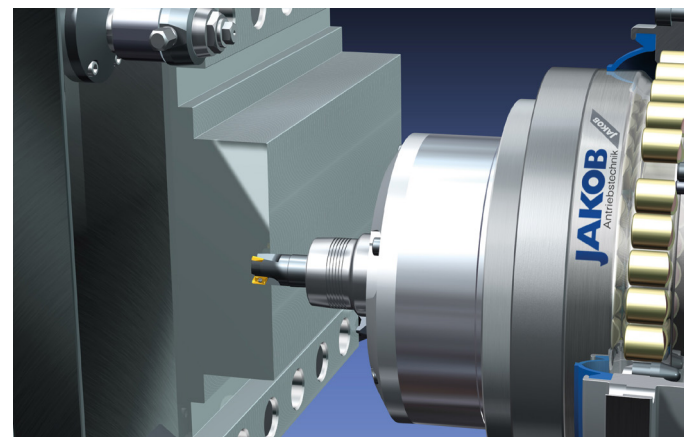
Cuando se excede la fuerza permisible, MS<sup>3</sup> desconecta el electrohusillo. En función de la dirección de la colisión, se desacopla el sistema a través de desplazamiento axial o con un movimiento pivotante del electrohusillo. De este modo, la fuerza de impacto efectiva se absorbe eficazmente. Unos sensores integrados detectan el desplazamiento y permiten al CNC de la máquina

actuar en consecuencia, activando el paro de emergencia o invirtiendo el movimiento de avance.

La distancia de reacción y de frenado del eje de avance se sitúa dentro de los límites de desplazamiento axial y recorrido basculante del sistema de seguridad. Después de retirarse del punto de impacto, el electrohusillo vuelve a su posición inicial gracias a un mecanismo de rearme. El MS<sup>3</sup> es por tanto un sistema de protección híbrido, que aporta grandes ventajas en comparación con los sistemas de monitorización electrónica.



Colisión axial

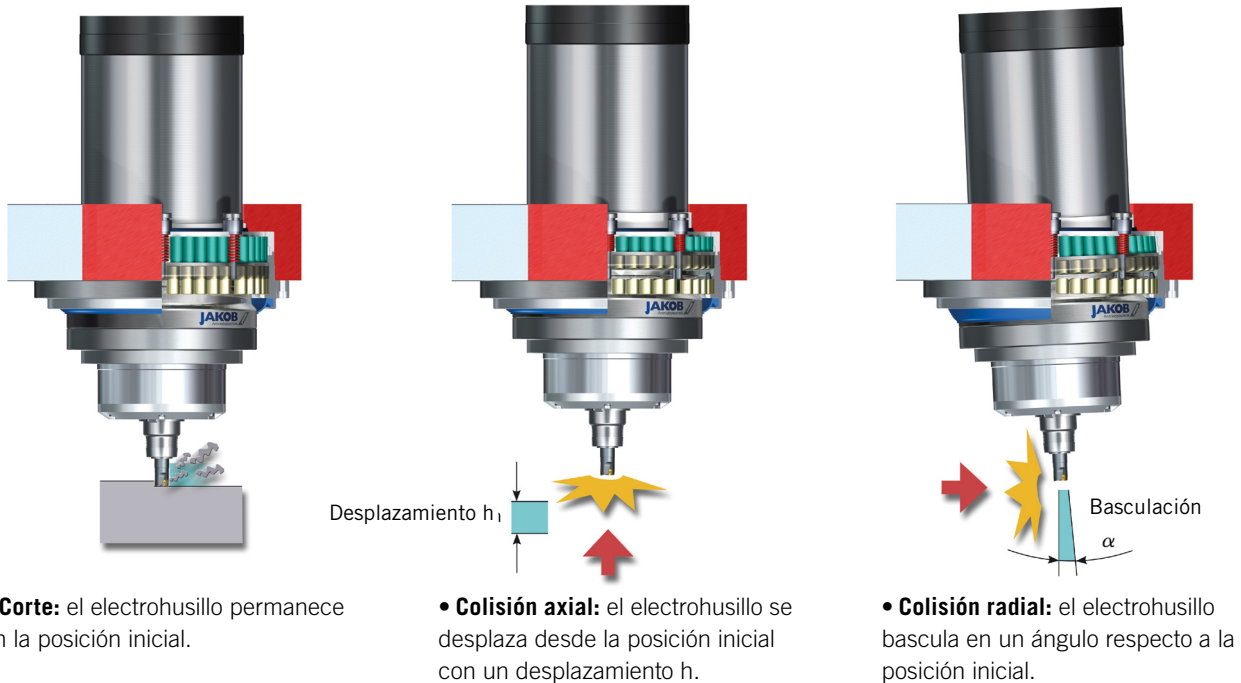


Colisión radial

# MS<sup>3</sup>. SISTEMA DE SEGURIDAD PARA ELECTROHUSILLOS DE MÁQUINA HERRAMIENTA

## FUNCIÓN DE PROTECCIÓN

- El sistema de seguridad ofrece una protección completa y evita daños en caso de colisiones tanto axiales como radiales a velocidades de avance elevadas.

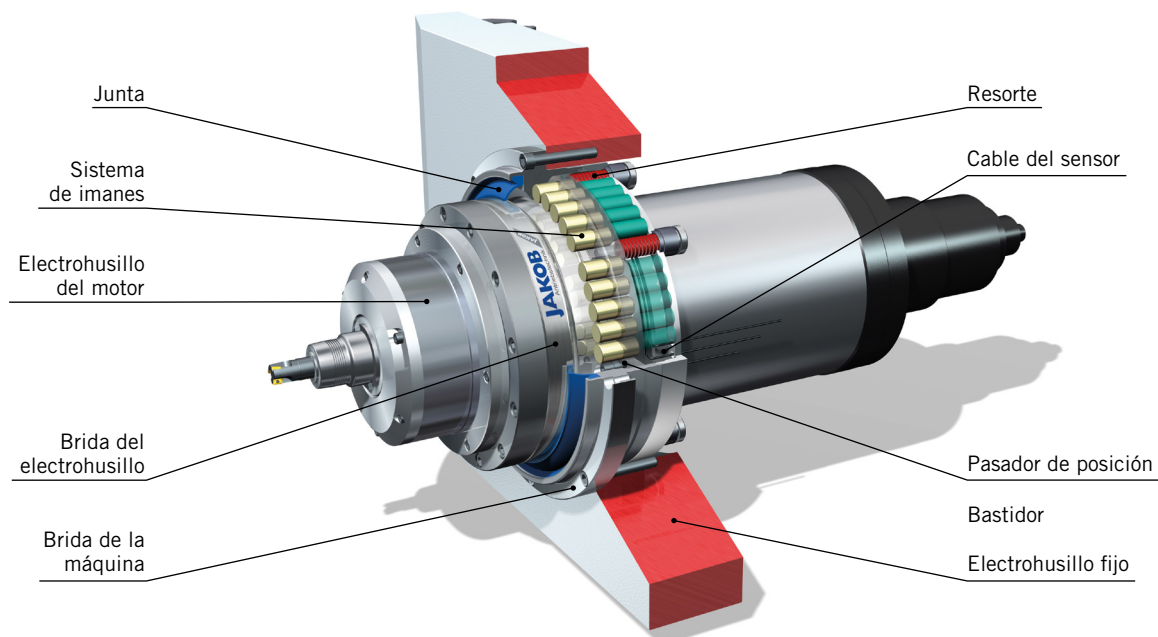


## DISEÑO DEL SISTEMA

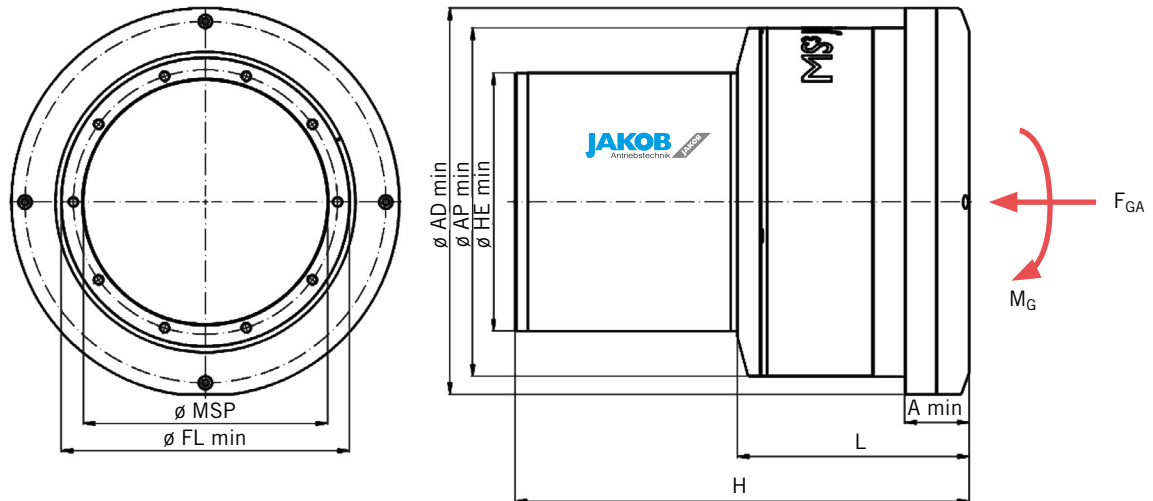
El MS<sup>3</sup> consta de dos componentes, uno montado en el motor y el otro en el electrohusillo. Unos imanes permanentes provocan fuerzas de adhesión elevadas y rigidez estática hasta alcanzar la fuerza de desplazamiento.

El sistema de división cónica garantiza una alta precisión en la unión. Un mecanismo de rearme habilitado por la fuerza de un

resorte precargado absorbe las fuerzas durante la colisión y devuelve el electrohusillo a su posición inicial. Una junta especial impide que la suciedad, el refrigerante y las virutas penetren en el interior. Tres sensores digitales monitorizan constantemente el estado del electrohusillo y generan una señal de estado para el control de la máquina.



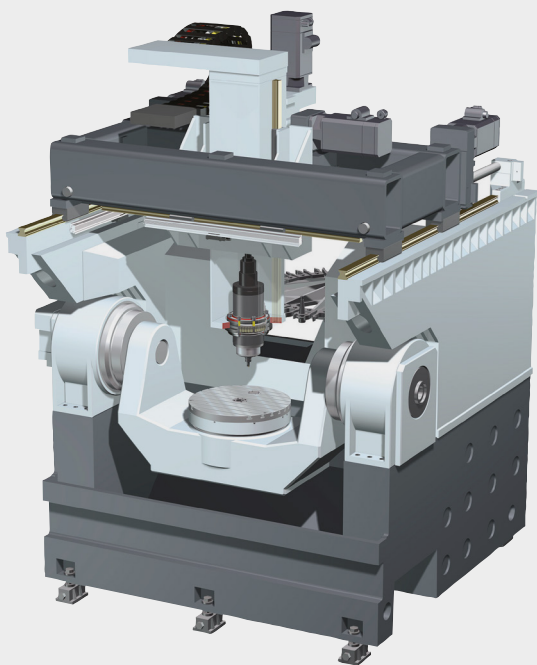
- Capacidades de procesamiento no limitadas por el MS<sup>3</sup>
- Protección siempre activa
- Protección garantizada del electrohusillo
- **X/Y/Z** hasta 12 m/min
- **C** hasta 3150°/min (8,75 rpm)
- **A** hasta 2250°/min (6,25 rpm)



Dimensiones	Interfaz DIN 68 893-1 A63					
Diámetro exterior del electrohusillo del motor	ø MSP (mm)	170	190	210	230	270
Diámetro del electrohusillo	ø AP (mm)	250	270	290	310	350
Diámetro exterior de la brida del MS <sup>3</sup>	ø AD (mm)	280	300	320	340	380
Longitud	A min (mm)	55	55	55	55	55
Desplazamiento axial	h (mm)	10 - 25				
Ángulo de giro	$\alpha$ (°)	4				
Fuerza axial	F <sub>GA</sub> (N)	10.000 - 30.000				
Fuerza de flexión	M <sub>GA</sub> (Nm)	2.000 - 5.000				
Peso total	m (kg)	20 - 35				

El MS<sup>3</sup> se ha diseñado para centros de maquinaria vertical y horizontal, donde hay que cambiar con frecuencia la pieza a mecanizar. El sistema de seguridad del electrohusillo es responsabilidad del fabricante de la maquinaria.

**Centro de mecanizado vertical**



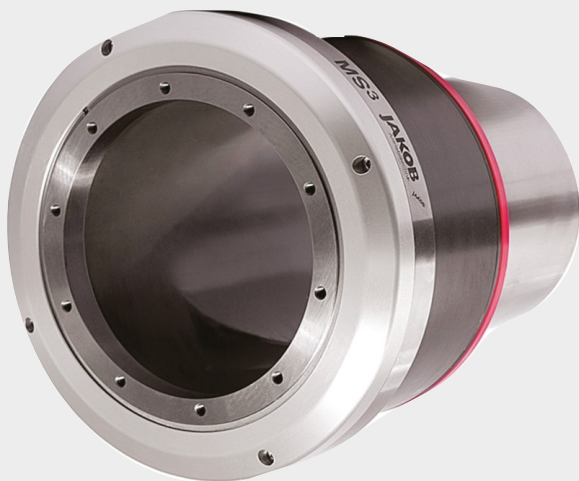
**Centro de mecanizado horizontal**



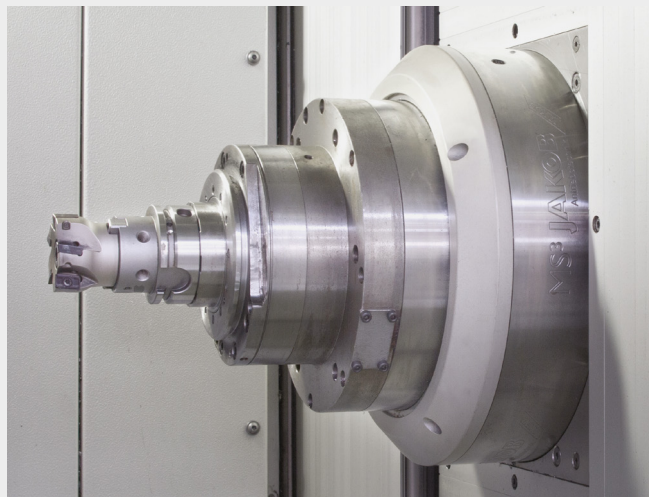
Existen dos alternativas para electrohusillos con interfaces HSK-63 y SK-40, la versión autónoma y la versión compacta integrada en el electrohusillo.

Varias pruebas realizadas durante el desarrollo del MS<sup>3</sup> han demostrado que las propiedades de rigidez y precisión de la máquina permanecen intactas después de la instalación.

**Versión autónoma**



**MS<sup>3</sup> integrado en la carcasa del electrohusillo**



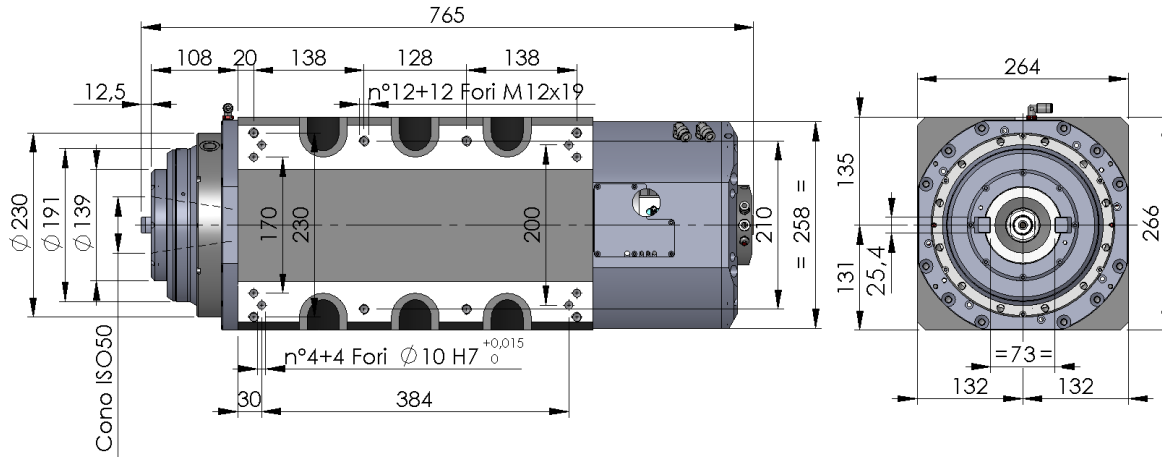
El MS<sup>3</sup> es un sistema de protección exclusivo y completamente garantizado para electrohusillos, que evita daños en colisiones en cualquier dirección.

Las colisiones suelen producirse durante la primera puesta en marcha de un nuevo programa CNC. El MS<sup>3</sup> ofrece la mejor protección para su máquina herramienta.

## VENTAJAS

- Protección de la geometría de la máquina herramienta
- Reducción de los periodos de inactividad
- Control de costes
- Reducción de los costes del seguro por averías en la máquina
- Disponibilidad de la máquina
- Sin costes adicionales por sustitución del electrohusillo
- Adaptable a todas las geometrías habituales de los electrohusillos
- Protección híbrida con señal de alarma y desplazamiento
- Prevención de daños por sobrecarga
- No requiere mantenimiento
- Además: 3 años de garantía de protección contra colisiones MS<sup>3</sup> (ampliables hasta ocho años).





Le caratteristiche e le dimensioni inserite nel presente catalogo sono indicative e suscettibili di variazioni – Verniciatura su richiesta. Features and overall dimensions are subject to change – Painting by request.

### Dati principali – Main Specification

Potenza	Power (min / max)	26 ÷ 41 kW
Coppia	Torque	233 – 273 Nm
Vel. massima	Max Speed	8.000 rpm
Cambio utensile	Tool attachment	ISO 50
Lubrificazione	Lubrication	Grease for life
Tipo di unità	Motor unit	Induction
Raffreddamento	Cooling	Liquid
Cambio utensile	Tool change	Pneumatic

### Caratteristiche – Features

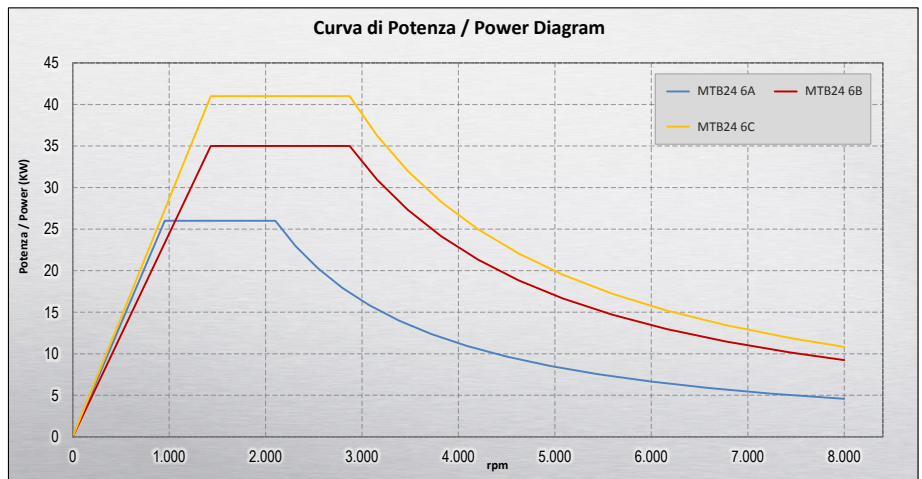
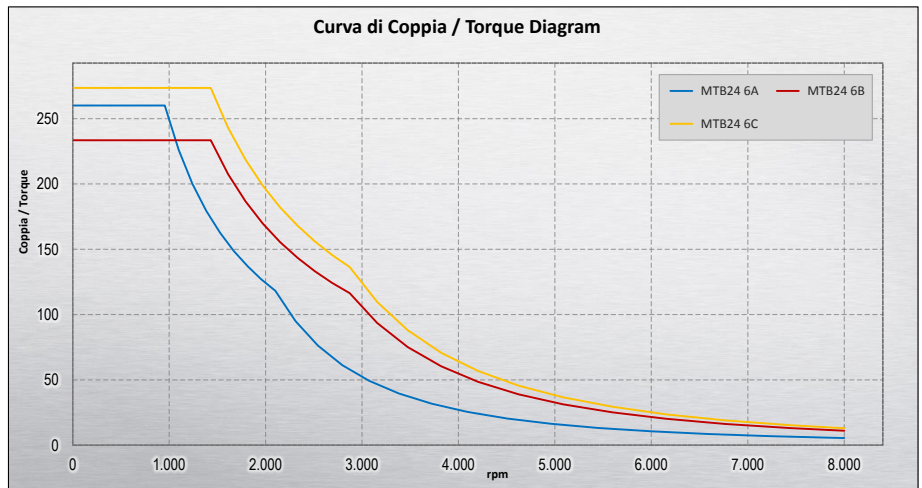
Albero mandrino forato in acciaio inox	Stainless steel spindle bored shaft
Sistema di isolamento per azionamento tramite inverter	Inverter duty insulation system
Giunto integrato per raffreddamento utensile	Rotating water joint for tools cooling
Retroazione encoder incrementale 1Vpp	Encoder feedback 1vpp

### Option

High resolution TTL incremental encoder (900ppr)
HSK tool attachment
Vibration sensor and collision detect system
Fixing lateral plate



### Curve di coppia e potenza – Torque and Power diagram



Ref.	Mandrino Spindle	kW	Cv	Coppia/Torque [Nm]	I [Amp @400V]	Rpm nom	F nom [Hz]	Rpm max	F max [Hz]	Poli Poles	Peso [Kg]
—	MTB24 6A	26	34	260	54	940	50	8.000	400	6	200
—	MTB24 6B	35	47.5	233	75	1.420	75	8.000	400	6	205
—	MTB24 6C	41	55.5	273	85	1.435	75	8.000	400	6	205

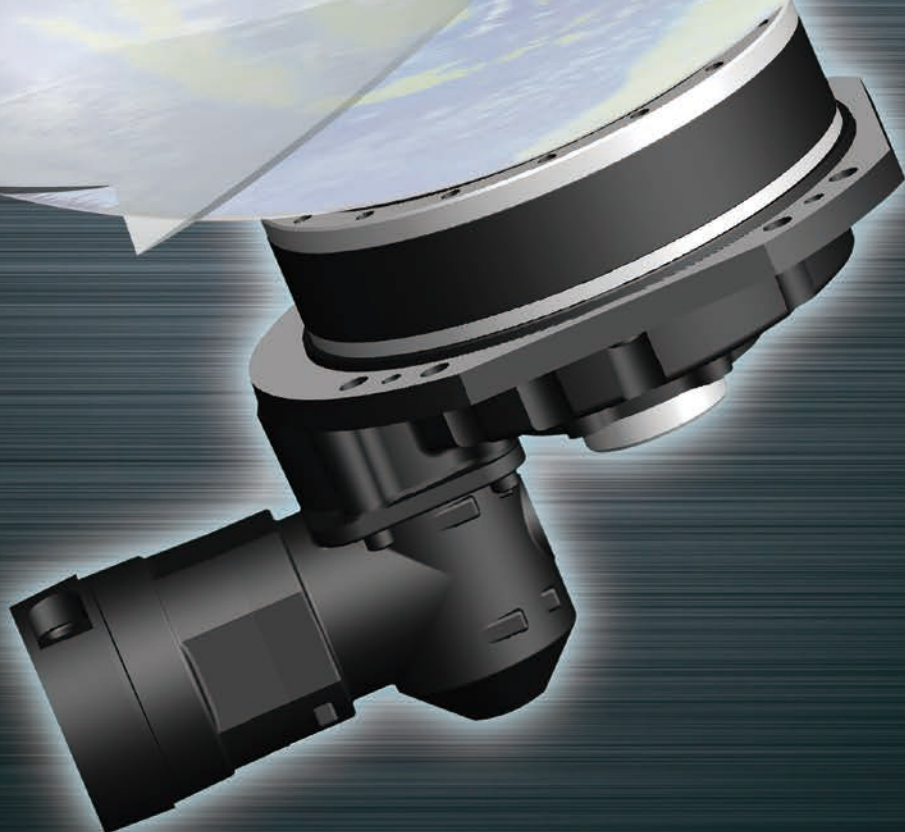
Valori ottenuti mediante simulazione numerica – Data obtained by numerical simulation  
Potenze e polarità diversa su richiesta – By request we can manufacture motors with different polarities and horse power

**RV**<sup>®</sup>

**Precision Reduction Gear RV<sup>™</sup>**  
**Precision Gearhead**

**RD2**

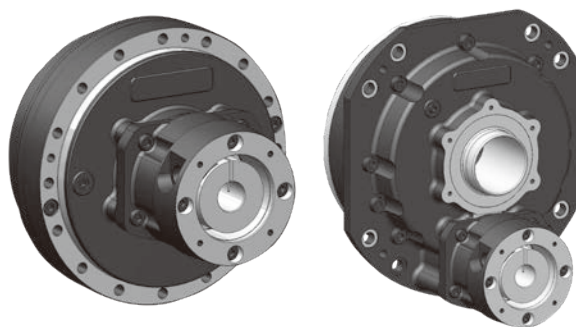
RD2 Series



**Nabtesco**<sup>®</sup>



## ***Straight Input Type***



# Hollow shaft series

Model Code	Ratio code (Reduction ratio value)	Reduction Gear													External Dimensions		
		T <sub>0</sub>	N <sub>0</sub>	K	T <sub>S1</sub>	T <sub>S2</sub>	N <sub>in</sub>	N <sub>s</sub>	N <sub>To</sub>	Backlash	Lost motion	Start-up Efficiency	M <sub>0</sub>	Wr			
		Rated Torque (Nm)	Rated Output Speed (rpm)	Life Rating (h)	Allowable Startup/Stop Torque (Nm)	Momentary maximum allowable torque (Nm)	Allowable Input Speed (Note 2) (rpm)	Allowable Output Speed (Note 2) (rpm)	Reference value to output speed during continuous operation at rated torque (rpm)				Allowable moment (Note 3) (Nm)	Allowable radial load (Note 8) (N)			
RDS-010C	081 (81)	98	15	6,000	245	490	3,500	43	43	1.0	1.0	65	686	5,755	Input Unit Code : G0 ———P.28 Input Unit Code : G1 ———P.29		
	108 (108)															32	32
	153 (153)															23	23
	189 (189)															19	19
	243 (243)															14	14
RDS-027C	100 (99.82)	265	15	6,000	662	1,323	3,500	35	35	1.0	1.0	70	980	6,533	Input Unit Code : G0 ———P.30 Input Unit Code : G1 ———P.31		
	142 (141.68)															25	25
	184 (184)															19	19
	233 (233.45)															15	15
RDS-050C	109 (109)	490	15	6,000	1,225	2,450	3,000	28	28	1.0	1.0	70	1,764	9,418	Input Unit Code : G2 ———P.32 Input Unit Code : G3 ———P.33		
	153 (152.6)															20	20
	196 (196.2)															15	15
	240 (239.8)															13	13
RDS-100C	101 (100.5)	980	15	6,000	2,450	4,900	3,000	30	20	1.0	1.0	80	2,450	11,802	Input Unit Code : G2 ———P.34 Input Unit Code : G3 ———P.35		
	150 (150)															20	17
	210 (210)															14	14
	258 (258)															12	12
RDS-200C	106 (105.83)	1,960	15	6,000	4,900	9,800	2,000	19	16	1.0	1.0	80	8,820	31,455	Input Unit Code : G4 ———P.36 Input Unit Code : G5 ———P.37		
	156 (155.96)															13	12
	206 (206.09)															10	10
	245 (245.08)															8	8
RDS-320C	115 (115)	3,136	15	6,000	7,840	15,680	2,000	17	17	1.0	1.0	80	20,580	57,103	Input Unit Code : G4 ———P.38 Input Unit Code : G5 ———P.39		
	157 (157)															13	13
	207 (207)															10	10
	253 (253)															8	8

**Notes:**

1. The rating table shows the specification values including the entry fields for reduction gear values.
2. The allowable speed may be limited by heat depending on the operating rate. Make sure the surface temperature of the reduction gear does not exceed 60°C during use.
3. The allowable moment will differ depending on the thrust load. Check the allowable moment diagram (p.131).
4. For the moment of inertia of the reduction gears, refer to the external dimension drawings for the reduction gear.
5. For the moment rigidity and torsional rigidity, refer to the calculation of tilt angle and the torsion angle (p.137).
6. The rated torque is the value that produces the rated service life based on operation at the rated output speed; it does not indicate the maximum load. Refer to the "Glossary" (p.121) and the "Product selection flowchart" (p.122).
7. The specifications above are based on Nabtesco evaluation methods; this product should only be used after confirming that it is appropriate for the operating conditions of your system.
8. When the radial load is applied within dimension b (see page 137), use the reduction gear within the allowable radial load.

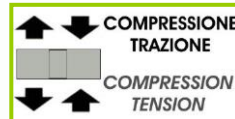
Straight input type  
 Right angle input type  
 Pulley input type  
 Motor flange / bushing  
 Option: Base flange  
 Technical Information

Accessori Accessories

A



**WIMOD**  
Trasmissione **WIRELESS**  
*WIRELESS transmission*



**ACCREDIA** CERTIFICATO DI TARATURA ACCREDIA  
**A RICHIESTA**  
LAT N° 093  
**Calibration Centre** ACCREDIA Calibration Certificate  
The products are NOT covered by accreditation **ON REQUEST**

**FACILE APPLICAZIONE**  
*EASY APPLICATION*

**BASSO PROFILO** / *LOW PROFILE*

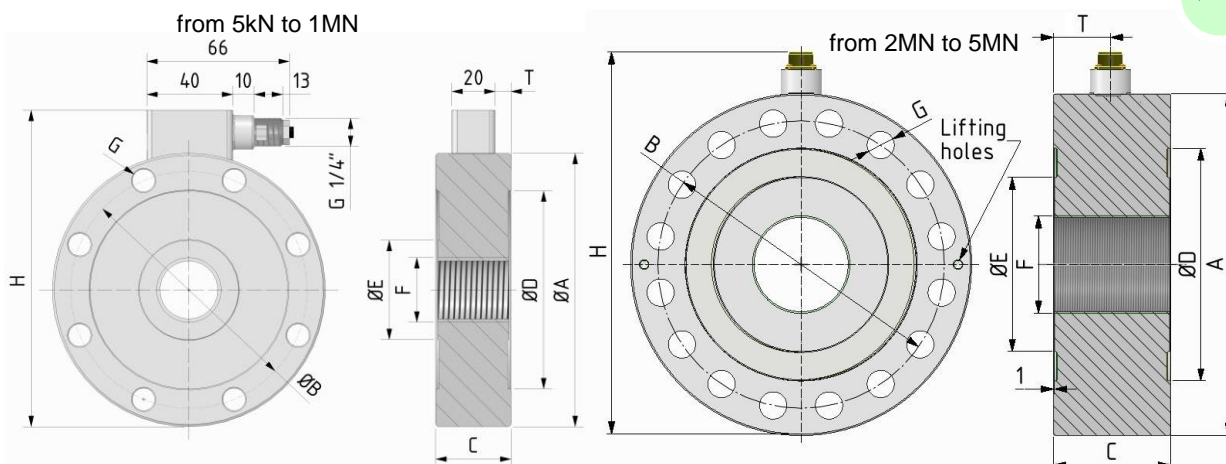
**15** Stabilità a lungo termine / *Long term high stability*

**Interamente saldata al LASER** / *Completely LASER welded*

**SOLLECITAZIONI DINAMICHE** / *DYNAMIC STRESSES*

Dimensioni Dimensions

[mm]



CODE	LOAD	CODE	LOAD	ØA	B	C	ØD	ØE	F	G	n°G	H	T	KHz <sup>(2)</sup>
CTC4100250K5	250 kg	CTC41002KN5I15	2,5 kN	100	86	35	72	32	M20×1.5	9	6	121	7.5	2.5
CTC4100500K5	500 kg	CTC41005KNI15	5 kN											2.5
CTC41001T5	1 t	CTC410010KNI15	10 kN											2.5
CTC41002T55	2.5t	CTC410025KNI15	25 kN											4.8
CTC41005T5	5 t <sup>(3)</sup>	CTC410050KNI15	50 kN <sup>(3)</sup>											8.6
CTC41275T5	5 t	CTC412750KNI15	50 kN	127	110	35	92	47	M30×2	10.5	8	149	7.5	3.8
CTC412710T5	10 t	CTC4127100KNI15	100 kN											5.8
CTC416520T5	20 t	CTC4165200KNI15	200 kN											5.7
CTC416530T5	30 t	CTC4165300KNI15	300 kN	165	138	50	108	62	M42×3	17	12	188	15	7.3
CTC416550T5	50 t	CTC4165500KNI15	500 kN			60							20	9.8
CTC423075T5	75 t	CTC4230750KNI15	750 kN	230	185	80	145	98	M60×3	25	12	254	30	3.2
CTC4230100T5	100 t	CTC42301MNI15	1 MN											
<sup>(1)</sup> CTC4300200T5	200 t	<sup>(1)</sup> CTC43002MNI15	2 MN	300	250	100	198	132	M100×3	25	16	339	50	2.7
<sup>(1)</sup> CTC4350300T5	300 t <sup>(4)</sup>	<sup>(1)</sup> CTC43503MNI15	3 MN <sup>(4)</sup>											120
<sup>(1)</sup> CTC4350500T5	500 t <sup>(4)</sup>	<sup>(1)</sup> CTC43505MNI15	5 MN <sup>(4)</sup>	350	294	130	238	178	M100×3	28	16	389	65	2.8

<sup>(1)</sup> La taratura ACCREDIA in **TRAZIONE** NON può essere eseguita dal Centro LAT N° 093, a richiesta può essere commissionata ad altri centri accreditati.  
ACCREDIA certification in **TENSION** can NOT be performed by LAT n° 93 Laboratory, on request it can be ordered to other accredited laboratories.


<sup>(2)</sup> Frequenza naturale / Natural frequency

**Dati Tecnici**
**Technical Data**


Classe di precisione: <b>ISO 376</b>		Accuracy class: <b>ISO 376</b>		<b>1</b>						
CARICO NOMINALE	NOMINAL LOAD	2.5 - 5 kN 10 - 25 kN 50 <sup>(3)</sup> kN	50 kN 100 kN	200 kN 300 kN	500 kN	750kN 1 MN	2 MN	3 MN <sup>(4)</sup> 5 MN <sup>(4)</sup>		
ERRORI RELATIVI (al valore letto) a) ripetibilità 0°-120°-240° (b) b) interpolazione (fc) c) reversibilità (u) d) zero (fo)	RELATIVE ERRORS (at reading) a) repeatability 0°-120°-240° (b) b) interpolation (fc) c) reversibility (u) d) zero (fo)	$\leq \pm 0.145 \%^{(5)}$ $\leq \pm 0.090 \%^{(5)}$ $\leq \pm 0.240 \%^{(5)}$ $\leq \pm 0.030 \% \text{ F.S.}$								
LINEARITA' ISTERESI	LINEARITY HYSTERESIS	$\leq \pm 0.05 \% \text{ F.S.}$					$\leq \pm 0.10 \% \text{ F.S.}$			
EFFETTO DELLA TEMPERATURA (10°C) a) sullo zero b) sulla sensibilità EFFETTO CARICO TRASVERSALE: a) al 10% del carico nominale	TEMPERATURE EFFECT (10°C) a) on zero b) on sensitivity EFFECT OF TRANSVERSE LOAD: a) at 10% of nominal load	$\leq \pm 0.028 \% \text{ F.S.}$							$\leq \pm 0.024 \% \text{ F.S.}$	
SENSIBILITA' NOMINALE TOLLERANZA DI CALIBRAZIONE	NOMINAL SENSITIVITY SENSIVITY TOLERANCE	2 mV/V <sup>(6)</sup>							$\leq \pm 0.1 \% \text{ F.S.}$	
CARICO NOMINALE RESISTENZA DI INGRESSO RESISTENZA DI USCITA	NOMINAL LOAD INPUT RESISTANCE OUTPUT RESISTANCE	2.5 - 5 - 10 - 25 - 50 - 100 - 200 - 300 - 500 kN								
CARICO NOMINALE RESISTENZA DI INGRESSO RESISTENZA DI USCITA	NOMINAL LOAD INPUT RESISTANCE OUTPUT RESISTANCE	800 ± 20 Ω 705 ± 2 Ω								
CARICO NOMINALE RESISTENZA DI INGRESSO RESISTENZA DI USCITA	NOMINAL LOAD INPUT RESISTANCE OUTPUT RESISTANCE	750 - 1000 - 2000 - 3000 - 5000 kN 430 ± 20 Ω 352 ± 2 Ω								
RESISTENZA DI ISOLAMENTO BILANCIAMENTO DI ZERO ALIMENTAZIONE DI RIFERIMENTO ALIMENTAZIONE NOMINALE ALIMENTAZIONE MAX.	INSULATION RESISTANCE ZERO BALANCE RECOMENDED SUPPLY VOLTAGE NOMINAL SUPPLY VOLTAGE RANGE MAXIMUM SUPPLY VOLTAGE	> 5 GΩ $\leq \pm 1 \% \text{ F.S.}$ 10 V 1-15 V 18 V								
VALORI MECCANICI LIMITE RIFERITI AL CARICO NOMINALE: a) carico di servizio b) carico limite c) carico di rottura d) massimo carico trasversale e) carico dinamico limite	MECHANICAL LIMIT VALUES REFERRED TO NOMINAL LOAD: a) service load b) max permissible load c) breaking load d) max transverse load e) max permissible dynamic load	120 % 150 % > 300 % 100 % 75 % <sup>(7)</sup>								
Freccia max. al carico nominale (mm)	Displacement at nominal load (mm)	~0.06	~0.09	~0.17	~0.17	~0.23	~0.21	~0.21		
TEMPERATURA DI RIFERIMENTO CAMPO NOMINALE DI TEMPERATURA TEMPERATURA DI ESERCIZIO TEMPERATURA DI STOCCAGGIO	REFERENCE TEMPERATURE TEMPERATURE NOMINAL RANGE SERVICE TEMPERATURE STORAGE TEMPERATURE	+23 °C -10 / +40 °C -10 / +70 °C -20 / +80 °C								
PESO (kg)	WEIGHT (kg)	~1.6	~2.5	~5.8	~6.8	~16.5	~35	~63		
CLASSE DI PROTEZIONE (EN 60529) MATERIALE DINAMOMETRO LUNGHEZZA CAVO	PROTECTION CLASS (EN 60529) EXECUTION MATERIAL CABLE LENGTH	IP67 Acciaio Inox / Stainless Steel 5 m (on request 10 m)								
VITI DI FISSAGGIO: a) diametro b) classe di resistenza c) coppia di serraggio (Nm)	FIXING SCREWS: a) diameter b) resistance class c) tightening torque (Nm)	M8 12.9 40	M10 12.9 70	M16 12.9 368	M16 12.9 368	M24 12.9 460	M24 12.9 460	M27 12.9 1500		

(3)  Il trasduttore di forza da **50 kN Ø100** viene garantito in **TRAZIONE** fino a **25 kN**.

*The force transducer 50 kN Ø100 is guaranteed in TENSION up to 25 kN.*

(4)  I trasduttori di forza da **3 MN** e **5 MN** sono garantiti in **TRAZIONE** fino a **2,5 MN**.

*The force transducers 3 MN and 5 MN are guaranteed in TENSION up to 2,5 MN.*

(5) Errori percentuali calcolati al valore letto, min. 1/10 del carico nominale.

*Percentage errors referred to reading, min. 1/10 of nominal load.*

(6) Test e calibrazioni eseguite in **COMPRESSIONE** con il trasduttore montato al supporto e viti di fissaggio correttamente serrate.

*Tests and calibrations performed in COMPRESSION with the transducer mounted on a bearing support with correctly tightened clamping screws.*

(7) Il carico dinamico deve essere applicato al filetto centrale del trasduttore e non sulla corona esterna di fissaggio.

*The dynamic load must be applied to the transducer central thread and not to the external fixing rim.*

A richiesta calibrazioni in kg.

*kg calibration on request.*

A richiesta classificazioni secondo **ASTM E74**.

*Classifications according ASTM E74 on request.*

## Applicazioni Applications

COMPRESIONE COMPRESSION	TRAZIONE TENSION
<b>ATTENZIONE:</b> Verificare che le viti di fissaggio e gli accessori siano correttamente serrati.	<b>WARNING:</b> Check that the fixing screws and the accessories are correctly tightened.
Materiale accessori: da 2.5 a 200 kN da 300 kN a 5 MN	Accessories execution material: from 2.5 to 200 kN from 300 kN to 5 MN
Acciaio inox $R_m \geq 90 \text{ kg/mm}^2$ $R_m \geq 130 \text{ kg/mm}^2$	Stainless Steel $R_m \geq 90 \text{ kg/mm}^2$ $R_m \geq 130 \text{ kg/mm}^2$

### Dimensioni Dimensions

[mm]



TC4:	A	B	C	D	E	F	G	H	L	M
2.5, 5, 10, 25, 50 kN	108	37	35	36	∅ 57	∅ 100	∅ 70	M 20 × 1.5	∅ 32	~ 170
50, 100 kN	108	37	35	36	∅ 76	∅ 127	∅ 100	M 30 × 2	∅ 47	~ 200
200 kN	169	60	50	59	∅ 76	∅ 165	∅ 100	M 42 × 3	∅ 62	~ 224
300 kN	169	60	50	59	∅ 76	∅ 165	∅ 100	M 42 × 3	∅ 62	~ 465
500 kN	179	60	60	59	∅ 76	∅ 165	∅ 100	M 42 × 3	∅ 62	~ 513
750 kN, 1 MN	252	85	80	87	∅ 126	∅ 230	∅ 180	M 60 × 3	∅ 98	/
2 MN	309	85	100	124	∅ 129	∅ 300	∅ 250	M100 × 3	∅132	/
3 MN	384	120	120	144	∅ 168	∅ 350	∅ 330	M100 × 3	∅ 178	/
5 MN	394	120	130	144	∅ 168	∅ 350	∅ 330	M100 × 3	∅ 178	/






TC4:	CODE	ACCESSORIES (optional):	ACCESSORI (opzionali):
2.5, 5, 10 kN 25, 50 kN	CTIC22	① Loading head.	Testa di carico.
	CTC425M20	② Spherical loading head M20×1.5.	Testa di carico sferica M20×1.5
	CPBTC4D100	③ Mounting plate ∅100 mm.	Piastra base ∅ 100 mm.
	CACCEM20	④ Knuckle joints.	Teste a snodo sferico.
50, 100 kN	CTIC28	① Loading head.	Testa di carico.
	CTC445M30	② Spherical loading head M30×2.	Testa di carico sferica M30×2.
	CPBTC4D127	③ Mounting plate ∅127 mm.	Piastra base ∅ 127 mm.
	CACCEM30	④ Knuckle joints.	Teste a snodo sferico.
200, 300, 500 kN	CTIC35	① Loading head.	Testa di carico.
	CTS62M42TC4	② Spherical loading head M42×3 (200-300kN)	Testa di carico sferica M42×3 (200-300kN)
	CTS62M42TC450T	② Spherical loading head M42×3 (500kN)	Testa di carico sferica M42×3 (500kN)
	CPBTC4D165	③ Mounting plate ∅165 mm.	Piastra base ∅ 165 mm.
	CACCEM42	④ Knuckle joints. (max 200kN)	Teste a snodo sferico. (max 200kN)
	CACCEM4230T	④ Knuckle joints. (max 300kN)	Teste a snodo sferico. (max 300kN)
750 kN, 1 MN	CACCEM4250T	④ Knuckle joints. (max 500kN)	Teste a snodo sferico. (max 500kN)
	CTIC60	① Loading head.	Testa di carico.
	CTS96M60	② Spherical loading head M60×3.	Testa di carico sferica M60×3.
2 MN	CPBTC4D230	③ Mounting plate ∅230 mm.	Piastra base ∅ 230 mm.
	CTIC106	① Loading head.	Testa di carico.
	TS160M100	② Spherical loading head M100×3 (2MN)	Testa di carico sferica M100×3 (2MN)
3 MN, 5 MN	CPBTC4D300	③ Mounting plate ∅300 mm.	Piastra base ∅ 300 mm.
	CTIC140	① Loading head.	Testa di carico.
	CTS170M100	② Spherical loading head M100×3.	Testa di carico sferica M100×3.
	CPBTC4D350	③ Mounting plate ∅350 mm.	Piastra base ∅ 350 mm.

## OPZIONI

Da acquistare separatamente

## OPTIONS

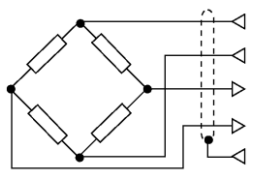
To be purchased separately

	CODE	<sup>(8)</sup> OPZIONE	<sup>(8)</sup> OPTION
	<b>CMIL6MF</b>	Uscita diretta connettore <b>MIL6M</b>	<i>Direct output connector MIL6M</i>
	<b>CMIL6FV5</b>	CONNETTORE <b>MIL6M</b> femmina 6 poli dritto completo di <b>CAVO</b> PVC schermato lunghezza 5 m.	<i>Female 6 poles straight MIL6M CONNECTOR complete PVC CABLE, shielded, length 5 m.</i>
	CODE	<sup>(9)</sup> OPZIONE	<sup>(9)</sup> OPTION
	<b>CONNM12MF</b>	Uscita diretta connettore <b>M12</b>	<i>Direct output connector M12</i>
	<b>CONNM12FV5</b>	CONNETTORE <b>M12x1</b> femmina 5 poli dritto completo di <b>CAVO</b> PVC costampato schermato lunghezza 3 m.	<i>Female 5 poles straight M12x1 CONNECTOR complete PVC molded CABLE, shielded, length 3 m.</i>
	CODE	OPZIONE (2, 3 e 5 MN)	OPTION (2, 3 and 5 MN)
	<b>CMIL7FV5</b>	CONNETTORE <b>MIL7M</b> femmina 7 poli dritto completo di <b>CAVO</b> PVC schermato, 6 fili, lunghezza 5 m.	<i>Female 7 poles straight MIL7M CONNECTOR complete PVC CABLE, shielded, 6 wires, length 5 m.</i>

### Collegamenti Elettrici per trasduttori da 2.5 kN a 1MN

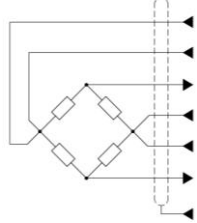
*Electrical connection for transducers from 2.5 kN to 1 MN*

**USCITA STANDARD:** cavo schermato PVC 105°C,  $\varnothing$  5.2 mm a 4x  $\varnothing$  0.35mm<sup>2</sup> conduttori stagnati. Schermo collegato al corpo del trasduttore.  
**STANDARD OUTPUT:** PVC 105°C shielded cable,  $\varnothing$  5.2mm with 4x  $\varnothing$  0.35mm<sup>2</sup> tinned conductors. Shield connected to the body of the transducer.

Transducer	OUTPUT	CABLE	CAVO	MIL6M <sup>(8)</sup> (optional)	M12 <sup>(9)</sup> (optional)
	EXCITATION +	Red	Rosso	A	1
	EXCITATION -	Black	Nero	B	3
	OUTPUT +	White	Bianco	D	2
	OUTPUT -	Yellow	Giallo	C	4
	-----	Shield	Schermo	F	5

### Collegamenti Elettrici per trasduttori da 2 MN a 5 MN

*Electrical connection for transducers from 2 MN to 5 MN*

Transducer	OUTPUT	MIL7M	CABLE	CAVO
	EXCITATION +	C	Red	Rosso
	SENSE +	F	Orange	Arancione
	OUTPUT +	A	White	Bianco
	EXCITATION -	B	Black	Nero
	SENSE -	G	Blue	Blu
	OUTPUT -	D	Yellow	Giallo
-----	-----	E	Shield	Schermo

**AEP** transducers



Dasa-Rägister  
EN ISO 9001:2015  
IQ-1100-01



LAT N° 093  
Calibration Centre  
The products are NOT  
covered by accreditation



Production Quality  
Assurance Certified n°  
TÜV CY 17 ATEX 0205891 Q

41126 Cognento (MODENA) Italy Via Bottego 33/A Tel: +39-(0)59-346441 Fax: +39-(0)59-346437 E-mail: aep@aep.it

Al fine di migliorare le prestazioni tecniche del prodotto, la società si riserva di apportare variazioni senza preavviso.  
*In order to improve the technical performances of the product, the company reserves the right to make any change without notice.*

# PRODUCTS CENTER



[Home](#) > [N Series Servo Motor](#)

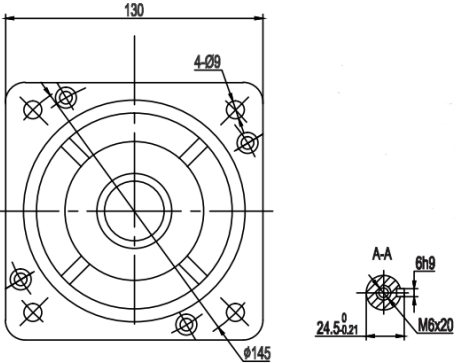
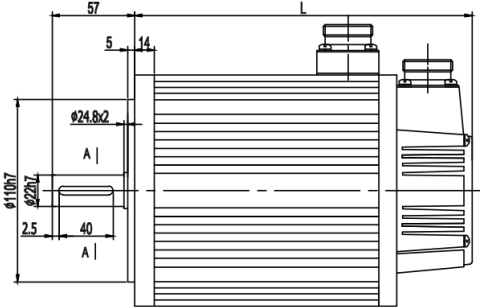
[130N Detail image](#)

[130N Outline](#)



Technical Parameters :

◎ 外形图 / DIMENSION:UNIT=mm



## ◎ 技术参数 / SPECIFICATIONS

电机型号 MOTOR MODEL	简易命名	130ST-M04025	130ST-M05025	130ST-M06025	130ST-M07725	130ST-M10010
	标准命名	MN130-040EFDI2-01B000	MN130-050EFDI2-01B000	MN130-060EFDI2-01B000	MN130-077EFDI2-01B000	MN130-100BFDI2-01B000
额定功率 RATED POWER(KW)		1.0	1.3	1.5	2.0	1.0
额定线电压 RATED VOLTAGE(V)		220	220	220	220	220
额定线电流 RATED CURRENT(A)		4.0	5.0	6.0	7.5	4.5
额定转速 RATED SPEED(RPM)		2500	2500	2500	2500	1000
额定力矩 RATED TORQUE(N.m)		4	5	6	7.7	10
峰值力矩 PEAK TORQUE(N.m)		12	15	18	22	20
反电势 VOLTAGE CONSTANT(V/1000r/min)		72	68	65	68	140
力矩系数 TORQUE COEFFICIENT(N.m/A)		1.0	1.0	1.0	1.03	2.2
转子惯量 ROTOR INERTIA(KG.M <sup>2</sup> )		0.85x10 <sup>-3</sup>	1.06x10 <sup>-3</sup>	1.26x10 <sup>-3</sup>	1.53x10 <sup>-3</sup>	1.94x10 <sup>-3</sup>
绕组(线间)电阻 LINE-LINE RESISTANCE(Ω)		2.76	1.84	1.21	1.01	2.7
绕组(线间)电感 LINE-LINE INDUCTANCE(mH)		6.42	4.9	3.87	2.94	8.8
电气时间常数 ELECTRICAL TIME-CONSTANT(ms)		2.32	2.66	3.26	2.91	3.26
重量 WEIGHT(KG)		6.2	6.6	7.4	8.3	10.2
编码器线数 ENCODER LINE NUMBER(PPR)				2500		

电机绝缘等级 INSULATION CLASS	ClassF															
防护等级 SAFETY CLASS	IP65															
使用环境 ENVIRONMENT	环境温度: -20℃ ~ +40℃ 环境湿度: 相对湿度<90% (不结露条件) TEMPERATURE:-20℃~+40℃ HUMIDITY BELOW 90%RH NO DEWING															
电机绕组插座 MOTOR WINDING PLUE	绕组引线	U			V			W			PE					
	插座编号	2			3			4			1					
光电脉冲编码器插座(15芯) PHOTOELECTRIC ENCODER SOCKET(15PIN)	信号引线	5V	0V	A+	B+	Z+	A-	B-	Z-	U+	V+	W+	U-	V-	W-	PE
	插座编号	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1
绝对值编码器插座(7芯) ABSOLUTE ENCODER SOCKET(7PIN)	信号引线	E-		E+		SD-		0V		SD+		+5V		PE		
	插座编号	2		3		4		5		6		7		1		

◎ 技术参数 / SPECIFICATIONS

电机型号 MOTOR MODEL	简易命名	130ST-M10015	130ST-M10025	130ST-M15015	130ST-M15025
	标准命名	MN130-100CFDI2 -01B000	MN130-100EFDI2 -01B000	MN130-150CFDI2 -01B000	MN130-150EFDI2 -01B000
额定功率 RATED POWER(KW)		1.5	2.6	2.3	3.8
额定线电压 RATED VOLTAGE(V)		220	220	220	220
额定线电流 RATED CURRENT(A)		6.0	10	9.5	13.5
额定转速 RATED SPEED(RPM)		1500	2500	1500	2500
额定力矩 RATED TORQUE(N.m)		10	10	15	15
峰值力矩 PEAK TORQUE(N.m)		25	25	30	30
反电势 VOLTAGE CONSTANT(V/1000r/min)		103	70	114	67
力矩系数 TORQUE COEFFICIENT(N.m/A)		1.67	1.0	1.58	1.11
转子惯量 ROTOR INERTIA(KG.M <sup>2</sup> )		1.94x10 <sup>-3</sup>	1.94x10 <sup>-3</sup>	2.77x10 <sup>-3</sup>	2.77x10 <sup>-3</sup>
绕组（线间）电阻 LINE-LINE RESISTANCE ( Ω )		1.5	0.73	1.1	0.49
绕组（线间）电感 LINE-LINE INDUCTANCE ( mH )		4.37	2.45	4.45	1.68
电气时间常数 ELECTRICAL TIME-CONSTANT ( ms )		2.91	3.36	4.05	3.43
重量 WEIGHT ( KG )		10.2	9.8	12.6	11.7
编码器线数 ENCODER LINE NUMBER(PPR)		2500			

电机绝缘等级 INSULATION CLASS	ClassF															
防护等级 SAFETY CLASS	IP65															
使用环境 ENVIRONMENT	环境温度: -20℃ ~ +40℃ 环境湿度: 相对湿度<90% (不结霜条件) TEMPERATURE:-20℃~+40℃ HUMIDITY BELOW 90%RH NO DEWING															
电机绕组插座 MOTOR WINDING PLUG	绕组引线	U			V			W			PE					
	插座编号	2			3			4			1					
光电脉冲编码器插座(15芯) PHOTOELECTRIC ENCODER SOCKET(15PIN)	信号引线	5V	0V	A+	B+	Z+	A-	B-	Z-	U+	V+	W+	U-	V-	W-	PE
	插座编号	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1
绝对值编码器插座(7芯) ABSOLUTE ENCODER SOCKET(7PIN)	信号引线	E-		E+		SD-		0V		SD+		+5V		PE		
	插座编号	2		3		4		5		6		7		1		

130N系列伺服电机									
额定转矩 RATED TORQUE(N.M)	4	5	6	7.7	10			15	
					1000rpm	1500rpm	2500rpm	1500rpm	2500rpm
L不带抱闸	166	171	179	192	213	209	241	231	
L带永磁抱闸	236	241	249	262	283	279	311	301	
L带电磁抱闸	223	228	236	249	294	290	322	312	

[Home](#)

[About MIGE](#)

- [Company Profile](#)
- [Director's Message](#)
- [Leadership Care](#)
- [Company Culture](#)
- [Honor](#)

[Products](#)

- [Servo Motor](#)
- [Stepper Motor](#)
- [Spindle Motor](#)
- [New Energy Motor](#)
- [Typical Customers](#)
- [Application Field](#)
- [Marketing Network](#)

[Technological](#)

- [Seiko Manufacturing](#)
- [Quality Control](#)
- [technology R & D](#)

[News Center](#)

- [Mige News](#)
- [Industry News](#)

[Human Resources](#)

- [Manpower strategy](#)
- [Recruitment](#)

[Service Download](#)

- [Download](#)
- [Video Center](#)

[Contact Us](#)