



Projeto de melhoria de uma guilhotina hidráulica nos processos de fabrico e de montagem

PEDRO FILIPE DA SILVA COSTA

novembro de 2022

PROJETO DE MELHORIA DE UMA GUILHOTINA HIDRÁULICA NOS PROCESSOS DE FABRICO E DE MONTAGEM

Pedro Filipe da Silva Costa

1031003

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica

PROJETO DE MELHORIA DE UMA GUILHOTINA HIDRÁULICA NOS PROCESSOS DE FABRICO E DE MONTAGEM

Pedro Filipe da Silva Costa

1031003

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica – Ramo Construções Mecânicas, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Doutor António José Caetano Baptista e do Engenheiro Miguel Maria Magalhães Casimiro da Costa.

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor António Gonçalves Magalhães

Professor Coordenador, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Doutor António José Caetano Baptista

Gestor de Projetos, INEGI

Miguel Maria Magalhães Casimiro da Costa

Engenheiro Mecânico Projetista, SKITSO

Arguente

Doutor Daniel Filipe Coutinho Peixoto

Engenheiro de Desenvolvimento, Allied Motion

AGRADECIMENTOS

O principal agradecimento a quem devo o desenvolvimento direto da minha dissertação é à Adira, empresa que me acolhe nos últimos 4 anos como desenhador/projetista. Não esquecendo, um agradecimento especial ao Eng.º Jorge Almeida, diretor do departamento de engenharia, que me proporcionou todas as condições para o sucesso da realização do projeto desenvolvido.

Ao Eng.º Miguel Costa, mestre em engenharia mecânica pela FEUP, subcontratado pela Adira para auxílio no desenvolvimento deste projeto, o meu sincero agradecimento pela paciência e perseverança, pela passagem enorme de conhecimento, tanto a nível deste projeto como outras vertentes, o meu enorme obrigado!

Não poderia também deixar de agradecer ao meu orientador prof. Raul Campilho que deu um enorme contributo no desenvolvimento deste relatório e esteve sempre disponível para me ajudar e corrigir!

Aos meus pais, mulher e filho, só posso agradecer o sacrifício que fizeram, o apoio incondicional e, sobretudo, a muita paciência que tiveram comigo em situações menos boas. Muito obrigado, do fundo do meu coração, e dizer que vos amo mais que tudo e que sem vocês nada disto seria possível!

Aos meus amigos mais chegados, António Rocha, João Macedo e Miguel Viana, parceiros de uma vida, obrigado pelo apoio!

Um agradecimento muito especial, vai para os meus dois avôs, Fernando da Silva e Manuel Costa, que infelizmente já não podem fazer parte desta minha conquista, mas que nunca duvidaram das minhas capacidades, muito obrigado e esta é para vocês!

PALAVRAS-CHAVE

Projeto mecânico, Melhoria de processos, Guilhotina hidráulica, Corte por guilhotina, Guilhotina de corte paralelo, Metodologias *Lean*, *Design for Excellence* (DfX).

RESUMO

As guilhotinas hidráulicas são em grande parte usadas por empresas com fabrico próprio, devido a ser um produto de simples operação e com baixo custo, em comparação com outros equipamentos de corte de aço. No entanto, a melhoria destes produtos estagnou desde o aparecimento de equipamentos de corte mais versáteis. De facto, máquinas de corte por laser ou plasma e por jato de água, que têm a capacidade de cortar peças de geometrias muito complexas com velocidades de corte mais altas, acabam por ser mais apelativas a clientes que têm exigências de mercado elevadas. Desta forma, a interrupção no desenvolvimento das guilhotinas hidráulicas fez com que os processos de fabrico associados sejam de alta complexidade e a montagem morosa, o que por sua vez aumenta os custos de fabrico. Como resultado, torna-se relevante a melhoria destes aspetos para a manutenção da competitividade destas máquinas e respetivo custo competitivo praticado no mercado.

O desenvolvimento deste trabalho, solicitado pela empresa Adira Metal Forming Solutions, fabricante de máquinas de conformação plástica, teve como principal objetivo a melhoria de uma guilhotina hidráulica de corte vertical, modelo GV. Esta guilhotina tem como base, para desenvolvimento, o modelo atual de mercado GV2030, com o propósito principal de redução do custo de fabrico e melhoria dos processos de montagem e desempenho da máquina. O trabalho desenvolvido foi baseado numa análise *Lean* e teve o auxílio de uma ferramenta desenvolvida pelo INEGI, LDfX (*Lean Design for eXcellence*), que permitiu identificar lacunas nos elementos estruturais, acionamentos e grupo hidráulico, e nos principais conjuntos que a constituem como máquina de corte, nomeadamente os sistemas de apoio de chapa, de regulação da folga e de segurança. O estudo para o desenvolvimento foi feito em várias fases, começando por uma análise descritiva e crítica do modelo atual, na qual se apresentam os elementos constituintes da máquina e respetivos problemas associados, descreve-se a ferramenta LDfX e discutem-se os respetivos resultados consoante domínios selecionados, e apresenta-se o modelo de guilhotina desenvolvido comparando o desempenho com o modelo atual de mercado.

A guilhotina foi desenvolvida com sucesso, tendo sido melhorada em praticamente todos os conjuntos, cumprindo com quase todos os objetivos iniciais impostos, sem comprometer o seu correto funcionamento.

KEYWORDS

Mechanical design, Process improvement, Hydraulic guillotine, Guillotine cutting, Parallel cutting guillotine, Lean methodologies, Design for Excellence (DfX).

ABSTRACT

Hydraulic guillotines are largely used by companies with their own manufacture, due to their simple operation and low cost, compared to other steel cutting equipment. However, the improvement of these products has stalled since the emergence of more versatile cutting equipment. In fact, laser or plasma and waterjet cutting machines, which have the ability to cut parts with very complex geometries with higher cutting speeds, end up being more attractive to customers who have high market demands. Thus, the interruption in the development of hydraulic guillotines made the associated manufacturing processes highly complex and the assembly time-consuming, which in turn increases manufacturing costs. As a result, it becomes relevant to improve these aspects to maintain the competitiveness of these machines and the respective competitive cost practiced in the market.

The development of this work, requested by the company Adira Metal Forming Solutions, manufacturer of plastic forming machines, had as main objective the improvement of a hydraulic guillotine with vertical cut, model GV. This guillotine is based, for development, on the current market model GV2030, with the main purpose of reducing manufacturing cost and improving assembly processes and machine performance. The work developed was based on a Lean analysis and had the help of a tool developed by INEGI, LDfX (Lean Design for eXcellence), which allowed to identify gaps in the structural elements, drives and hydraulic group, and in the main assemblies that constitute it as a cutting machine, namely the plate support, clearance adjustment and safety systems. The study for the development was elaborated in several stages, starting with a descriptive and critical analysis of the current model, in which the elements composing the machine and respective associated problems are presented, the LDfX tool is described and the respective results are discussed according to selected domains, and the optimized guillotine model is presented comparing the performance with the current market model.

The guillotine was successfully developed, having been improved in practically all the sets, fulfilling almost all the initial objectives imposed, without compromising its correct functioning.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ACT	Autoridade para as Condições do Trabalho
ASAE	Autoridade de Segurança Alimentar e Económica
ATA	Autoridade Tributária e Aduaneira
BB	<i>BlueBender</i>
CA	Corrente alternada
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CATIM	Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica
CC	Corrente contínua
CE	Conformidade Europeia
CNC	Controlo Numérico Computadorizado
DfA	<i>Design for Assembly</i>
DfE	<i>Design for Expedition</i>
DfED	<i>Design for Eco Design</i>
DfM	<i>Design for Manufacturing</i>
DfO	<i>Design for Optimization</i>
DfQ	<i>Design for Quality</i>
DfR	<i>Design for Reliability</i>
DfS	<i>Design for Sustainability</i>
DfSC	<i>Design for Supply Chain</i>
DfSI	<i>Design for Structural Integrity</i>
DfT	<i>Design for Testing</i>
DfT	<i>Design for Cost</i>
DfX	<i>Design for eXcellence</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão para Normatização)
DL	Decreto-lei
DNC	<i>Direct Numerical Control</i>

DtC	<i>Design to Cost</i>
EN	Norma europeia
EU	União Europeia
IAPMEI	Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Industrial
IPAC	Instituto Português de Acreditação
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
JAEA	<i>Japan Atomic Energy Agency</i>
LDfX	<i>Lean Design-for-eXcellence</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Díodo emissor de luz)
MACF	Mesa de apoio de chapas finas
MEF	Método de Elementos Finitos
NP	Norma portuguesa
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
PL	Porta-lâminas
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
Qtd	Quantidade
SAT	Sistema de anti-torção

Lista de Unidades

cm ³	Centímetros cúbicos
ciclos/ _{min}	Ciclos por minuto
dm ³ / _{min}	Decímetro cubico por minuto
€	Euros
°	Grau
kg	Quilograma
kW	QuiloWatt
kWh	QuiloWatt hora
l/ _{min}	Litros por minuto

MPa	MegaPascal
m	Metro
mW	MiliWatt
mm	Milímetros
mm ²	Milímetro quadrado
mm/s	Milímetros por segundo
min	Minutos
N	Newton
N/mm ²	Newton por milímetro quadrado
seg	Segundos
bar	Unidade de pressão
un	Unidades

Lista de Símbolos

α_{ct}	Ângulo de corte [grau]
A_{calc}	Área do pistão do calcador [mm ²]
A_{min}	Área mínima [mm ²]
CS	Coeficiente de segurança
L_c	Curso do cilindro [mm]
€	Custo [€]
Ø	Diâmetro [mm]
E_{ma}	Eficiência de montagem
s	Espessura da camisa do cilindro [mm]
e	Espessura da chapa [mm]
L_f	Espessura da tampa inferior do cilindro [mm]
h	Espessura da tampa superior do cilindro [mm]
s_0	Espessura mínima da camisa do cilindro [mm]
C	Fator de correção da tensão de rotura por corte puro
FS	Fator de segurança
F_c	Força de corte [N]
$F_{c.Hor.}$	Força de corte (componente horizontal) [N]

F_{calc}	Força do calcamento [N]
F_{cil}	Força do cilindro [N]
$F_{guia.frt}$	Força do guiamento frontal [N]
F_{paraf}	Força do parafuso [N]
n_p	Número de parafusos
N_{min}	Número mínimo de peças
P_{acc}	Potência de acionamento [kW]
P	Pressão de serviço [bar]
$P_{máx}$	Pressão máxima [bar]
Q_a	Caudal mínimo [l/min]
Qtd	Quantidade
η_{bomba}	Rendimento da bomba
η_{motor}	Rendimento do motor
η_g	Rendimento global
$A_{s.parf.}$	Secção do parafuso [mm ²]
$tg()$	Tangente
t	Tempo [seg]
t_a	Tempo de montagem médio de uma peça [min]
t_{ma}	Tempo total estimado da montagem [min]
σ_{adm}	Tensão admissível [MPa]
σ_{ced}	Tensão de cedência [MPa]
σ_{rot}	Tensão de rotura à tração [MPa]
τ_{rot}	Tensão de rotura ao corte [MPa]
τ_{rot}	Tensões normais de tração [MPa]
V_{av}	Velocidade de avanço [mm/s]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - a) Guilhotina hidráulica; b) calandra de 3 rolos; c) máquina de dobrar tubo; d) grua torre; e) bomba de engrenagens hidráulica; f) motor elétrico de corrente alternada	10
Figura 2 - Diagrama do processo de design de produto (adaptado de [1])	11
Figura 3 - a) Quinadora elétrica BB da ADIRA; b) acionamento eletromecânico da BB [4]	12
Figura 4 - Soluções robotizadas de empacotamento (a) e paletização (b), da empresa PROVETEC [6]	13
Figura 5 - a) Guilhotina de corte vertical GV da ADIRA; b) acionamento hidráulico da GV (elaboração própria)	13
Figura 6 - Princípio do funcionamento das bombas hidrodinâmicas centrífugas (a) e axiais (b) [8]	14
Figura 7 - a) Bomba de engrenagens externa [10]; b) princípio de funcionamento [8]	14
Figura 8 - a) Bomba de engrenagens interna [12]; b) ciclo de funcionamento de bomba de engrenagens interna [11]	15
Figura 9 - Bomba de lóbulos universal [13]	15
Figura 10 - a) Bomba de parafuso IMO [12]; b) Ilustração do Parafuso de Arquimedes [14]	16
Figura 11 - Componentes das bombas de pistão radiais (a) e axiais (b) [7]	16
Figura 12 - a) Vista em corte de uma bomba de palhetas [10]; b) princípio de funcionamento da bomba [8]	17
Figura 13 - Diagrama funcional de um sistema de controlo (adaptado de [16])	17
Figura 14 - Componentes de sistema de controlo; a) sensor fotocélula [17]; b) PLC [18]; c) comando bimanual [19]	18
Figura 15 - Símbolo de marcação CE [23]	19
Figura 16 - Fases de um projeto por Shigley [24]	21
Figura 17 - Processo do desenho para fabricação [25]	22
Figura 18 - Exemplo de estimativa de custos de produção [25]	22
Figura 19 - Metodologias que incorporam a filosofia <i>Design for eXcellence</i> [30]	23
Figura 20 - Gráfico do impacto dos retrabalhos nas diferentes fases de um projeto [32]	24
Figura 21 - Régua de posicionamento de ângulo a 45°/90° [33]	25
Figura 22 - Custos das diferentes fases de vida de um produto [31]	26
Figura 23 - Exemplos de domínios de desenvolvimento e a sua relação com a abordagem do <i>LeanDfX</i> [36]	27

Figura 24 - Exemplo genérico de uma tabela de desempenho do <i>LeanDfX</i> [35]	28
Figura 25 - Exemplo de decomposição modular de um produto [35]	28
Figura 26 - Exemplo de agregação ascendente dos valores de eficiência e eficácia dos módulos [36]	29
Figura 27 - Exemplos de domínios com as respetivas variáveis [35]	30
Figura 28 - a) Retrato do Dr. Joseph Guillotin [44]; b) Ilustração da guilhotina para pena de morte [45] .	34
Figura 29 - a) Bico de corte por jato de água [47]; b) princípio do processo de corte por jato de água [48]	35
Figura 30 - Princípios de funcionamento dos processos de corte fino (a) e puncionadoras CNC (b) [46] .	35
Figura 31 – a) Principais componentes de uma guilhotina; b) mecânica do corte por guilhotina [50]	36
Figura 32 - a) Sistema de oxicorte [51]; b) princípio de funcionamento do processo de corte por oxicorte [52]	37
Figura 33 - a) Sistema de corte por plasma [53]; b) princípio de funcionamento do corte por plasma [54]	37
Figura 34 - a) Sistema de corte por laser; b) ilustração do processo de corte por laser [55]	38
Figura 35 - Principais componentes de uma guilhotina mecânica [50]	39
Figura 36 - Guilhotina de corte paralelo e de ângulo variável (elaboração própria)	40
Figura 37 - Princípio de corte oscilante (adaptado de [50])	40
Figura 38 - Evolução do método de corte oscilante no início (a) e no fim do corte (b) [50]	41
Figura 39 - Princípio de corte paralelo em guilhotina [50]	41
Figura 40 - Ângulo de ataque da lâmina móvel no método de corte paralelo (a) e oscilante (b) [50]	42
Figura 41 - Representação do ângulo de corte de uma guilhotina [50]	43
Figura 42 - Representação da área de corte sem ângulo (a) e com ângulo (b) [50]	43
Figura 43 - Defeitos de torção de tiras de chapa, torção (a), arco (b) e flecha (c) [50]	45
Figura 44 - Folgas recomendadas para corte de guilhotina [50]	45
Figura 45 - Influência da folga entre lâminas [excessiva (a), reduzida (b) e correta (c)] [50]	46
Figura 46 - Indicação dos constituintes mais relevantes de uma guilhotina [vista posterior (a) e frontal (b)] (elaboração própria)	46
Figura 47 - Estrutura principal de uma guilhotina hidráulica (elaboração própria)	47
Figura 48 - Porta-lâminas de guilhotina hidráulica de grande capacidade (elaboração própria)	48
Figura 49 - Atuador hidráulico de pistão (elaboração própria)	48
Figura 50 - Conjunto do grupo hidráulico (elaboração própria)	48

Figura 51 - Esbarro posterior de uma guilhotina (elaboração própria)	49
Figura 52 - Representação da regulação da folga motorizada com guiamento excêntrico de uma guilhotina de corte paralelo (elaboração própria)	49
Figura 53 - Sistema de calcamento composto por um conjunto de calcadores hidráulicos (elaboração própria)	50
Figura 54 - Comando numérico de uma guilhotina ADIRA (elaboração própria)	50
Figura 55 - Valores nominais das tensões para aços estruturais laminados a quente [63]	52
Figura 56 - Valores nominais das tensões para secções tubulares em aço [63]	52
Figura 57 - Exemplo de refinamento de malha em estudo por elementos finitos de um porta-lâminas de uma guilhotina hidráulica (elaboração própria)	56
Figura 58 - Logotipo atual da marca ADIRA [71]	61
Figura 59 - Presença da ADIRA no mundo [71]	61
Figura 60 - Organograma da empresa ADIRA	62
Figura 61 - Primeira guilhotina mecânica desenvolvida pela ADIRA [71]	63
Figura 62 – Primeira guilhotina GVX desenvolvida pela ADIRA (arquivos fotográficos da ADIRA)	63
Figura 63 - Especificações das gamas normalizadas da GV da marca ADIRA [4]	64
Figura 64 - Vista em perspetiva dos sistemas de mesa de apoio de chapas finas (a) e de anti torção (b). 65	
Figura 65 - Detalhe de uma vista em corte do sistema de amarração dos cilindros ao porta-lâminas.....	66
Figura 66 - Exemplo de um circuito hidráulico de uma GV2030, a) Ligação ao cilindro hidráulico esquerdo e calcadores, b) grupo energético e ligações ao bloco principal	67
Figura 67 - Vista posterior da máquina com destaque do veio de ligação de transmissão mecânica do sistema de regulação da folga	67
Figura 68 - Vista lateral de uma GV da posição da régua do esbarro antes de iniciar o corte	68
Figura 69 - Linha de corte destacada pela sombra do cabo de aço iluminado por LED verde	69
Figura 70 - Detalhe dos conjuntos principais que constituem o modelo 2.0 da GV2030	70
Figura 71 - Identificação de conjuntos funcionais da GV 2030 de design atual	71
Figura 72 - a) Sistema de apoio para corte de chapas finas (MACF) e b) sistema de anti-torção de chapa (SAT)	73
Figura 73 - Exemplo do modelo de uma tabela de desempenho selecionada para verificação dos resultados	76
Figura 74 - Versão final da guilhotina desenvolvida, GV2030 versão 3.0.....	79
Figura 75 - Indicação dos principais conjuntos abordados no capítulo 3.7.1.....	80

Figura 76 - Conjunto do corpo estrutural com indicação dos elementos de ligação e posicionamento ...	81
Figura 77 - Conjunto do corpo do porta-lâminas com indicação dos pormenores de maquinação para montagem dos elementos apontados	82
Figura 78 - Vista explodida de um atuador hidráulico da máquina desenvolvida.....	83
Figura 79 - Vista lateral com detalhe para a amarração dos cilindros hidráulicos	83
Figura 80 - Detalhe do grupo energético da guilhotina desenvolvida, versão 3.0	84
Figura 81 - Vista posterior com foco no circuito hidráulico da guilhotina desenvolvida	84
Figura 82 - Sistema de regulação de folga e guiamento inferior do modelo da guilhotina 3.0	85
Figura 83 - Vista de pormenor, sem blindagem frontal, do guiamento central aplicado na máquina desenvolvida	85
Figura 84 - Detalhe da régua do esbarro com o sistema de mesa de apoio de chapas finas desenvolvido	86
Figura 85 - Representação do conjunto de SAT na guilhotina desenvolvida	87
Figura 86 - Conjunto do calcador aplicado na guilhotina de versão 3.0.....	87
Figura 87 - Características técnicas do laser selecionado para a linha de corte do modelo GV desenvolvido	88
Figura 88 - Vista em pormenor do comando numérico e do sensor de medida de espessura	88
Figura 89 - Vista isométrica da aplicação da régua linear na máquina desenvolvida	89
Figura 90 - Vista lateral de detalhe da cava e destaque da zona de pré-maquinação do caixão	90
Figura 91 - Desenho 2D de um porta-lâminas com a indicação dos diferentes ângulos de fabrico [elaboração própria]	90
Figura 92 - Vista explodida de um cilindro hidráulico de uma GV2030.....	91
Figura 93 - Características do modelo de manga para mangueiras de alta pressão [72]	91
Figura 94 - Vista em corte da guilhotina 2.0 com detalhe para o veio de transmissão da regulação da folga	92
Figura 95 - Exemplo das soluções propostas para o corpo da estrutura sem pré-maquinações	93
Figura 96 - Exemplo das soluções propostas para o corpo do porta-lâminas sem pré-maquinações	94
Figura 97 - Representação da solução proposta para aumento da quantidade de cilindros por máquina	95
Figura 98 - Representação do esbarro de uma quinquadora aplicado no modelo de guilhotina v2.0	95
Figura 99 - Representação da solução de aplicação do sistema de regulação de folga por baixo da rampa de descarga	96

Figura 100 - Vista posterior de uma guilhotina, GV1630, com a aplicação do bloco hidráulico intermédio	99
Figura 101 - Modelos geométricos simplificados dos porta-lâminas: a) versão 2.0 e b) versão 3.0	102
Figura 102 - Modelos geométricos simplificados das estruturas: a) versão 2.0 e b) versão 3.0	102
Figura 103 - Detalhe da restrição na zona da área de corte do porta-lâminas do modelo 2.0	103
Figura 104 - Condições fronteira impostas no porta-lâminas do modelo de guilhotina 2.0	104
Figura 105 - Condições fronteira impostas no porta-lâminas do modelo de guilhotina 3.0	104
Figura 106 - Detalhe da restrição na zona da área de corte da estrutura do modelo 2.0	105
Figura 107 - Condições fronteira impostas na estrutura do modelo 2.0	105
Figura 108 - Condições fronteira impostas na estrutura do modelo 3.0	106
Figura 109 - Cargas aplicadas ao porta-lâminas do modelo 2.0	106
Figura 110 - Cargas aplicadas ao porta-lâminas do modelo 3.0	107
Figura 111 - Cargas aplicadas na estrutura do modelo 2.0	107
Figura 112 - Cargas aplicadas na estrutura do modelo 3.0	108
Figura 113 - Modelo geométrico do porta-lâminas 2.0 com detalhe para o refinamento de malha	108
Figura 114 - Vista em detalhe da guilhotina 3.0 com pormenor da orientação do deslocamento horizontal	109
Figura 115 - Representação das tensões de von Mises instaladas no porta-lâminas do modelo 2.0	110
Figura 116 - Representação do deslocamento horizontal no corpo do porta-laminas do modelo 2.0	111
Figura 117 - Representação do valor máximo do nó na zona de corte do porta-lâminas do modelo 2.0	111
Figura 118 - Representação do deslocamento vertical no corpo do porta-laminas do modelo 2.0	111
Figura 119 - Representação das tensões de von Mises instaladas na estrutura do modelo 2.0 na vista isométrica posterior (a) e frontal (b)	112
Figura 120 - Concentrações de tensão máximas dos nós na zona de corte e na zona do guiamento frontal	112
Figura 121 - Representação do deslocamento máximo horizontal na vista posterior da estrutura do modelo 2.0	113
Figura 122 - Representação do valor do deslocamento horizontal do nó central na zona de corte da estrutura do modelo 2.0	113
Figura 123 - Representação do deslocamento máximo vertical na vista posterior da estrutura do modelo 2.0	114

Figura 124 - Detalhe do deslocamento vertical dos nós centrais na chapa frontal e caixão da estrutura do modelo 2.0	114
Figura 125 - Representação das tensões de von Mises instaladas no porta-lâminas do modelo 3.0	115
Figura 126 - Representação do deslocamento horizontal no corpo do porta-laminas do modelo 3.0	116
Figura 127 - Representação do valor máximo do nó na zona de corte do porta-lâminas do modelo 3.0	116
Figura 128 - Representação do deslocamento vertical no corpo do porta-laminas do modelo 3.0	116
Figura 129 - Representação das tensões de von Mises instaladas na estrutura do modelo 3.0 na vista isométrica posterior (a) e frontal (b)	117
Figura 130 - Concentrações de tensão máximas dos nós da cava e da zona posterior do guiamento frontal	117
Figura 131 - Representação do deslocamento máximo horizontal na vista posterior da estrutura do modelo 3.0	118
Figura 132 - Representação do valor do deslocamento horizontal do nó central na zona de corte da estrutura do modelo 3.0	118
Figura 133 - Representação do deslocamento máximo vertical na vista posterior da estrutura do modelo 3.0	119
Figura 134 - Detalhe do deslocamento vertical dos nós centrais na chapa frontal e caixão da estrutura do modelo 3.0	119
Figura 135 - Tabela de tubos sem soldadura normalizados com retificação interior de tolerância H8 para os diâmetros de 160 e 190 mm [73]	123
Figura 136 - Características da bomba de palhetas Parker [76] e respetiva indicação da gama selecionada	127
Figura 137 - Tabela de desempenho referente ao domínio <i>Lean Design for Cost</i>	129
Figura 138 - Tabela de desempenho referente ao domínio <i>Lean Design for Manufacturing</i>	130
Figura 139 - Tabela de desempenho referente ao domínio <i>Lean Design for Optimization</i>	131
Figura 140 - Tabela de acessórios hidráulicos PARKER de acessórios macho GE para tubo de 20mm de alta pressão [77]	132
Figura 141 - Tabela de desempenho referente ao domínio <i>Lean Design for Assembly</i>	133
Figura 142 - Tabela de desempenho referente ao domínio <i>Lean Design for Structural integrity</i>	134
Figura 143 - Tabela de desempenho referente ao domínio <i>Lean Design for Eco design</i>	135
Figura 144 - Tabela de desempenho referente ao domínio <i>Lean Design for Expedition</i>	136
Figura 145 - Tabela de desempenho global referente aos domínios partilhados do corpo da estrutura e do porta-lâminas	138

Figura 146 - Tabela de desempenho global referente aos domínios partilhados do SAT e do sistema de regulação da folga	139
Figura 147 - Tabela de desempenho global referente aos domínios partilhados do produto final	139
Figura 148 - Vista isométrica da estrutura desenvolvida com detalhe de topo para chapa frontal e reforço posterior	143
Figura 149 - Vista isométrica explodida da montagem final do cilindro hidráulico esquerdo da guilhotina 3.0	145
Figura 150 - Vista isométrica frontal com indicação dos constituintes do corpo da estrutura da guilhotina 3.0	146
Figura 151 - Vista isométrica posterior com indicação dos constituintes do corpo da estrutura da guilhotina 3.0	146

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de equipamentos industriais e respetiva construção e função	10
Tabela 2 - Identificação das variáveis da equação (1)	25
Tabela 3 - Estado-da-arte de aplicações do método de <i>design for manufacturing</i>	31
Tabela 4 - Estado-da-arte de aplicações do método de <i>design for assembly</i>	32
Tabela 5 - Estado-da-arte de aplicações do método de <i>design for cost</i>	33
Tabela 6 - Identificação da nomenclatura indicada na Figura 30 - a	36
Tabela 7 - Principais diferenças entre guilhotinas com corte paralelo e oscilante (adaptado de [50])	42
Tabela 8 - Identificação da simbologia da equação (2)	43
Tabela 9 - Valores do fator de correção para a tensão de rotura mediante material a cortar (adaptado de [56])	44
Tabela 10 - Identificação dos órgãos principais de uma guilhotina hidráulica	47
Tabela 11 - Estado-da-arte de processos de corte por guilhotina	51
Tabela 12 - Nomenclatura da simbologia da Figura 55 e Figura 56 [63]	53
Tabela 13 - Critério de satisfação da análise elástica de primeira ordem	54
Tabela 14 - Expressões de cálculo das tensões para cada solicitação mecânica	55
Tabela 15 - Estado-da-arte do projeto de guilhotinas hidráulicas	56
Tabela 16 - Identificação dos conjuntos indicados na Figura 70	70
Tabela 17 - Identificação dos conjuntos representado na Figura 71	72
Tabela 18 - Identificação dos domínios, módulos e variáveis selecionados para análise comparativa	75
Tabela 19 - Descrição do modelo da tabela de desempenho utilizada para análise dos resultados obtidos	77
Tabela 20 - Valores de referência para análise <i>Lean</i> dos domínios e respetivos módulos selecionados ..	78
Tabela 21 - Identificação dos conjuntos indicados na Figura 75	81
Tabela 22 - Dados fornecidos para estudo por elementos finitos dos modelos 2.0 e 3.0	100
Tabela 23 - Valores para simulação dos corpos estruturais dos modelos da versão 2.0 e 3.0	101
Tabela 24 - Resultados do estudo de convergência de malha	109
Tabela 25 - Resultados das reações dos guiamentos posteriores do modelo 2.0	110
Tabela 26 - Resultados obtidos do estudo por MEF dos modelos da guilhotina 2.0	115

Tabela 27 - Resultados das reações dos guiamentos posteriores do modelo 3.0.....	115
Tabela 28 - Resultados obtidos do estudo por MEF dos modelos da guilhotina 3.0.....	119
Tabela 29 - Propriedades mecânicas para fabrico dos cilindros hidráulicos segundo o fabricante PROTUBSA (adaptado de [73])	120
Tabela 30 - Propriedades mecânicas dos parafusos ISO 4762 de classe 12.9	124
Tabela 31 - Equações para cálculo da área mínima de secção do parafuso.....	124
Tabela 32 - Valores obtidos das iterações para dimensionamentos dos parafusos à tração dos atuadores hidráulicos.....	125
Tabela 33 - Medidas dimensionadas dos cilindros hidráulicos desenvolvidos.....	125
Tabela 34 - Variáveis para cálculo do caudal mínimo para avanço dos cilindros hidráulicos	126
Tabela 35 - Valores da velocidade e caudal mínimo para uma GV2040 versão 3.0	126
Tabela 36 - Quantidade mínima de volume de óleo para alimentar todo o circuito hidráulico da GV2030 v3.0	128
Tabela 37 - Análise comparativa entre as dimensões de contentores de carga e os modelos de guilhotina, 2.0 e 3.0	137
Tabela 38 - Custos de operações das estruturas e porta-lâminas das guilhotinas 2.0 e 3.0	140
Tabela 39 - Análise comparativa de desempenho dos cilindros hidráulicos atual e desenvolvidos	141
Tabela 40 - Indicação da seleção dos cilindros a aplicar nas várias gamas do modelo da guilhotina GV 3.0	142
Tabela 41 – Processos de fabrico e respetivas matérias-primas dos elementos estruturais e atuadores hidráulicos.....	144
Tabela 42 - Lista de material do conjunto do cilindro esquerdo (Figura 149).....	145
Tabela 43 - Lista de material do corpo da estrutura soldado representado nas Figura 150 e Figura 151.....	147
Tabela 44 - Tabela de custos parcial dos modelos de guilhotina atual e desenvolvido	148

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia	4
1.4	Estrutura do relatório.....	4
1.5	Local/Empresa de acolhimento.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Desenvolvimento de equipamentos industriais	9
2.1.1	Tipos de equipamentos industriais	9
2.1.2	Projeto mecânico dos equipamentos.....	11
2.1.3	Tipos de acionamento	12
2.1.3.1	Acionamento eletromecânico.....	12
2.1.3.2	Acionamento pneumático	12
2.1.3.3	Acionamento hidráulico.....	13
2.1.3.3.1	Bombas de engrenagens	14
2.1.3.3.2	Bombas de parafuso	15
2.1.3.3.3	Bombas de pistão.....	16
2.1.3.3.4	Bomba de palhetas	16
2.1.4	Sistemas de controlo	17
2.1.5	Sistemas de segurança	18
2.1.5.1	Enquadramento legal.....	18
2.1.5.2	Diretiva máquinas	19
2.1.6	Custos de um projeto mecânico.....	21
2.1.6.1	Fases de um projeto mecânico	21

2.1.6.2	Custos do projeto mecânico	21
2.1.7	Design for eXcellence	23
2.1.7.1	<i>Design for Manufacturing</i>	24
2.1.7.2	<i>Design for Assembly</i>	25
2.1.7.3	<i>Design for Cost</i>	25
2.1.8	Ferramenta <i>Lean DfX</i>	26
2.1.8.1	Enquadramento	26
2.1.8.2	Pilares do <i>Lean DfX</i>	27
2.1.8.3	Modularização	28
2.1.8.4	Seleção dos domínios	29
2.1.8.5	Definição dos indicadores	30
2.1.9	Estado-da-arte	30
2.2	Corte por guilhotina	34
2.2.1	Enquadramento dos processos de corte	34
2.2.1.1	Corte por jato de água	34
2.2.1.2	Tecnologia de corte fino e puncionagem CNC	35
2.2.1.3	Corte por guilhotina	36
2.2.1.4	Corte por oxicorte	36
2.2.1.5	Corte por plasma	37
2.2.1.6	Corte por laser	37
2.2.2	Tipos de guilhotinas	38
2.2.2.1	Guilhotinas mecânicas	38
2.2.2.2	Guilhotinas hidráulicas	39
2.2.3	Princípio do corte em guilhotina	40
2.2.3.1	Corte oscilante	40
2.2.3.2	Corte paralelo	41
2.2.3.3	Principais diferenças entre os métodos de corte	41
2.2.4	Parâmetros mais importantes do processo	43
2.2.4.1	Ângulo de corte	43
2.2.4.2	Força principal de corte	43

2.2.4.3	Precisão de corte	44
2.2.4.4	Folga entre lâminas.....	45
2.2.5	Constituintes mais relevantes	46
2.2.5.1	Estrutura monobloco	47
2.2.5.2	Porta-lâminas.....	47
2.2.5.3	Atuadores hidráulicos	48
2.2.5.4	Grupo hidráulico	48
2.2.5.5	Esbarro posterior	49
2.2.5.6	Sistema de regulação da folga	49
2.2.5.7	Sistema de calcamento	50
2.2.5.8	Sistema de controlo	50
2.2.6	Estado-da-arte dos processos de corte por guilhotina	50
2.3	Dimensionamento mecânico de guilhotinas.....	52
2.3.1	Materiais comumente utilizados.....	52
2.3.2	Normalização aplicável.....	53
2.3.3	Verificação estrutural	54
2.3.3.1	Métodos convencionais	54
2.3.3.2	Método de Elementos Finitos.....	55
2.3.4	Estado-da-arte do projeto de guilhotinas	56
3	DESENVOLVIMENTO	61
3.1	Caracterização da entidade acolhedora.....	61
3.2	Evolução da guilhotina ADIRA.....	62
3.3	Objetivos do trabalho.....	64
3.4	Requisitos e limitações.....	65
3.5	Metodologia a seguir	69
3.6	Aplicação da ferramenta <i>Lean DfX</i>	69
3.6.1	Descrição do equipamento inicial	70
3.6.2	Divisão do equipamento em módulos.....	74

3.6.3	Seleção dos domínios, módulos e variáveis	74
3.6.4	Construção das tabelas de desempenho	76
3.7	Projeto/resultados	79
3.7.1	Descrição da solução final e subconjuntos.....	80
3.7.2	Análise crítica do equipamento inicial.....	89
3.7.2.1	Corpo da estrutura e do porta-lâminas	89
3.7.2.2	Atuadores principais hidráulicos.....	90
3.7.2.3	Circuito hidráulico principal	91
3.7.2.4	Guiamentos principais do porta-lâminas.....	91
3.7.2.5	Conjuntos opcionais da máquina.....	92
3.7.3	<i>Brainstorming</i> de ideias de melhoria	92
3.7.4	Seleção das ideias a implementar	97
3.7.5	Projeto das melhorias a implementar	99
3.7.5.1	Corpo da estrutura e do porta-lâminas	100
3.7.5.1.1	Cálculo das cargas aplicadas ao caso de estudo	100
3.7.5.1.2	Pré-processamento dos modelos numéricos.....	102
3.7.5.1.3	Resultados obtidos dos modelos geométricos 2.0 e 3.0.....	109
3.7.5.2	Atuadores principais hidráulicos.....	120
3.7.5.3	Circuito hidráulico principal	125
3.7.6	Estado <i>Lean Dfx</i> final	129
3.7.6.1	<i>Design for Cost</i>	129
3.7.6.2	<i>Design for Manufacturing</i>	130
3.7.6.3	<i>Design for Optimization</i>	131
3.7.6.4	<i>Design for Assembly</i>	133
3.7.6.5	<i>Design for Structural integrity</i>	134
3.7.6.6	<i>Design for Eco design</i>	135
3.7.6.7	<i>Design for Expedition</i>	136
3.7.6.8	<i>Design for eXcellence</i> global	138
3.7.7	Discussão de resultados e melhorias	140
3.7.7.1	Corpo da estrutura e do porta-lâminas	140

3.7.7.2	Atuadores principais hidráulicos.....	141
3.7.7.3	Circuito hidráulico principal	142
3.7.7.4	Guiamentos principais do porta-lâminas.....	143
3.7.7.5	Conjuntos opcionais da máquina.....	143
3.8	Processos de fabrico e materiais.....	144
3.9	Desenhos de pormenor.....	144
3.10	Custos e retorno de investimento.....	147
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	151
4.1	Conclusões	151
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	153
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	157
6	ANEXOS.....	165
6.1	Anexo1	165
6.2	Anexo2	169

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Metodologia
- 1.4 Estrutura do relatório
- 1.5 Local/Empresa de acolhimento

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Graças ao crescimento global da indústria, a utilização de peças em metal, quer em ferramentas para conceção ou em produtos finais, aumentou de tal forma que as empresas do ramo metalomecânico se sentem na responsabilidade de fornecer um produto mais fiável, económico e de alto desempenho. Atualmente existem vários equipamentos para corte de chapa plana, como máquinas de corte por laser, plasma, oxicorte, jato de água, puncionadoras e guilhotinas. As guilhotinas foram inicialmente utilizadas como um método de aplicação de pena de morte, sendo denominadas durante a revolução francesa. Atualmente, estas são equipamentos industriais, maioritariamente utilizadas em empresas de fornecimento de matéria prima, para corte de chapa metálica em dimensões mais pequenas, que posteriormente irão estar sujeitas aos processos de soldadura, estampagem, maquinação, entre outros.

Estes equipamentos de corte retilíneo podem ser fabricados com acionamentos mecânicos ou hidráulicos, sendo que o último é o mais frequente devido ao facto de ter melhor controlo do movimento permitindo cadências de cortes. Estas máquinas são de simples operação, de custo baixo, em relação aos outros equipamentos na área do processo de corte, com capacidade de corte de aço macio até os 40 milímetros de espessura até um comprimento máximo de 9 metros, mas muito fiáveis e com uma qualidade de corte acima da média, que evita etapas posteriores de acabamento.

Devido às limitações de corte das guilhotinas e à existência de outras capazes de cortes de peças geométricas complexas, o desenvolvimento deste produto estagnou, o que fez com que os processos de fabrico encarecessem, dada a complexidade dos órgãos estruturais, e de montagem morosa, o que por sua vez aumenta os custos de fabrico e a necessidade de mão-de-obra especializada.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é apresentar os fundamentos teóricos de guilhotinas e respetivo estado-da-arte, que servirão de base para o tema de mestrado. Pretende-se também salientar a importância que este tipo de equipamento tem na indústria metalomecânica, por ser um equipamento de baixo custo capaz de corte de chapas de aço relativamente espessas com uma qualidade de corte muito boa. Para o efeito, é feita uma pesquisa, de teor científico, na base de metodologias *lean*, tais como *design for*

eXcellence, capazes de auxiliar e simplificar os métodos de fabrico, montagem, custo, expedição, entre outros, de guilhotinas hidráulicas.

1.3 Metodologia

A pesquisa foi elaborada com base em livros e artigos científicos sobre equipamentos desenvolvidos para corte de chapa metálica e respetivos processos adjacentes ao fabrico e montagem dos mesmos. De maneira a aprofundar o conhecimento acerca das guilhotinas, ao nível do funcionamento, métodos de fabrico e montagem, foi feito um estudo com base em referências de produtores deste tipo de equipamento. Foi igualmente realizado um estudo sobre os principais constituintes das guilhotinas, o qual deu a conhecer possibilidades diferentes para substituição de sistemas desatualizados, de maneira a garantir um melhor desempenho e manipulação destes equipamentos.

Foi feita uma pesquisa mais elaborada em métodos de desenvolvimento de produto, tais como, metodologias de *design for excellence*, que englobam outros métodos secundários de fabrico e montagem, de maneira a que o desenvolvimento deste trabalho também pudesse ser contabilizado ao nível de custo total do investimento.

1.4 Estrutura do relatório

No primeiro capítulo faz-se uma introdução sobre o que este trabalho consiste, no qual se destaca os pontos principais, e através da contextualização, enquadra-se o estudo na área industrial envolvente com destaque dos pontos principais a abordar no desenvolvimento.

Na primeira parte do segundo capítulo foi feito um enquadramento das guilhotinas nos equipamentos industriais, tendo sido aprofundado ao nível do enquadramento legal, sistemas de acionamento e de segurança. Seguidamente foi feita uma pesquisa sobre métodos de design, com ênfase nas metodologias de *design for manufacturing* e *assembly*, para garantir que na fase de desenvolvimento, além de melhorar a guilhotina nos processos de fabrico e montagem, também sejam tidos em conta os custos associados aos mesmos. Para finalizar o capítulo, foi feito um enquadramento das guilhotinas nos processos de corte, com uma pesquisa aprofundada sobre os diferentes métodos de corte que estes equipamentos disponibilizam e parâmetros a ter em conta para o dimensionamento posterior da máquina.

No terceiro capítulo fez-se uma análise de toda a investigação feita com destaque dos pontos principais abordados, de maneira a salientar os pontos mais importantes que irão ter mais impacto no desenvolvimento da dissertação.

1.5 Local/Empresa de acolhimento

Este trabalho foi realizado em âmbito profissional na ADIRA, empresa de metalomecânica dedicada à produção de quinadoras e guilhotinas hidráulicas, sediada em Vila Nova de Gaia. Na fase posterior, de melhoria do produto, serão utilizadas ferramentas de simulação e modelação de imagem, tais como *Solid Edge* e *Key Shot*.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Desenvolvimento de equipamentos industriais
- 2.2 Corte por guilhotina
- 2.3 Dimensionamento mecânico de guilhotinas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desenvolvimento de equipamentos industriais

Os equipamentos industriais são recursos utilizados no setor industrial para fabrico, montagem ou transporte de produtos industrializados. Hoje em dia, estes equipamentos realizam a maior parte do trabalho pesado das linhas de produção, pelo que apresentam uma grande importância na indústria. Cada equipamento tem a sua particularidade própria e aplicações diferentes. Contudo, todos os equipamentos têm o objetivo de garantir a melhor qualidade do produto manipulado.

2.1.1 Tipos de equipamentos industriais

Devido à vasta gama de produtores de equipamentos industriais, existe a necessidade constante de melhoramento dos mesmos, seja no método construtivo ou no seu desempenho funcional. O método construtivo é o mais significativo porque apresenta mais impacto tanto na geometria do equipamento como também no seu desempenho. A estrutura dos equipamentos industriais pode ser fabricada principalmente recorrendo a três processos: a construção soldada, por ligação aparafusada ou com corpo fundido.

A construção soldada destaca-se por ser o processo de custo mais baixo e com maior versatilidade e é maioritariamente utilizado em equipamentos de grande porte que exigem rigidez em conjunto com um grau elevado de precisão no seu funcionamento.

A construção por ligação aparafusada é utilizada quase sempre em conjunto com ligação soldada. Esta tem um custo mais elevado que a anterior, mas é bastante comum em equipamentos de pequeno e grande porte que necessitem de movimento relativo entre os seus órgãos estruturais.

A construção com corpo de fundição, tem a particularidade de permitir obter as mais diversas formas tanto externa como internamente com várias espessuras num só corpo. No entanto, esta aguenta pouca capacidade de carga, pelo que é maioritariamente utilizada em equipamentos de pequeno porte.

Na Tabela 1 enumeram-se alguns exemplos de equipamentos mediante a sua construção e respetiva função.

Tabela 1 - Exemplos de equipamentos industriais e respetiva construção e função

Equipamentos de construção soldada	Guilhotina (a)	Corte de chapa por arrombamento
	Calandra (b)	Execução de virolas por conformação plástica
Equipamentos de ligação aparafusada	Máquina de dobrar (c)	Dobrar tubagem hidráulica
	Grua torre (d)	Transporte de material de grande carga
Equipamentos com corpo por fundição	Bombas de engrenagens Hidráulicas (e)	Transformar energia mecânica em hidráulica
	Motor elétrico de corrente alternada (f)	Fonte de energia de corrente alternada

De seguida ilustra-se os exemplos dos equipamentos mencionados na tabela anterior.



Figura 1 - a) Guilhotina hidráulica; b) calandra de 3 rolos; c) máquina de dobrar tubo; d) grua torre; e) bomba de engrenagens hidráulica; f) motor elétrico de corrente alternada

2.1.2 Projeto mecânico dos equipamentos

Existem muitos modelos que descrevem o processo de desenvolvimento de um produto tentando refletir o método de converter uma ideia em realidade. Maioritariamente estes são esquemas de multi-estágios, já muito discutidos e complicados na sua interpretação [1]. Assim sendo, o que se pretende é uma simplificação dos esquemas para assim evitar reformulação de etapas já realizadas (Figura 2).

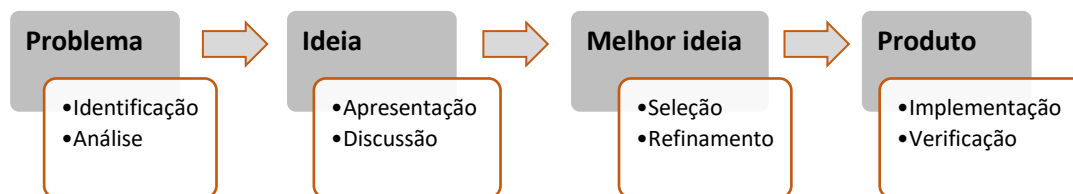


Figura 2 - Diagrama do processo de design de produto (adaptado de [1])

Segundo a Figura 2, as etapas mencionadas consistem em:

- **Identificação e análise do problema** – existe necessidade de criar ou melhorar um produto, no seu fabrico ou funcionalidade. Devem ser avaliados previamente os esforços e limitações geométricas a que estará sujeito;
- **Apresentação e discussão de ideias** – apresentação de várias ideias em esboço de diferentes intervenientes e discussão das implicações a que as mesmas podem estar sujeitas;
- **Seleção e refinamento da melhor ideia** – após a etapa anterior se encontrar devidamente analisada, deve se optar pela melhor ideia e, com auxílio de um *Computer Aided Design* (CAD) refinar a mesma, ou seja, desenhar/projetar aplicando-se os critérios de dimensionamento a que o produto irá estar sujeito;
- **Implementação e verificação do produto** - consiste na elaboração dos desenhos de todos os componentes ao nível do fabrico e de montagem. Após a montagem do produto final, o mesmo é submetido a testes de verificação de maneira garantir o seu perfeito funcionamento em conformidade com os parâmetros de segurança aplicáveis e também assegurar a certificação antes de este ir para o cliente final.

Contudo, para se poder realizar o dimensionamento do produto há que ter em conta a finalidade do mesmo, ou seja, as normas a aplicar, material a utilizar, país em que este vai ser implementado e as condições atmosféricas a que este vai estar sujeito, de maneira a garantir que o produto seja devidamente certificado.

Em Portugal, atualmente, está em vigor a Diretiva 2006/42/CE [2] (Diretiva Máquinas) transposta no Diário da República como Decreto-Lei n.º 103/2008, de 24 de junho, que garante o cumprimento das regras da sua comercialização e da segurança para os seus consumidores [3].

2.1.3 Tipos de acionamento

No mercado existem três tipos de acionamento principais aplicáveis a máquinas industriais: os eletromecânicos, pneumáticos e hidráulicos. Para a seleção do tipo de acionamento mais adequado, há que ter em conta a finalidade do mesmo, o orçamento do projeto, a eficiência e capacidade de carga da máquina, fontes de energia disponíveis em fábrica, entre outros fatores.

2.1.3.1 Acionamento eletromecânico

Este tipo de acionamento provém da combinação de motores elétricos com sistemas de transmissão mecânica, ou seja, sistemas que transformam energia elétrica em mecânica. Existem atuadores elétricos de corrente contínua (CC) e alternada (CA), sendo que o último tem um custo mais baixo e menor manutenção, mas maiores dimensões. Os de CC têm um arranque mais rápido, garantindo um binário de acionamento mais elevado e constante durante o seu funcionamento a altas velocidades. A título de exemplo, refere-se a quinadora BlueBender (BB) da Adira, que combina um servo motor CA com um fuso de esferas (Figura 3), o que implica mais cadência e precisão e faz com que este seja o produto mais económico energeticamente do seu mercado [4].



Figura 3 - a) Quinadora elétrica BB da ADIRA; b) acionamento eletromecânico da BB [4]

2.1.3.2 Acionamento pneumático

O sistema pneumático com ar comprimido é o sistema mais usado em todo o tipo de indústrias em aplicações de esforços moderados, nomeadamente em tarefas de manuseamento ou montagem de produto. Contudo, este é o sistema mais económico, robusto e com as soluções mais compactas, utilizando como fonte de energia um compressor de ar e cilindros pneumáticos para aplicação da força através de ar pressurizado [5]. Como exemplo mais comum entre as diversas indústrias referem-se os *grippers* em soluções robotizadas para manuseamento do produto, desde a separação nas linhas de produção até a linha de paletização (Figura 4).



Figura 4 - Soluções robotizadas de empacotamento (a) e paletização (b), da empresa PROVETEC [6]

2.1.3.3 Acionamento hidráulico

Este é o sistema mais comum em máquinas que exigem grande capacidade de carga. Este tipo de acionamento baseia-se na utilização de um motor elétrico, como fonte de energia mecânica, acoplado a uma bomba hidráulica que aspira o fluido, em grande parte óleo de pouca viscosidade, de dentro de um depósito e o bombeia por tubagens hidráulicas com o caudal e pressão necessários para fazer movimentar um atuador hidráulico (Figura 5).

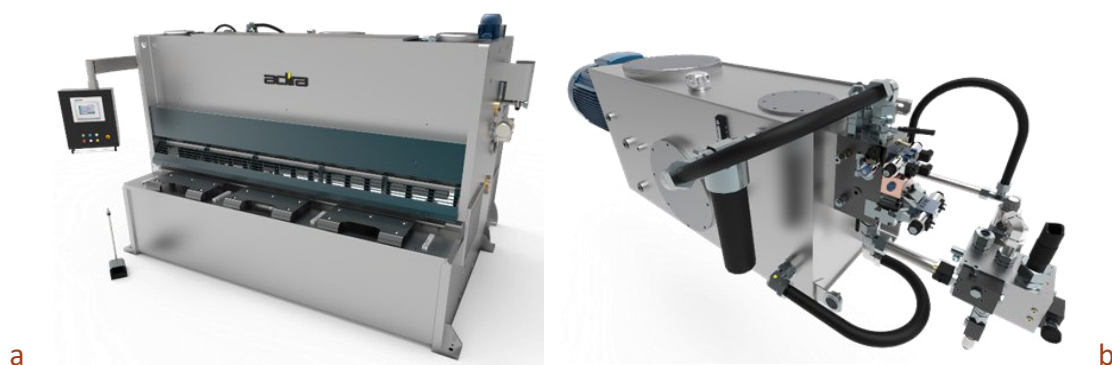


Figura 5 – a) Guilhotina de corte vertical GV da ADIRA; b) acionamento hidráulico da GV (elaboração própria)

É importante reforçar, que a seleção do tipo de bomba tem influência na eficácia da aplicação pretendida neste projeto.

As bombas hidráulicas são categorizadas em dois grupos, hidrodinâmicas (Figura 6) e hidrostáticas. As bombas hidrodinâmicas, denominadas por bombas de hélice, trabalham a altas velocidades e baixas pressões em que a única resistência do fluido é criada pelo seu próprio peso e pelo atrito gerado com a parede interior do corpo da bomba. A título de exemplo existem as bombas tipo centrífugas e axiais [7]. Estas

bombas são raramente usadas em circuitos hidráulicos, por essa razão, não serão detalhadas na sua aplicação.

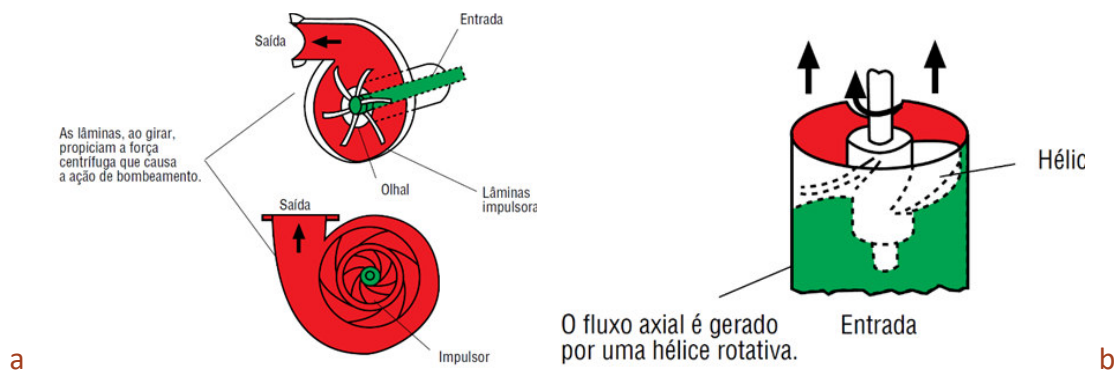


Figura 6 – Princípio do funcionamento das bombas hidrodinâmicas centrífugas (a) e axiais (b) [8]

As bombas hidrostáticas, também conhecidas por bombas de deslocamento positivo, fornecem uma determinada quantidade de óleo, não dependendo da pressão, imposta pela geometria dos órgãos moveis internos em rotação [9]. Existem quatro tipos principais: de engrenagens, de parafuso, de pistão e de palhetas, sendo estes dois últimos possíveis de aplicação de cilindrada variável, cujo o objetivo principal é reduzir o consumo de energia quando o serviço não exige a potência máxima.

2.1.3.3.1 Bombas de engrenagens

Estas bombas são constituídas por um conjunto de engrenagens. Uma das rodas dentadas é acionada com auxílio de um motor e as restantes são mandadas, que em rotação transportam o óleo entre os dentes gerando o bombeamento [9].

A construção deste tipo de bomba subdivide-se em três principais: externas, internas ou gerotor, e lóbulos. A externa consiste no engrenamento na qual a rotação das rodas acopladas tem sentidos opostos, que ao desengrenarem criam um vácuo parcial no canal de entrada da bomba e transportam o óleo entre os dentes e a carcaça forçando o fluido à saída quando as rodas voltarem a engrenar [7]. Mais comum em aplicações hidráulicas dinâmicas como rachadores de lenha e elevadores [10].

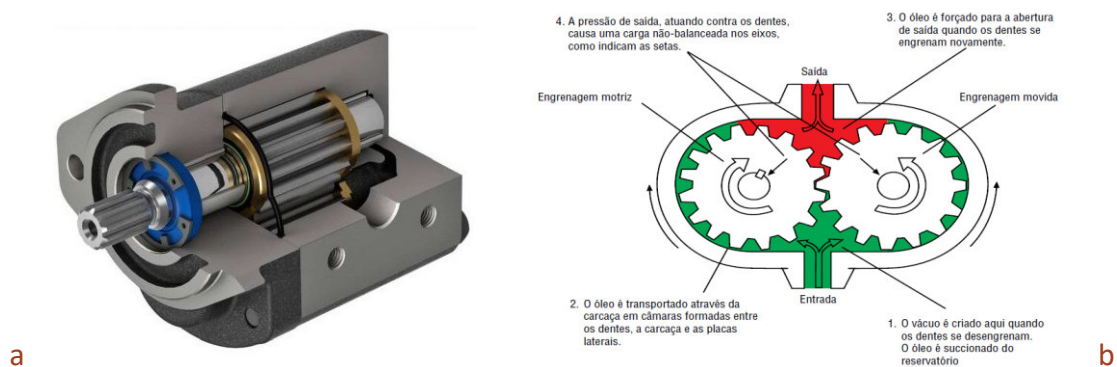


Figura 7 – a) Bomba de engrenagens externa [10]; b) princípio de funcionamento [8]

A bomba de engrenagens interna (Figura 8) ou de gerotor consiste na rotação da roda mandante engrenada excentricamente na circunferência de uma roda dentada de maior diâmetro. Uma placa em forma de meia lua separa as duas engrenagens de forma a criar um vácuo na câmara à entrada da bomba na primeira fase de rotação e forçando à saída da bomba na segunda fase [11]. Como exemplo de aplicação refere-se as máquinas-ferramenta, prensas, empilhadores, entre outras [10].

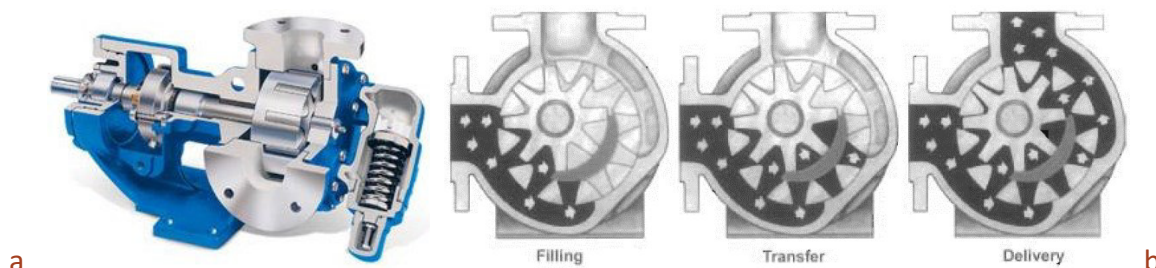


Figura 8 – a) Bomba de engrenagens interna [12]; b) ciclo de funcionamento de bomba de engrenagens interna [11]

As bombas de lóbulos têm um princípio de funcionamento idêntico às externas, mas a capacidade volumétrica é muito maior [7]. Estas bombas encontram aplicação em sistemas para trabalhos com produtos químicos, bebidas, laticínios, entre outros [13].

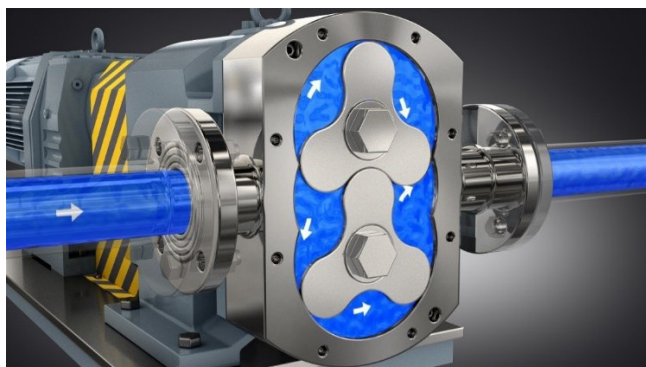


Figura 9 - Bomba de lóbulos universal [13]

2.1.3.3.2 Bombas de parafuso

A bomba de parafuso (Figura 10), também conhecida como Parafuso de Arquimedes, é a bomba mais antiga do mercado. O rotor tem forma de um parafuso e o veio com a forma de uma rosca, na qual trabalha em canais circulares semiabertos englobando cerca de três quartos do rotor. Este tipo de bomba trabalha normalmente em posição inclinada, cerca de 30° graus, e é mais utilizada em líquidos de grande densidade. As principais aplicações são em fábricas de tratamento de águas [11].

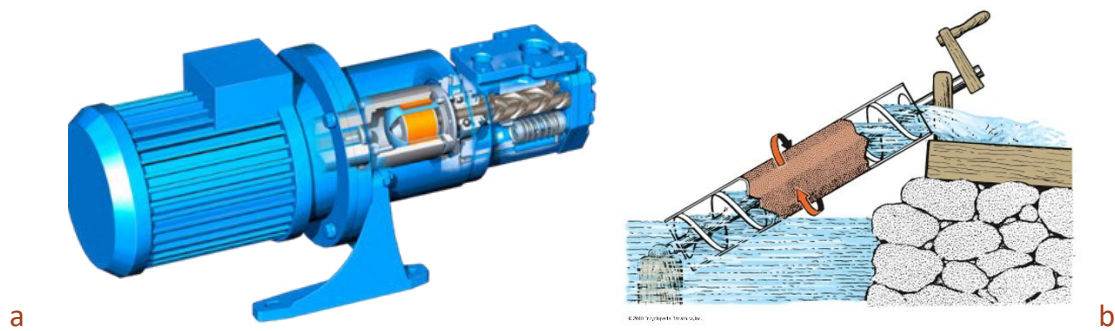


Figura 10 – a) Bomba de parafuso IMO [12]; b) Ilustração do Parafuso de Arquimedes [14]

2.1.3.3.3 Bombas de pistão

As bombas de pistão (Figura 11) funcionam com movimento alternativo, como todas as aplicações de pistões, ou seja, aspiram o óleo num sentido e expulsam-no no sentido oposto. Existem dois tipos desta bomba: as axiais, onde a montagem dos pistões é em paralelo entre si e ao eixo do conjunto rotativo, e as radiais, onde se aplica a montagem radial dos pistões [7]. Uma das principais vantagens deste tipo de bomba consiste na possibilidade de ter várias saídas independentes. Apesar da excelente eficiência e da capacidade de gerar grandes pressões, esta bomba, em relação às restantes, também acaba por ser a mais cara do mercado. As principais aplicações destas bombas são em sistemas de irrigação, elevação de máquinas e pontes rolantes [10].

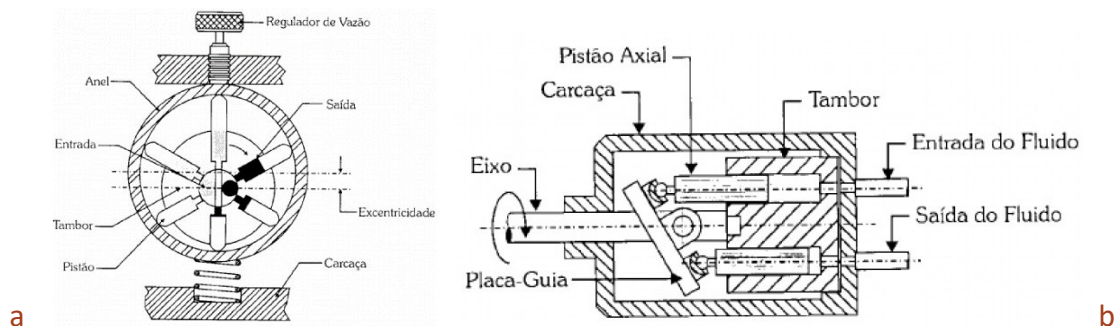


Figura 11 - Componentes das bombas de pistão radiais (a) e axiais (b) [7]

2.1.3.3.4 Bomba de palhetas

Estas bombas (Figura 12) são constituídas por um rotor com ranhuras radiais, nas quais deslizam palhetas, que em rotação entram em contato com um anel excêntrico devido à força centrífuga. Na aspiração do óleo o volume de espaço entre as duas palhetas aumenta e diminui quando se começa a aproximar da câmara de descarga, expelindo o mesmo para a saída da bomba. Como referenciado anteriormente, é possível variar o caudal da bomba alterando a excentricidade do anel, isto é, quanto mais excêntrico maior o caudal [7].

O custo destas bombas é ligeiramente mais elevado às de engrenagens, mas geram menos ruído e têm uma melhor eficiência [10]. Em termos de aplicação estas bombas são idênticas às referenciadas nas bombas de engrenagens.

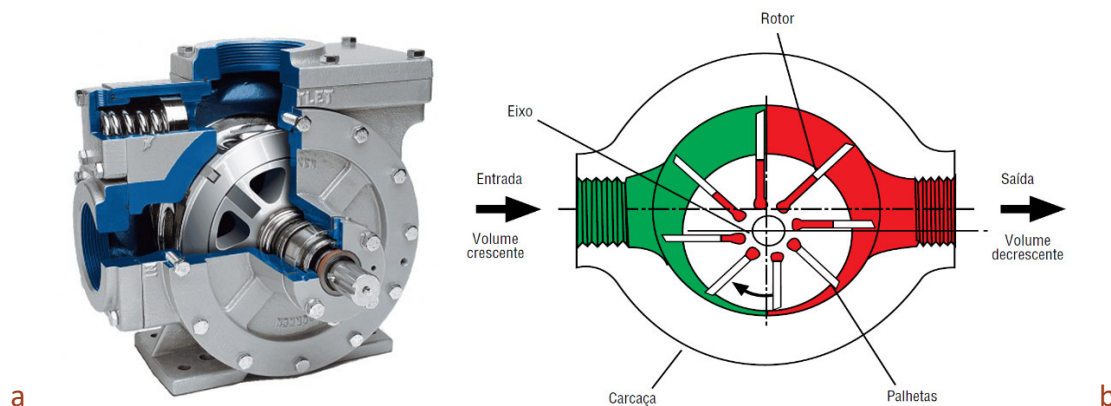


Figura 12 – a) Vista em corte de uma bomba de palhetas [10]; b) princípio de funcionamento da bomba [8]

2.1.4 Sistemas de controlo

A teoria de controlo é usada na análise e desenvolvimento de sistemas de retorno de informação, como por exemplo, o controlo de temperatura, velocidade de caudal, movimento, forças, voltagem, pressão, entre outros. Devidamente usado, estes sistemas auxiliam os engenheiros em todas as fases do processo de um produto, ajudando a prever o seu desempenho, antecipar problemas e criar soluções [15].

Os sistemas de controlo são um conjunto de ações que influenciam um processo específico de maneira a iniciar, a manter adequadamente e a parar um determinado conjunto funcional. Baseando-se em informação obtida através de instrumentos de medida, como por exemplo sensores, colocados em vários pontos necessários de leitura de inputs, esta informação obtida faz com que um comando seja processado como previamente estipulado. O controlo pode ser manual, caso em que o operador fica encarregue de tomar as decisões de manipulação da máquina, ou automático, no qual os inputs fornecidos pelos instrumentos de medida ditam as funções e método de operação de um certo comando [16].



Figura 13 - Diagrama funcional de um sistema de controlo (adaptado de [16])

Segundo o diagrama de Keviczky et al. (Figura 13), os processos de controlo consistem nas seguintes operações:

- **Controlo pretendido + sensorização** – operação de selecionar o comando pretendido e recolha dos inputs fornecidos pelos sensores respetivos ao processo a ser controlado;
- **Processamento** – fase de processar os dados recolhidos e, com base no controlo pretendido, tomar as decisões para efetuar a devida manipulação;
- **Atuador** – fase de dar o comando de início ao controlo pretendido se validado pelas fases anteriores;
- **Processo do comando** – fase de conclusão do comando inicialmente pretendido.

Para a aplicação deste sistema existe várias possibilidades de componentes agregados a cada processo. Para a fase de controlo e sensorização, como exemplo existem os comandos numéricos (Figura 54), que são controladores que permitem o controlo da máquina através de instruções alfanuméricas introduzidas pelo operador, e sensores (Figura 14 - a), que transmitem uma dada informação ou comando ao processador. Para o processamento de dados o componente mais utilizado são os controladores lógicos programáveis (Figura 14 - b) ou *Programmable Logic Controller* (PLC), que comandam de forma automática a execução de funções inseridas no comando numérico. Como atuador, utiliza-se comandos bimanuais (Figura 14 - c) ou pedais, que é um componente eletromecânico que comunica o arranque do acionamento à máquina



Figura 14 - Componentes de sistema de controlo; a) sensor fotocélula [17]; b) PLC [18]; c) comando bimanual [19]

2.1.5 Sistemas de segurança

2.1.5.1 Enquadramento legal

O aparecimento da União Europeia (UE) possibilitou o comércio de produtos entre os estados membros. De maneira a uniformizar as especificações técnicas, foi criado um conjunto de Diretivas Comunitárias que especificam os requisitos gerais e objetivos de segurança no fabrico e comércio de máquinas e outros produtos. Este conjunto separa-se em diretivas às quais são transpostas para o Direito Nacional estabelecendo as exigências de segurança e, as normas, são transpostas para a Normalização Nacional (NP EN) de cariz voluntário que fornece indicações para as especificações técnicas do produto.

A legislação da UE atualmente aplicada à segurança de máquinas é a Diretiva 2006/42/CE [2] e a Diretiva 2009/127/CE [20] que altera a Diretiva anterior no que respeita às máquinas de aplicação de pesticidas, transcrita para legislação nacional pelo Decreto-Lei nº 103/2008 [21] à qual transpõe a diretiva para o direito interno e o Decreto-Lei nº 75/2011 [22] que altera o decreto anterior e transpõe a Diretiva

2009/127/CE. O objetivo é a harmonização da conceção e o fabrico de máquinas definindo os requisitos essenciais para saúde e segurança dos trabalhadores e consumidores tendo em vista assegurar a segurança dos utilizadores. Este regulamento é aplicável a máquinas, equipamento intermutável, componentes de segurança, acessórios de elevação, material de transmissão mecânica e quase-máquinas [23].

2.1.5.2 Diretiva máquinas

De maneira a ser visível para todos os estados a conformidade com as diretivas aplicáveis a nível da segurança e da saúde, criou-se o símbolo de marcação CE (Figura 15). Este símbolo garante que as máquinas ou quase-máquinas a partir da data de entrada em vigor da Diretiva estão em conformidade com as normas aplicáveis.



Figura 15 - Símbolo de marcação CE [23]

Para efeito desta Diretiva, segundo o IAPMEI [23], entende-se por máquina:

- i. *“Conjunto, equipado ou destinado a ser equipado com um sistema de acionamento diferente da força humana ou animal diretamente aplicada, composto por peças ou componentes ligados entre si, dos quais pelo menos um é móvel, reunidos de forma solidária com vista a uma aplicação definida;”*
- ii. *“Conjunto referido na subalínea anterior a que faltam apenas elementos de ligação ao local de utilização ou de conexão com as fontes de energia e de movimento;”*
- iii. *“Conjunto referido nas subalíneas i) e ii) pronto para ser instalado, que só pode funcionar no estado em que se encontra após montagem num veículo ou instalação num edifício ou numa construção;”*
- iv. *“Conjunto de máquinas referido nas subalíneas i), ii) e iii) e/ou quase -máquinas referidas acima que, para a obtenção de um mesmo resultado, estão dispostas e são comandadas de modo a serem solidárias no seu funcionamento;”*
- v. *“Conjunto de peças ou de componentes ligados entre si, dos quais pelo menos um é móvel, reunidos de forma solidária com vista a elevarem cargas, cuja única fonte de energia é a força humana aplicada diretamente.”*

E por quase-máquina:

- *“Conjunto que quase constitui uma máquina, mas que não pode assegurar por si só uma aplicação específica. Um sistema de acionamento é uma quase-máquina. A quase-máquina destina-se a ser exclusivamente incorporada ou montada*

noutras máquinas ou noutras quase-máquinas ou equipamentos com vista à constituição de uma máquina à qual é aplicável a Diretiva Máquinas transposta pelo Decreto-Lei n.º 103/2008.” [23]

O fabricante, é obrigado a fazer uma pré-avaliação dos riscos associados ao funcionamento da máquina, na qual determina os requisitos mínimos de saúde e segurança. Para este efeito, o fabricante deverá ter em conta:

- i. Limitações da máquina e riscos previsíveis devido à má utilização da mesma;
- ii. Perigos associados ao funcionamento da máquina;
- iii. Ocorrência de lesões ou perigos para a saúde causados pela máquina;
- iv. Medidas de proteção de maneira a minimizar os riscos associados;

De maneira a garantir a conformidade com o disposto no DL nº 103/2008, o fabricante deverá aplicar um dos procedimentos de avaliação descritos nos anexos VIII a X do mesmo, salvo exceção em máquinas abrangidas pelo Anexo IV, onde se prevê a intervenção dos organismos notificados:

- IAPMEI – encarregue de designar os organismos que deverão avaliar a conformidade para colocação no mercado, os quais devem estar acreditados pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC);
- CATIM e ISQ – intervenção nos procedimentos de avaliação da conformidade das máquinas abrangidas pelo Anexo IV.

Tanto o fabricante como a entidade responsável por colocar a máquina ou quase-máquina no mercado devem garantir os seguintes pontos respetivos a cada:

- **Máquina**

- Cumprimento dos requisitos de saúde e segurança presentes no Anexo I do DL nº 103/2008;
- Processo técnico deverá abranger a conceção, fabrico e funcionamento da máquina;
- Manual de instruções;
- Garantir a execução dos procedimentos para avaliação da conformidade;
- Presença da declaração CE de conformidade.

- **Quase-máquina**

- Documentação técnica;
- Manual de montagem;
- Emissão da declaração de incorporação.

É da responsabilidade da Autoridade de Segurança Alimentar e Económica (ASAE) e da Autoridade para as Condições do Trabalho (ACT) garantir a fiscalização do cumprimento mencionado no DL nº 103/2008, sem prejudicar as competências atribuídas por lei a outras autoridades, como por exemplo a Autoridade Tributária e Aduaneira (ATA) [23].

2.1.6 Custos de um projeto mecânico

As estimativas de custos têm como objetivo a aferição dos custos dos recursos necessários para a execução dos processos de um determinado projeto. Para isto é necessário criar métodos organizacionais, identificar os fatores influenciadores dos custos, e fazer a diferenciação entre estes.

2.1.6.1 Fases de um projeto mecânico

No desenvolvimento de um projeto mecânico de um equipamento industrial é muito importante consultar intervenientes de diferentes áreas ligados ao projeto da máquina. Desde o fabrico até ao cliente final, o equipamento é submetido a vários processos. Cada interveniente tem o seu próprio conhecimento tecnológico e, por vezes, experiência profissional num dado órgão pertencente ao equipamento. Todo este conhecimento, combinado com as ferramentas de engenharia disponíveis, dão ao projetista recursos para produzir um plano de trabalhos que, quando levado a cabo, resulta num produto funcional, seguro, confiável, operacional e competitivo [24].

A elaboração de um projeto pode ser separada por várias fases, algumas delas repetitivas, mas começa sempre com a identificação de uma necessidade de uma empresa ou pessoa, e da decisão de o tornar realidade, e finaliza com a apresentação do resultado para atender a essa necessidade. Na Figura 16 podem-se observar as diferentes fases de um projeto propostas por Shigley [24].

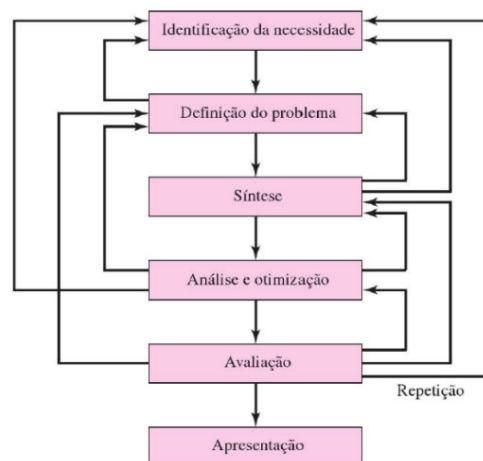


Figura 16 - Fases de um projeto por Shigley [24]

2.1.6.2 Custos do projeto mecânico

Na maioria das empresas, quando se identifica uma necessidade de melhoria ou de elaboração de um novo produto, o custo é, em grande parte das vezes, o critério com mais impacto na decisão. No entanto, na fase de conceptualização do projeto, o custo é dado como um valor aproximado.

Na fase de definição final do desenho do produto o processo acaba por ser mais repetitivo (Figura 17) e começa a ter uma estimativa mais próxima da realidade dos custos, devido às considerações serem mais dirigidas para os processos de fabrico [25].

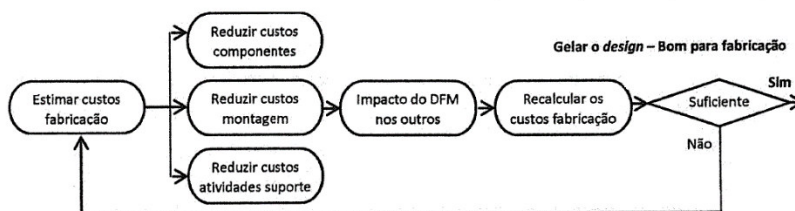


Figura 17 - Processo do desenho para fabricação [25]

Para a contabilização total dos custos de fabrico deve-se ter em conta que existem vários componentes de diferentes tipos de fabrico, tais como o custo de fabrico de membros estruturais (processo de corte, soldadura e maquinação), o custo de componentes soltos (processo de corte, quinagem e maquinação em conjunto ou individual), o custo de componentes normalizados (transporte, que pode ser considerado dependendo da localização do fabricante), entre outros [26]. Em algumas empresas que possuam fabrico próprio, este poderá ser uma vantagem em termos de custos das peças. Contudo, em grande parte das empresas que possuem o fabrico interno, este é limitado às peças que têm mais saída.

É importante criar folhas de cálculo com a lista de todos os materiais, com as respetivas quantidades, matéria-prima e até mesmos processos de fabrico, caso a empresa possua algum tipo de máquina para o efeito. Neste caso, é possível estabelecer uma correspondência entre os custos de cada etapa de fabrico e os respetivos tempos, para estimar o custo de cada componente. Na Figura 18 pode-se observar um exemplo de tabela de custos de produção [25].

Componentes	Materiais	Processo (máquinas + mão-de-obra)	Montagem (mão-de-obra)	Total custos variáveis	Ferramentas Moldes	Vida ferramenta (nº peças)	Custo unitário fixo	Custo total
Coletor escape								
Fundição	12	23		35	1400	100000	0.014	35,014
Maquinagem		43		43				43
Tubo do EGR	2		5	7				7
Conjunto PCV								
Válvula	5		3	8				8
Tampa	12	25	2	39	500	10000	0.005	39,005
Parafusos (3x)	14		3	17				17
Despesas gerais	2	4	2	8	0.5			8.5
TOTAL (Euros)	47	95	15	157			0.019	157,019

Figura 18 - Exemplo de estimativa de custos de produção [25]

Além dos custos de fabrico, apesar de estes não serem tão relevantes no custo total do produto, há que ter em conta os custos associados à montagem, a retrabalhos que possam ocorrer devido defeitos de fabrico não contabilizados, e até mesmo à expedição do produto. De facto, no caso de o produto apresentar de grandes dimensões, este custo pode ser considerável, mediante o percurso e o modo de transporte.

É na fase de montagem que a metodologia *Design for Assembly*, quando aplicada na fase de desenvolvimento, se irá refletir com mais impacto. A simplificação de peças ou uniformização faz com que o custo de montagem diminua substancialmente uma vez que, para efeitos de cálculo do custo, é efetuado produto do tempo de montagem multiplicado pelo custo horário de mão-de-obra [27].

2.1.7 Design for eXcellence

A filosofia de *Design for eXcellence* ou *Design for X* (DfX) é uma prática associada à garantia de qualidade de um produto ou serviço, que permite reduzir o tempo de fabrico e minimizar gastos de manutenção a longo prazo, entre outras áreas de melhoria do ciclo de vida [28].

Este termo advém da criação de metodologias secundárias como *Design for Manufacturing* (DfM) e *Design for Assembly* (DfA), cujo aplicação como metodologias de desenvolvimento do produto, permite obter resultados excecionais, simplificando e diminuindo a quantidade de peças de um dado produto. No entanto, a indústria sentiu também necessidade de incutir novas metodologias focadas também nos processos de fabrico, *design for performance*, *quality*, *maintenance*, entre outros. A este vasto conjunto de metodologias deu-se o nome de *Design for eXcellence* (Figura 19) [29].



Figura 19 - Metodologias que incorporam a filosofia *Design for eXcellence* [30]

Resumindo, a versatilidade deste conceito é enorme, podendo ser descrito em metodologias como por exemplo [30]:

- ***Design for Reliability (DfR)*** – capacidade que o produto tem de cumprir as funções para o qual foi desenvolvido durante um certo período de tempo;
- ***Design for Quality (DfQ)*** – assegura a qualidade do produto avaliando todas as propriedades envolventes;
- ***Design for Supply Chain (DfSC)*** – conceito aplicado a departamentos de logística, aperfeiçoando métodos de embalagem e transporte dos produtos;
- ***Design for Testing (DfT)*** – aplicado a testes de verificação de qualidade que asseguram que o produto está conforme os critérios e padrões predeterminados pelos projetistas;

- **Design for Cost (DfC)** – conceito baseado em técnicas de gestão de custo de desenvolvimento e fabrico do produto;
- **Design for Sustainability (DfS)** – assegura que o produto tem o menor impacto possível para o meio ambiente.

Todos estes conceitos são importantes para o desenvolvimento de um bom produto, mas os de fabrico (*Design for Manufacturing*) e montagem (*Design for Assembly*) são os que têm mais impacto e considerados como os mais relevantes [28].

2.1.7.1 *Design for Manufacturing*

O termo *Design for Manufacturability* ou *Design for Manufacturing* é dado ao processo de desenvolvimento de produto, no que toca ao seu processo de fabrico, montagem, fase de testes, expedição, manutenção pós-venda e até na acessibilidade de uma possível reparação, sem nunca comprometer todas as suas características qualitativas, como preço, qualidade, fiabilidade, entre outras [31].

Está provado que esta metodologia, se adotada pelas empresas na fase de projeto, diminui o tempo e custo do desenvolvimento e assegura uma suave transição de informação entre as equipas de projeto e fabrico no qual se retrata no melhor prazo de comercialização.

A aplicação desta metodologia pode ser feita, se possível, com simplificação do fabrico e uniformização de peças ou conjuntos em aplicações distintas. Peças padronizadas leva à poupança de tempo e custo, tanto de fabrico como de desenvolvimento das mesmas.

As empresas que aplicaram esta metodologia, obtiveram uma diminuição do custo total e prazo de comercialização do produto em cerca de 50% e com uma melhoria significativa do produto na qualidade, fiabilidade, funcionalidade, satisfação do cliente, no crescimento e nos lucros [31].

Na Figura 20 pode-se observar um gráfico desenvolvido por uma empresa de melhoria continua de desenvolvimento de produto ao nível do desenho, fabrico e distribuição. Este gráfico compara o impacto que os retrabalhos tem no desenvolvimento de um projeto com os seus custos. Facilmente se percebe o impacto da aplicação do DfM numa fase inicial em que os custos são muito minimizados [32].

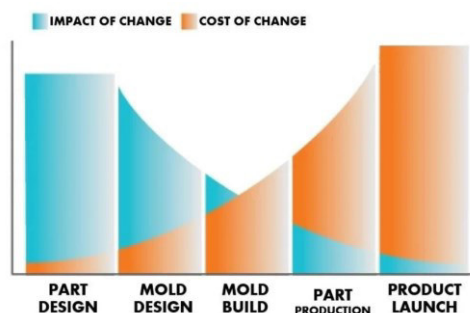


Figura 20 - Gráfico do impacto dos retrabalhos nas diferentes fases de um projeto [32]

2.1.7.2 Design for Assembly

O termo *Design for Assembly* aplica-se ao método de simplificação do processo de montagem de um produto, ou seja, projetar um equipamento de forma a minimizar a dificuldade que possa ocorrer para os operários na fase de montagem e a necessidade de evitar mão de obra especializada, retrabalhos, operações manuais como furação, entre outros aspectos. Para o efeito, todas as áreas de desenvolvimento devem aprender com montagens equivalentes e verificar as não conformidades apresentadas no projeto anterior, resolvendo-as de maneira a evitar duplicação do erro. O desenho de peças de fácil montagem, simétricas e com pontos de posicionamento fixo, é uma das principais maneiras de minimizar o erro e diminuir o tempo de montagem [31]. Na Figura 21 está representado um esquadro para auxílio no posicionamento de peças a 90° e 45° entre si, seja na fase de fabrico ou de montagem.

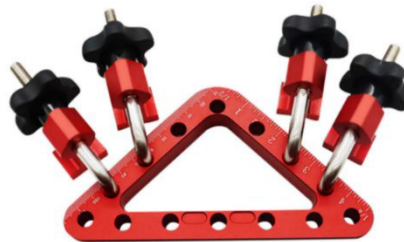


Figura 21 - Régua de posicionamento de ângulo a 45°/90° [33]

No caso de melhoria de um produto, quando se pretende comparar o tempo de montagem de um conjunto desenvolvido com um anteriormente desenhado, seguindo a metodologia de DfA, é possível utilizar a eficiência de montagem (1).

$$E_{ma} = \frac{N_{min} \times t_a}{t_{ma}} \quad (1)$$

A Tabela 2 apresenta a nomenclatura utilizada na equação (1).

Tabela 2 - Identificação das variáveis da equação (1)

E_{ma}	Eficiência de montagem	t_a	Tempo de montagem médio de uma peça [segundos]
N_{min}	Número mínimo de peças	t_{ma}	Tempo total estimado da montagem [segundos]

2.1.7.3 Design for Cost

A abordagem *Design for Cost* (DfC) é uma metodologia organizacional para integrar uma gestão de custos, principalmente, na fase de conceito e projeto. O objetivo principal desta abordagem é reduzir o custo, sem comprometer a fiabilidade e qualidade do produto, através da simplificação do conceito e arquitetura do produto. Como

representado na Figura 22, esta fase determina cerca de 60% do custo cumulativo do ciclo de vida do produto [31].

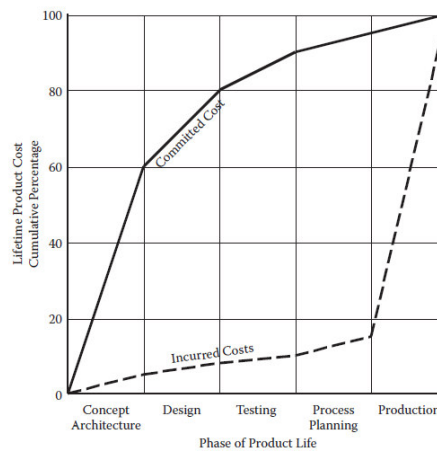


Figura 22 - Custos das diferentes fases de vida de um produto [31]

O método DfC pode ser confundido com o *Design to Cost* (DtC), apesar de estas serem duas abordagens totalmente diferentes. Enquanto o DfC é aplicado com base na engenharia do produto, focado na redução do custo do ciclo de vida e na melhoria do desempenho do produto com recurso a diferentes técnicas e tecnologias, o DtC foca-se no cumprimento de orçamentos mesmo que tal implique uma redução do desempenho do produto ao longo do seu ciclo de vida, resultando num processo iterativo por natureza que obriga a custos de retrabalho [34]. Para a aplicação do DfC ser bem sucedido, este método tem de ser integrado com outras ferramentas DfX.

2.1.8 Ferramenta *Lean DfX*

As abordagens DfX para apoio do desenvolvimento sustentável de novos produtos é cada vez mais uma constante de aplicação pela maioria das empresas de desenvolvimento. De maneira a facilitar a análise dos dados e comparar diferentes conceitos aplicados ao mesmo produto surge a necessidade de desenvolvimento de uma ferramenta capaz de cruzar toda essa informação, a qual se intitulou de *Lean Design-for-eXcellence* (LDfX) [35].

2.1.8.1 Enquadramento

Esta ferramenta, que tem sido desenvolvida desde 2015 pelo Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Industrial (INEGI), tem como foco principal a medição do grau de eficácia e eficiência de um ou mais elementos constituintes de um novo produto/equipamento ou do produto final por via de coeficientes adimensionais, integrando os domínios DfX com as várias fases do ciclo de vida do novo produto, tendo em conta os princípios *Lean* e a base de cálculo de desenho modular.

De maneira a controlar todos os requisitos e especificações iniciais impostos ao projeto, é importante associa-los à respetiva fase do ciclo de vida a que cada um pertence, tais como produção, montagem, expedição ou manutenção. A Figura 23 ilustra um diagrama resumido de um grande número de domínios “X” que devem ser integrados na conceção do produto [35, 36].

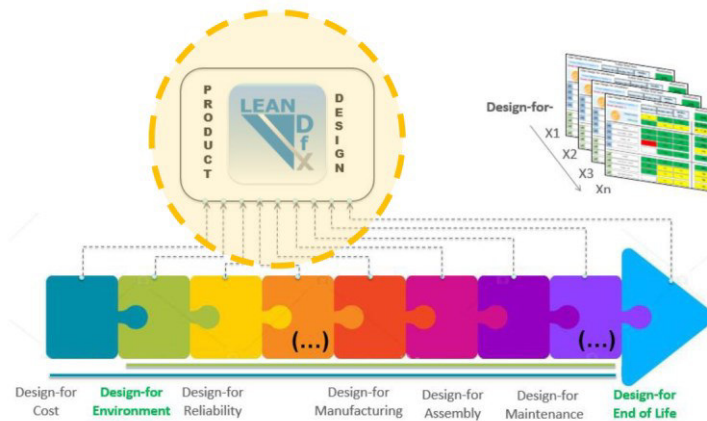


Figura 23 - Exemplos de domínios de desenvolvimento e a sua relação com a abordagem do *LeanDfX* [36]

2.1.8.2 Pilares do *Lean DfX*

A abordagem desta ferramenta inovadora tem como base quatro pilares principais [35, 36]:

- Pilar 1 - Decomposição do produto**
 Este primeiro passo, que implica a organização dos elementos funcionais do produto em unidades físicas, processo conhecido como modularização, é o alicerce da ferramenta que faz com que a análise da eficácia e eficiência dos módulos e submódulos seja mais correta;
- Pilar 2 - Seleção dos domínios “X” e respetivos indicadores**
 Nesta fase deve-se estabelecer cuidadosamente os domínios (referidos no capítulo 2.1.8.4) tendo em conta todos os aspetos alvo pré-estabelecidos baseados nos requisitos e especificações iniciais do produto, com base nos objetivos da empresa;
- Pilar 3 - Vista simples do controlo dos atributos**
 A utilização de um sistema de gestão visual, com recurso às tabelas de desempenho (Figura 24), permite a avaliação direta e mais intuitiva dos resultados, já que, o intervalo percentual de 0 a 100% é dividido em quatro cores diferentes, dependendo do nível de eficácia e eficiência;
- Pilar 4 - Agregação da eficácia e eficiência através da hierarquia modular do produto e domínios “X”**
 A lógica de agregação é ascendente (*bottom-up*), desde o nível inferior para o superior, com duas dimensões (eficácia e eficiência) para cada submódulo, módulo e sistema. Os resultados são obtidos através do cálculo do grau das

dimensões desde o nível mais baixo e integrados nos níveis superiores até atingir o nível de topo desejado.

Product Modules → ↓ Variable Design		M1	M2	M3	(...)	Mn	
Design for X [Domain]	Effectiveness	75%	100%	25%	(...)	100%	75%
	Efficiency	67%	73%	89%	(...)	81%	77%
EFFECTIVENESS	Design Variable #1	100%	100%	58%	(...)	100%	75%
	Design Variable #2	100%	100%	100%	(...)	100%	100%
	Design Variable #3	50%	100%	17%	(...)	100%	50%
	Design Variable #4	100%	100%	92%	(...)	100%	75%
EFFICIENCY	Design Variable #1	50%	50%	-	(...)	75%	58%
	Design Variable #2	50%	50%	89%	(...)	75%	66%
	Design Variable #3	-	91%	-	(...)	75%	83%
	Design Variable #4	100%	99%	-	(...)	98%	99%

Efficiency Legend: 100-90% (green), 89-70% (yellow), 69-40% (orange), <40% (red)
 Effectiveness Legend: 100% (green), <100% (red)

Figura 24 - Exemplo genérico de uma tabela de desempenho do *LeanDfx* [35]

2.1.8.3 Modularização

De maneira a garantir o sucesso na implementação desta ferramenta no desenvolvimento de um novo produto, foram definidos seis passos, não só ligados aos pilares, mas também à mentalidade de melhoria contínua [35, 36].

- **Passo 1 - Workshop**

De maneira a garantir que todos os intervenientes seguem a mesma metodologia deve ser feita uma reunião no arranque do projeto;

- **Passo 2 - Modularização**

Deve ser feita uma análise inicial, decompondo o produto hierarquicamente nos seus elementos funcionais (módulos). Este passo é muito importante para a gestão e redução da complexidade (Figura 25);

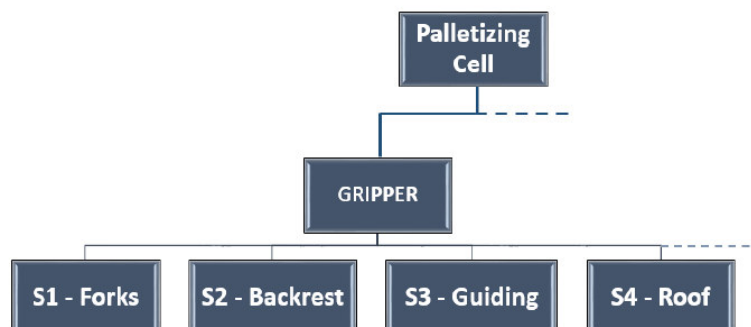


Figura 25 - Exemplo de decomposição modular de um produto [35]

- **Passo 3 - Seleção dos domínios de conceção**

Neste passo a empresa deve definir claramente os domínios “X” do produto, alinhados com os seus requisitos, especificações, parâmetros a cumprir e outros critérios estabelecidos;

- **Passo 4 - Seleção dos indicadores e valores dos parâmetros**

Nesta fase deve-se definir ou identificar as variáveis e respetivos valores dos módulos para cada domínio, tendo em conta as especificações do produto. É importante diferenciar a magnitude dos valores por diferentes cores para ter uma melhor perceção das áreas que estão em bom estado e as que necessitam de mais intervenção;

- **Passo 5 - Análise dos dados**

Após conclusão do passo anterior, deve ser feita a análise de cada domínio e respetivos módulos definidos. Começando pelos módulos mais baixos hierarquicamente, a agregação progride para os superiores, resultando dois rácios agregados da conceção do produto (Figura 26);

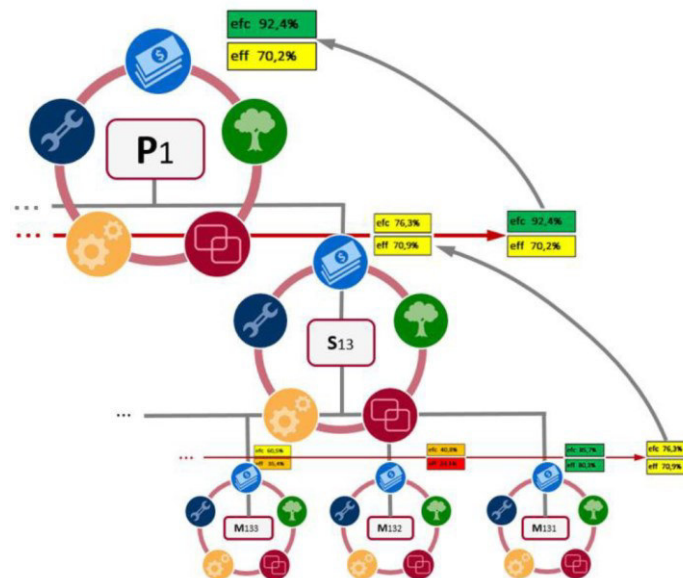


Figura 26 - Exemplo de agregação ascendente dos valores de eficiência e eficácia dos módulos [36]

- **Passo 6 - Melhoria da conceção (ciclo iterativo)**

Esta é a fase do processo iterativo de melhoria contínua. Esta fase centra-se na correção dos resultados ineficazes e melhoria, se possível, daqueles com baixa eficiência.

2.1.8.4 Seleção dos domínios

Deve ser feita uma avaliação preliminar do projeto para se analisar quais são os domínios mais relevantes e mais adequados para os diferentes módulos do produto a desenvolver (*design for cost, assembly, manufacturing, eco-design, expedition*, entre outros) [35].

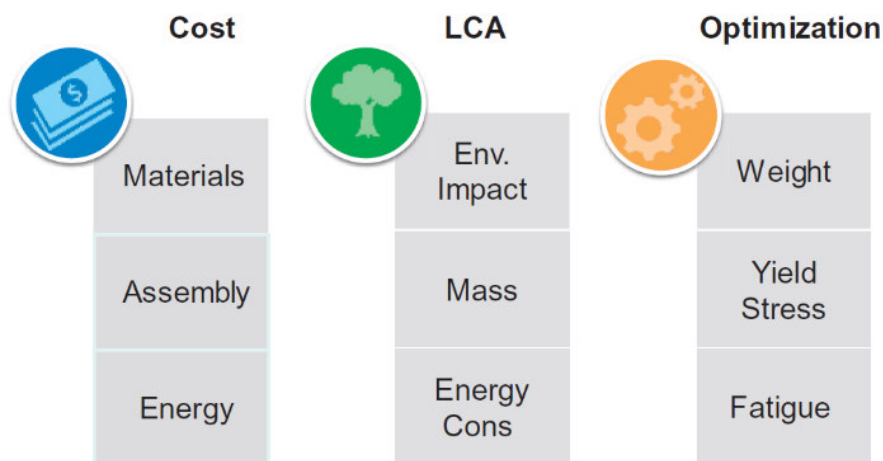


Figura 27 - Exemplos de domínios com as respetivas variáveis [35]

2.1.8.5 Definição dos indicadores

Após seleção dos domínios a estudar, deve-se avaliar cuidadosamente quais as variáveis ou indicadores, como por exemplo o tempo, custo ou dimensões, dos módulos que mais se adequam a cada domínio. Pode surgir a necessidade de avaliar o mesmo módulo, mas com indicadores diferentes, imposta em diferentes domínios, ou até mesmo, a variável de um domínio “x” ser um domínio “y”, como ilustrado na Figura 27 no domínio *Design for cost*. O custo e o tempo são os indicadores mais analisados pelas empresas, no desenvolvimento de produto, devido ao impacto que tem no valor final desse mesmo produto. Se forem analisados alguns domínios, como por exemplo, o de fabrico e montagem, estas variáveis estão abrangidas pelos dois, ou seja, quanto menos tempo de fabrico um dado produto tem, menos custo vai ter para a empresa, como também na secção de montagem, quanto menos tempo um operário levar a montar um dado conjunto menos custo vai dar à empresa pelo montagem do mesmo.

2.1.9 Estado-da-arte

Pelo facto de os domínios de fabrico (DfM), montagem (DfA) e custo (DfC) serem os mais analisados e praticados pelas empresas de desenvolvimento de produto, são apresentados de seguida casos concretos de aplicação dos mesmos em ambiente profissional.

Na Tabela 3 faz-se referência a casos reais de aplicação dos métodos de DfM.

Tabela 3 - Estado-da-arte de aplicações do método de *design for manufacturing*

Autor(es)	Descrição da aplicação
Silva et al. [37]	A produção de matrizes de estampagem tem inúmeros componentes de diferentes materiais, mas com dimensões similares, dificultando e encarecendo o método de fabrico dos mesmos, nomeadamente, a maquinação. O propósito deste estudo, centrado no DfM, foi melhorar os processos de maquinação destas matrizes, tentando uniformizar as formas e baixar o tempo de fabrico, o que por sua vez baixa também o custo das mesmas. Os custos de fabrico das duas matrizes selecionadas diminuíram em 1,84% e 3,64%, mas no indicador de <i>overall equipment effectiveness</i> (OEE) obteve-se um aumento de 21% devido sobretudo ao aumento de disponibilidade das máquinas de estampagem. Com esta técnica, conseguiu-se aumentar a competitividade em preço e tempo de fabrico na venda de peças por estampagem.
Yutian et al. [38]	Os equipamentos de maquinação são reconhecidos como um dos mais importantes na indústria e, como tal, existe a necessidade constante do aperfeiçoamento da qualidade dos produtos que estas máquinas produzem. Este estudo baseia-se no DfM de um centro de maquinação de cinco eixos responsável pela produção dos motores para a indústria aeronáutica. O estudo realizado iniciou pelo dimensionamento de uma estrutura apropriada para uma máquina de cinco eixos considerando todas as características do processo de fabrico de carcaça dos motores, seguido do desenvolvimento de uma cabeça de dupla motorização e um eixo compacto motorizado assegurando a rigidez estrutural e capacidade de acionamento necessário. Os resultados mais visíveis foram registados na redução do custo/tempo de maquinação em cerca de 20% na produção da carcaça dos motores, para além do aumento de eficiência de operação em relação à anterior.

Na Tabela 4 podem-se observar dois casos de estudo onde foi aplicado o método de DfA.

Tabela 4 - Estado-da-arte de aplicações do método de *design for assembly*

Autor(es)	Descrição da aplicação
Dias et al. [39]	Devido ao constante crescimento da industrial automóvel, cabe às empresas do ramo adotar culturas de melhoria contínua de maneira a se tornarem mais competitivas a nível económico e tecnológico. Este estudo foca-se no aperfeiçoamento do método de DfA de uma linha de produção com o objetivo de aumentar a capacidade de produção de 1400 para 1800 peças por dia. As principais alterações consistiram no equilíbrio das cargas temporais de trabalho através da reorganização das operações em cada estação na linha de produção. Com o mesmo número de operários atingiu-se um aumento de 17% na produtividade, mas não o objetivo estipulado de 1800 peças por dia, apenas 1650 peças aproximadamente. Por outro lado, colocando mais um operário na linha obteve-se um aumento de produtividade em 37% e foi possível atingir uma produção diária de 2200 peças, atingindo assim o objetivo inicialmente proposto. Além do objetivo cumprido o indicador de OEE da linha aumentou em 21%.
Correia et al. [40]	Na maioria das linhas de produção de dispositivos eletrónicos a montagem é feita manualmente. Devido às exigências do mercado em melhoria contínua do produto, a montagem manual pode ser um percalço para as empresas que possuam linhas de produção de pequenos lotes. Recorrendo a ferramentas <i>Lean</i> e à metodologia de DfA, este trabalho, realizado na <i>Bosch Security Systems</i>, tem como objetivo principal reduzir o custo e tempo de produção de uma linha de montagem manual complexa através da melhoria da qualidade e do desempenho da mesma. Após estudos de tempos e percurso dos operários presentes na linha de montagem manual, foi proposta a reorganização da disposição dos postos operacionais e a implementação de métodos de trabalho. Com estas alterações e implementações, obteve-se um aumento de aproximadamente 10% na produção desta linha, mantendo os mesmos recursos humanos.

Na Tabela 5 é apresentado dois casos distintos de aplicação do método de DfC.

Tabela 5 - Estado-da-arte de aplicações do método de *design for cost*

Autor(es)	Descrição da aplicação
Kim et al. [41]	O betão é o principal material de construção mais utilizado na Coreia, o que faz com que o consumo total de energia para fabrico deste material na indústria de construção seja de 23% e os gases de CO₂ emitidos sejam de 40% do total, o que também gera elevados custos produtivos. Este caso de estudo foca-se principalmente no <i>Design for Eco-friendly</i>, de maneira a tornar a produção do betão mais “amigo” do ambiente (<i>eco-friendly</i>) com uma redução considerável das emissões de CO₂, em conjunto com as abordagens DfC. O betão é um material composto por combinação de várias matérias primas por métodos de mistura diferentes. Com uma base de dados, foram feitos 800 estudos de métodos de mistura diferentes alterando a quantidade das várias matérias primas e o processo de produção. Após estudo, foi facultado por 10 empresas nacionais, produtoras de betão, provetes de betão de baixo teor em carbono com 1 m³ de volume e de qualidades diferentes, desde os de 18 a 60 MPa. Comparando os resultados obtidos do método de mistura estudado com o atual método praticado, conseguiu-se uma redução máxima da emissão de CO₂ a rondar os 24% e uma redução económica de cerca de 5% na produção do betão.
Yan et al. [42]	O instituto de desenvolvimento de energia nuclear do Japão, <i>Japan Atomic Energy Agency</i> (JAEA), começou em 2001 a conceção e desenvolvimento de um reator de turbina a gás de alta temperatura, que ao final de 3 anos de estudo apresentou o primeiro modelo com uma temperatura de saída do núcleo do reator a atingir os 850°C, o qual obteve uma eficiência energética de 45,6% garantindo eletricidade a um custo de cerca de 20% a menos, comparativamente com o reator anterior que operava a água. O presente caso de estudo baseia-se na aplicação dos métodos de DfC e DfM, de maneira a garantir um reator com mais eficiência e menos custo. Com apenas 2 grandes alterações ao modelo de 850°C, ao nível da conceção da turbina com palhetas de material de liga monocristalinas e com implementação do sistema de cogeração de dessalinização da água do mar, atingiu um aumento da eficiência em 5% e respetiva redução do custo de produção de energia em 10%. Com a aplicação destas 2 alterações em conjunto o custo de eletricidade reduziu no total de 20 a 25%.

2.2 Corte por guilhotina

A primeira guilhotina foi criada antes da Revolução Francesa, em 1789, e utilizada por Dr. Joseph Ignace Guillotin (Figura 28 - a) para aplicação de pena de morte, visto que defendia que a aplicação desta pena deveria ser mais “humana”. Por esse motivo o dispositivo foi denominado com o seu nome [43].

Este dispositivo (Figura 28 - b) consistia numa estrutura em madeira com cerca de 4 metros de altura e com uma lâmina em aço com cerca de 40 quilogramas suspensa no topo da mesma. Suportada pela corda, a lâmina era libertada após o acusado colocar o pescoço por baixo da lâmina.

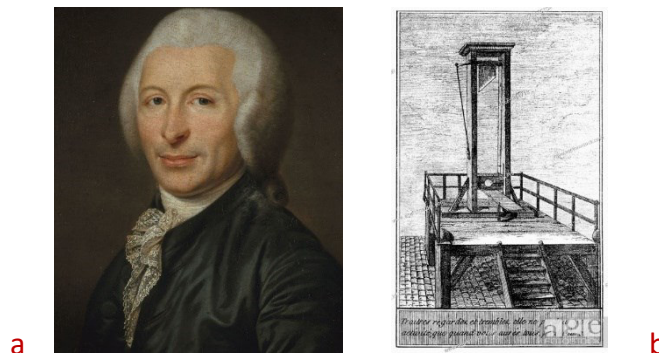


Figura 28 - a) Retrato do Dr. Joseph Guillotin [44]; b) Ilustração da guilhotina para pena de morte [45]

2.2.1 Enquadramento dos processos de corte

O processo de corte de uma chapa de metal pode ser executado a frio ou quente. No processo a frio, o material é cortado sem sofrer qualquer dano térmico, enquanto a quente o material é submetido ao ponto de fusão, o que altera as suas propriedades mecânicas na zona de corte.

Nos processos de corte realizados a frio existe o corte por jato de água, tecnologia do corte fino, punção CNC e guilhotina por corte. No corte realizado a quente existe o oxicorte, corte por plasma e por laser. De maneira a selecionar o processo que mais se adequa à peça a fabricar há que ter em conta a qualidade do acabamento da peça, a espessura, geometria e tipo de material a cortar, sem nunca esquecer os custos associados ao processo de corte [46].

2.2.1.1 Corte por jato de água

Este processo de corte consiste na projeção de um jato de água com diâmetros entre os 0,08 a 0,5 mm com velocidades entre os 600 a 900 mm/s numa chapa planificada. Este processo pode ser utilizado com água pura ou água com abrasivo no corte de metais duros até 300 mm de espessura (Figura 29) [46].

Este processo tem um excelente acabamento de corte e precisão e por vezes evita o acabamento posterior por maquinação, mas também é o processo de corte com o custo mais elevado do mercado.



Figura 29 - a) Bico de corte por jato de água [47]; b) princípio do processo de corte por jato de água [48]

2.2.1.2 Tecnologia de corte fino e puncionagem CNC

A tecnologia de corte fino ou de precisão é muito idêntica à de corte por puncionagem de controlo numérico computadorizado (CNC) (Figura 30). Estes dois processos consistem na fixação da chapa planificada a cortar e, por meio de um punção, é feito o corte com a forma desejada.

A grande diferença entre estes dois processos é que o corte por precisão (Figura 30 - a) utiliza um “cerra-chapas” com uma aresta de retenção, que impede completamente o movimento da chapa planificada, tem um acabamento de corte excelente, mas danifica a peça na zona da aresta. A puncionagem (Figura 30 - b) tem a vantagem de ter um cabeçote com várias ferramentas de várias geometrias, mas a fixação é efetuada manualmente pelo operador, pelo que existe o risco de escorregamento da peça no ato do corte.

Estes dois processos, devido à obrigatoriedade de terem ferramentas especiais para corte, são em grande parte utilizados no fabrico de peças em série de maneira a justificar o investimento. A puncionagem é utilizada também para execução de furos na maioria das empresas por todo o mundo [46].

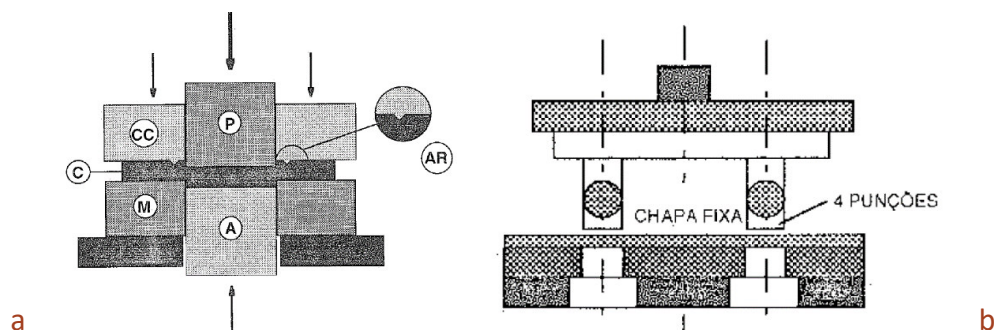


Figura 30 - Princípios de funcionamento dos processos de corte fino (a) e puncionadoras CNC (b) [46]

A Tabela 6 apresenta a nomenclatura ilustrada na Figura 30 - a.

Tabela 6 - Identificação da nomenclatura indicada na Figura 30 - a

A	Almofada	M	Matriz
C	Chapa	P	Punção
AR	Aresta de retenção	CC	Cerra-chapas

2.2.1.3 Corte por guilhotina

O processo de corte por guilhotina (Figura 31) consiste na movimentação, paralela ou oscilante, de um órgão móvel estrutural denominado por porta-lâminas (PL), onde é fixa a lâmina móvel. A estrutura fixa possui outra lâmina e uma base para colocação da chapa planificada. Com o auxílio de um sistema de calcamento, a chapa é fixa contra a base e contra a lâmina fixa, e é posicionada contra um órgão móvel rígido, esbarro posterior, à largura de corte requerido. Com a movimentação do PL, num certo ângulo em relação à base, a lâmina movel penetra a chapa e o material rompe por fratura.

Dos processos de corte, este é o de mais baixo custo devido à simplicidade de funcionamento e à limitação do corte ser apenas em linha reta, mas com a possibilidade de cortar formas poligonais, como por exemplo triângulos ou trapézios [49].

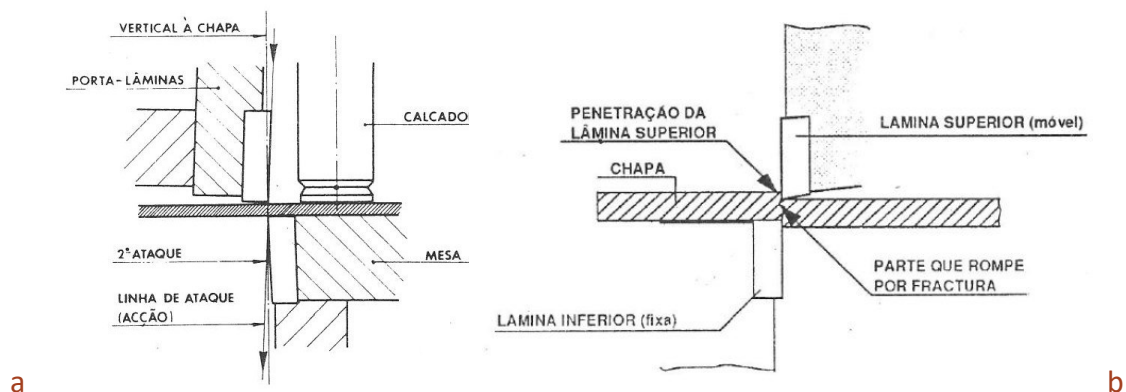
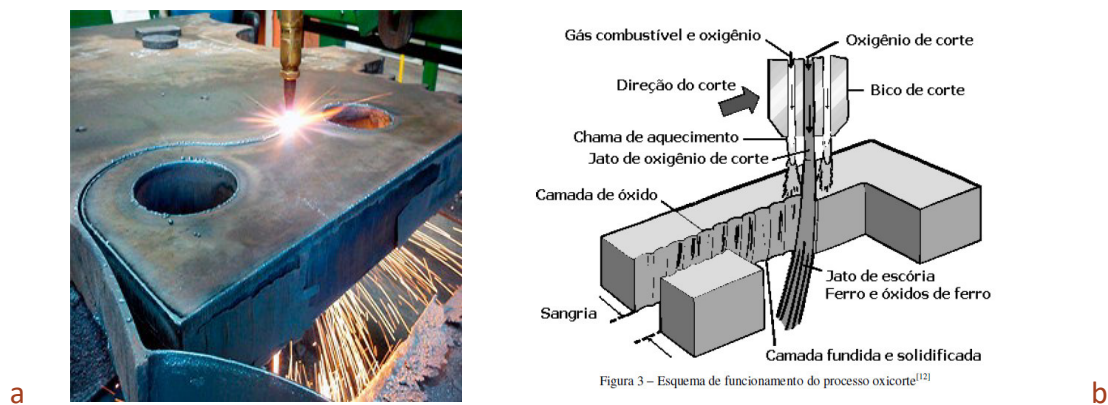


Figura 31 – a) Principais componentes de uma guilhotina; b) mecânica do corte por guilhotina [50]

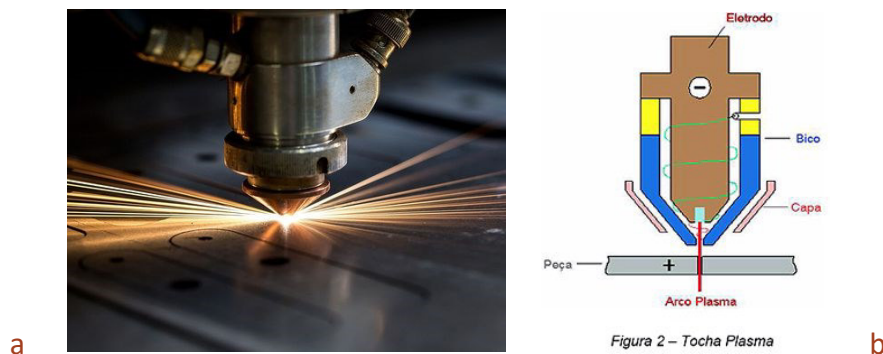
2.2.1.4 Corte por oxicorte

O corte por oxicorte (Figura 32) é o processo mais antigo de corte a quente de aço macio. Este processo consiste no aquecimento da chapa, através de um maçarico, até ao ponto de fusão. Com auxílio de um jato de oxigénio puro, juntamente com o gás combustível, tem lugar uma reação exotérmica na chapa que rompe o aço. O oxicorte é um processo com velocidades relativamente baixas, embora a presente capacidade de corte de chapas de grandes espessuras, requer pouca manutenção e apresenta um custo baixo [46].



2.2.1.5 Corte por plasma

O processo de corte por plasma (Figura 33) utiliza uma fonte de energia elétrica que cria um circuito condutor de eletricidade entre o bico do plasma e a chapa a cortar. No interior do bico, é gerado o arco do plasma que pré-aquece um gás inerte, em substituição do oxigênio. Por sua vez, o arco é expandido, e é acelerado através do orifício do bico de corte. O metal, no estado de fusão, é arrastado pela energia cinética da corrente de gás, efetuando o corte. Este processo de corte é mais dispendioso do que o oxicorte, mas com maior cadência, justificando o elevado investimento inicial [46].



2.2.1.6 Corte por laser

O corte por laser (Figura 34) é o processo com a melhor qualidade de corte do mercado e com excelente cadência. Ao contrário do plasma, este processo é livre de poeiras geradas pelo corte. O feixe de laser, em contacto com a chapa de metal, concentra-se num ponto de diâmetro inferior a 0,5 mm e aquece o material até este derreter ou vaporizar. Quando o feixe trespassar a chapa, dá-se então início ao corte [46].

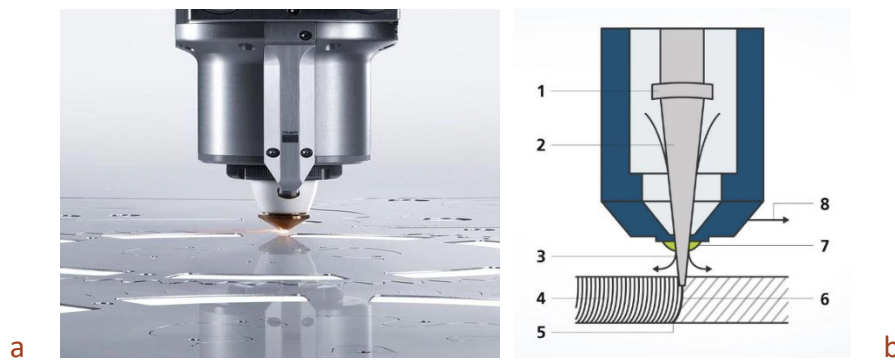


Figura 34 - a) Sistema de corte por laser; b) ilustração do processo de corte por laser [55]

De seguida, descreve-se em detalhe a identificação dos componentes indicados na Figura 34 [55]:

1. Ótica de focalização: óticas de lentes e espelhos focalizam o raio laser no ponto de processamento;
2. Raio laser: o raio laser encosta na peça e a aquece até que ela se derreta ou evapore;
3. Gás de corte: com ajuda do gás de corte, a fusão entre o feixe laser e o gás é soprada para fora da fenda de corte. O gás sai do bico com o raio laser de forma axial;
4. Sulcos de corte: durante o corte a laser, o canto de corte forma um típico padrão de sulco. Em velocidades de corte baixas, esses sulcos ficam praticamente paralelos ao raio laser;
5. Massa fundida: o raio laser – luz laser focada – é guiado pelo contorno e derrete o material localmente;
6. Frente de corte: na peça, a fenda de corte não é mais larga do que o raio laser focalizado;
7. Bico: o raio laser e o gás de corte chegam ao material através do bico de corte;
8. Direção de corte: ao movimentar o cabeçote de corte ou a peça numa determinada direção, é formada a fenda de corte.

2.2.2 Tipos de guilhotinas

Todos os tipos de guilhotinas são compostos pelos órgãos mencionados no capítulo 2.2.1.3. Em função do seu acionamento, as guilhotinas podem ser mecânicas ou hidráulicas.

2.2.2.1 Guilhotinas mecânicas

As guilhotinas mecânicas (Figura 35) são constituídas por um acionamento composto por um motor conectado a uma transmissão para acionar um volante de inércia. Uma

embraiagem que engrena o movimento do volante a um redutor aciona um sistema de biela-manivela, que por sua vez faz movimentar alternadamente o porta-lâminas.

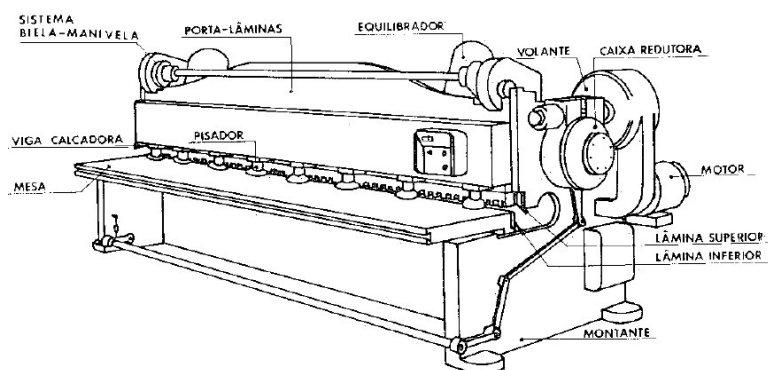


Figura 35 - Principais componentes de uma guilhotina mecânica [50]

Este tipo de guilhotina foi concebido inicialmente em estrutura de construção fundida. No entanto, devido à dificuldade de produção e fragilidade da estrutura, esta foi alterada para construção soldada. As principais vantagens da guilhotina mecânica são a cadência de cerca de 40 a 100 ciclos/min, motores de acionamento de baixa potência, devido à presença do volante de inércia que gera uma grande quantidade de energia acumulada, e grande velocidade de corte que minimiza a torção, a flecha e o arco, o que permite melhorar a qualidade do corte. Por sua vez, estas são máquinas de pouca segurança e, para além da dificuldade em implementar as exigências normativas, estas guilhotinas são propícias a acidentes em que as peças da cadeia cinemática rompem por excesso de carga. A substituição destes componentes possui um custo elevado devido ao custo de produção e de fabrico, dada à complexidade do sistema de acionamento [49].

Atualmente, este tipo de guilhotina é concebido para corte de baixas espessuras, até 6 mm de aço macio, e comprimentos de corte até os 3 metros [50].

2.2.2.2 Guilhotinas hidráulicas

As guilhotinas hidráulicas (Figura 36), tipicamente fabricadas em construção soldada, possuem um sistema de acionamento composto por um grupo hidráulico, um conjunto de válvulas de comando e dois ou mais cilindros de acionamento. Este tipo de guilhotina, em comparação com as mecânicas, tem um elevado índice de versatilidade, ou seja, graças ao seu sistema hidráulico, apresenta uma elevada capacidade de carga, tanto para corte como para calcamento da chapa, e também possibilidade de proteção absoluta contra sobrecargas. Desta forma, é evitada a rotura de alguns componentes que são imprescindíveis ao funcionamento da máquina. Além das vantagens mencionadas anteriormente, este tipo de guilhotina possui a facilidade de adaptação para cursos longos, para corte de chapas espessas e muito compridas [49, 50].

Com este tipo de guilhotina é possível cortar chapa até 40 mm de espessura e com comprimento de corte até 9 m. De maneira a melhorar a qualidade de corte, é possível construir este tipo de guilhotina com ângulo variável ou fixo, dependendo da espessura da chapa a ser cortada.

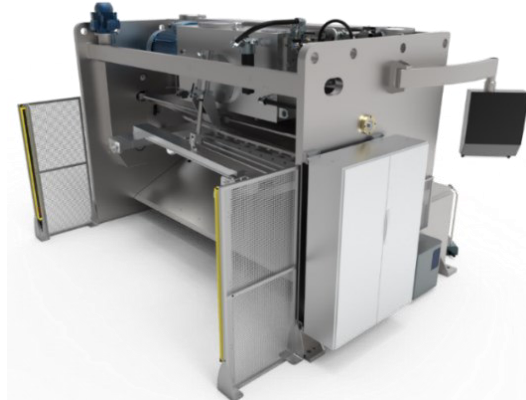


Figura 36 - Guilhotina de corte paralelo e de ângulo variável (elaboração própria)

2.2.3 Princípio do corte em guilhotina

A guilhotina tem como principal característica o corte realizado a frio, pelo que praticamente não afeta a resistência mecânica do material e conduz a um custo de processo relativamente baixo, como mencionado anteriormente. Existem dois métodos de corte, oscilante e paralelo, sendo que a guilhotina oscilante tem uma capacidade máxima de corte de chapa de aço macio até cerca de 12 mm espessura, e a de corte paralelo pode atingir o corte em chapas de 40 mm de espessura, mas acaba por ter um custo mais elevado [50].

2.2.3.1 Corte oscilante

As guilhotinas de corte oscilante caracterizam-se pelo movimento rotativo do porta-lâminas em torno de um fulcro (Figura 37), garantindo que no momento do corte a lâmina móvel fica praticamente perpendicular com o plano da chapa a cortar.

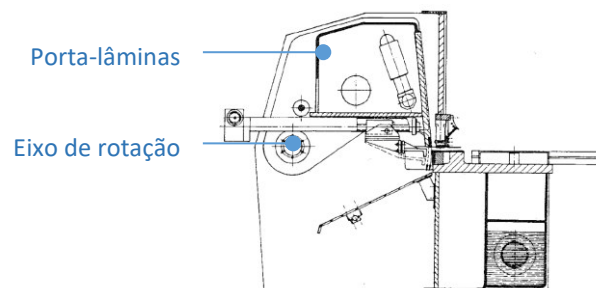


Figura 37 - Princípio de corte oscilante (adaptado de [50])

A lâmina móvel para guilhotinas de corte oscilante tem de ser de dois gumes, de maneira a evitar colisão da face mais comprida com a lâmina fixa no momento do corte. Devido ao movimento oscilante do porta-lâminas, quando a lâmina móvel entra em contato

com a chapa metálica, a face de maior comprimento está em ângulo obtuso com a chapa. No final do corte, a face da lâmina fica perpendicular com a chapa (Figura 38) [50].

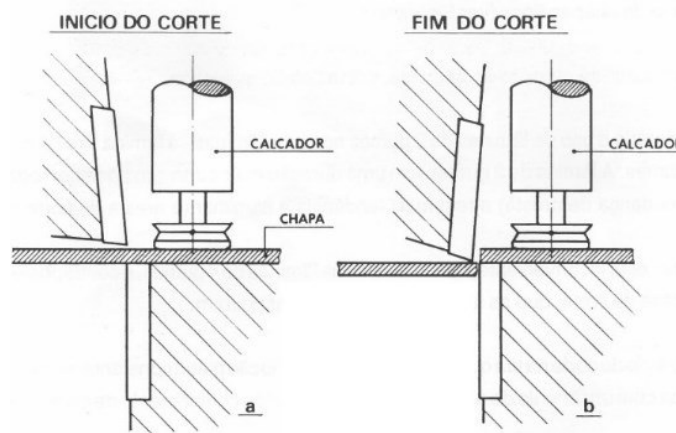


Figura 38 - Evolução do método de corte oscilante no início (a) e no fim do corte (b) [50]

2.2.3.2 Corte paralelo

O corte paralelo (Figura 39) consiste no corte da chapa com o movimento do porta-lâminas paralelo a um plano, o qual está inclinado entre $1,5^\circ$ a 2° com o plano da face de fixação da lamina fixa [50].

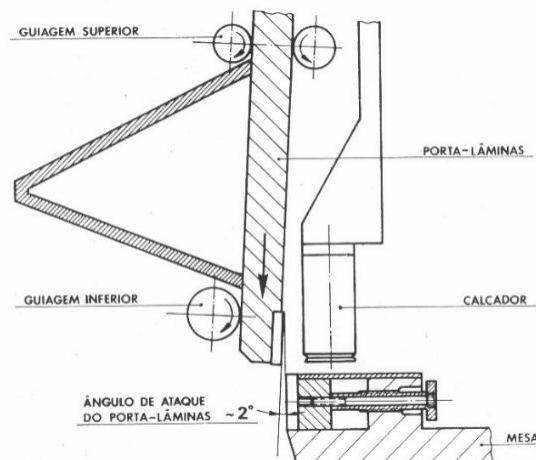


Figura 39 - Princípio de corte paralelo em guilhotina [50]

Com este método de corte, existe a possibilidade de variar o ângulo de corte. Neste âmbito, quanto maior for a espessura de chapa maior será o ângulo, sem perder a possibilidade de cortar chapa desde os 0,5 mm de espessura.

2.2.3.3 Principais diferenças entre os métodos de corte

O ângulo de ataque das lâminas móvel sobre a chapa a cortar é uma das principais diferenças entre o corte paralelo e o oscilante (Figura 40).

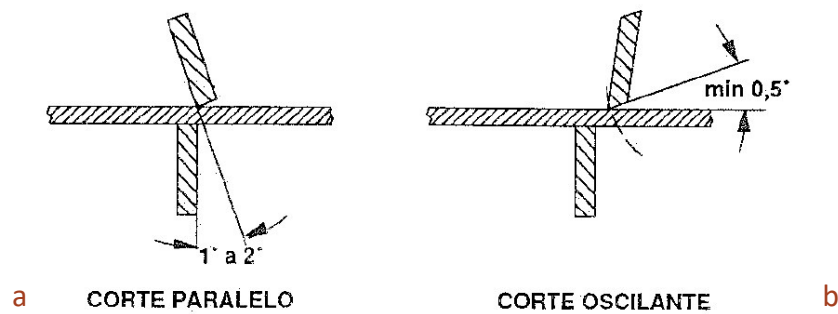


Figura 40 - Ângulo de ataque da lâmina móvel no método de corte paralelo (a) e oscilante (b) [50]

A escolha do tipo de corte tem um grande impacto na máquina, tanto no fabrico como na montagem e no custo. Na Tabela 7 indicam-se as principais diferenças que distinguem as máquinas por tipo de corte.

Tabela 7 - Principais diferenças entre guilhotinas com corte paralelo e oscilante (adaptado de [50])

Guilhotina de corte oscilante	Guilhotina de corte paralelo
Só pode utilizar lâmina móvel com 2 gumes	Possibilidade de utilizar a lâmina móvel com 2 ou 4 gumes
Capacidade de corte de aço até 12 mm	Capacidade de corte de aço até 40 mm
Devido ao movimento oscilante do porta-lâminas, o esbarro automaticamente recolhe, o que evita que a tira cortada fique presa	Necessária a aplicação de um cilindro de escamoteamento para evitar entalamento da chapa entre o esbarro e a lâmina fixa
Atuadores hidráulicos são iguais, sincronizados e alimentados num circuito hidráulico paralelo	Atuadores hidráulicos diferentes e alimentados em circuito hidráulico em série
Porta-lâminas de ângulo de corte fixo e com um limite máximo até 2°	Possibilidade de inclinação do porta-lâminas até um ângulo máximo de 3,75°
Guiamento do porta-lâminas feito num ponto, através de uma rótula auto-lubrificada em cada montante	Necessidade de guiamento em 3 pontos para manter o paralelismo do porta-lâminas durante todo o corte
Movimento oscilante e inclinação da face menor da lâmina móvel diminui a qualidade do corte	A lâmina móvel tem 4 ângulos retos, o que facilita a manutenção e melhora muito a qualidade do corte
Máquina mais simples, manutenção mais fácil e com custo baixo	Estrutura mais robusta e com mais órgãos móveis, mas implica custo mais elevado

2.2.4 Parâmetros mais importantes do processo

De seguida são destacados os parâmetros imprescindíveis para o dimensionamento de guilhotina hidráulica.

2.2.4.1 Ângulo de corte

O ângulo de corte corresponde ao ângulo de inclinação da aresta inferior (aresta de corte) da lâmina móvel com a aresta superior da lâmina fixa (Figura 41) no sentido do comprimento de corte. A colocação da lâmina em ângulo tem como principal fator a redução do esforço de corte e permite um corte progressivo ao longo do comprimento da chapa a cortar [49].

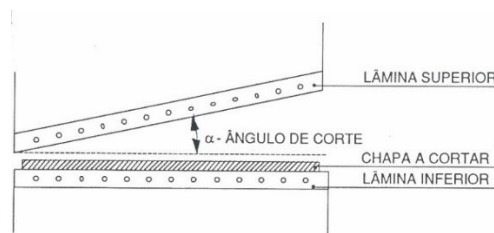


Figura 41 - Representação do ângulo de corte de uma guilhotina [50]

2.2.4.2 Força principal de corte

A força de corte (2) é calculada pela multiplicação da área de corte da chapa pela sua resistência, ou seja, quanto menor for a área mais reduzida será a força.

$$F_c = \frac{0,5 \times e^2}{\tan(\alpha_{ct})} \times \tau_{rot} \quad (2)$$

A Tabela 8 apresenta a nomenclatura utilizada na equação (2).

Tabela 8 - Identificação da simbologia da equação (2)

F_c	Força de corte [N]	α_{ct}	Ângulo de corte máximo (grau)
e	Espessura da chapa [mm]	τ_{rot}	Tensão de rotura ao corte [MPa]

Pode-se então afirmar que, ao aumentar a inclinação das arestas de corte entre lâminas, se diminui a área de corte num dado instante (Figura 42).

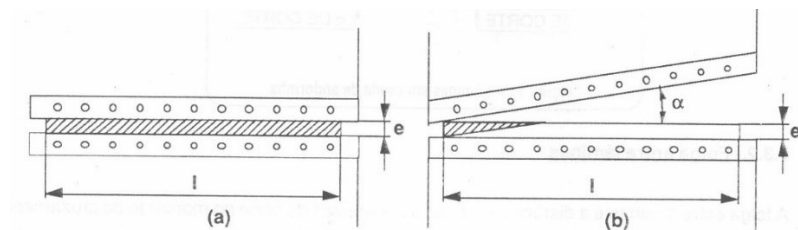


Figura 42 - Representação da área de corte sem ângulo (a) e com ângulo (b) [50]

Apesar da redução drástica da força de corte com o aumento de ângulo, este diminui a precisão de corte, ou seja, aumenta a presença de deformações da tira de chapa a cortar, tais como torção, arco e flecha. Além dos defeitos que possam ocorrer, dado que o porta-lâminas inclina, surge o aparecimento de esforços longitudinais durante o corte, que aumentam o escorregamento da chapa, pelo que se torna necessário um reforço do sistema de calcamento [50].

Contudo não se encontra tabelado o valor da tensão de rotura ao corte (τ_{rot}) mas sim a tensão de rotura do ensaio de tração uniaxial (σ_{rot}). Para relacionar os dois valores, sabe-se que o encruamento que o material sofre antes da rotura é maior para estados de tensão de corte puro, do que para tração uniaxial. Neste estudo a tensão de corte máxima surge numa secção com tensões normais (σ_n) de tração igual a metade da tensão de rotura, enquanto que para condições de corte puro se verifica em secções de tensões normais igual a 0. Nestas condições, é necessário corrigir o valor da tensão de rotura ao corte, sempre que a mesma for determinada a partir da tensão de rotura do ensaio de tração uniaxial. Então para cálculo da força de corte (2), tem de se corrigir o valor da tensão de rotura com o fator de correção (C), que não é mais do que o quociente entre as tensões de rotura [56], $C = \tau_{\text{rot}}/\sigma_{\text{rot}}$.

Na Tabela 9, mediante o tipo de material a cortar, pode-se selecionar o fator de correção a se usar. Normalmente, dado a complexidade estrutural das guilhotinas, é comum utilizar-se o valor de 0,7 [56].

Tabela 9 - Valores do fator de correção para a tensão de rotura mediante material a cortar (adaptado de [56])

Material	Valor de C
Alumínio	0,6 – 0,75
Latão	0,65 – 0,7
Cobre	0,65 – 0,7
Aço	0,7 – 0,8
Aço inoxidável	0,75 – 0,8

Então, corrigindo a equação para cálculo da força de corte, segundo Rodrigues e Martins [56], fica

$$F_c = \frac{0,5 \times e^2}{\tan \alpha} \times \sigma_{\text{rot}} \times C. \quad (3)$$

2.2.4.3 Precisão de corte

A análise da precisão de corte deve ser considerada mais à tira de chapa cortada porque devido à prensagem dos calcadores sobre a parte que fica apoiada na mesa da guilhotina

durante o corte, esta acaba por ser mais precisa. Já a tira cortada, devido ao seu peso próprio sem apoio, tem mais tendência a sofrer alguma deformação. De seguida descrevem-se os três tipos de deformação que podem ocorrer.

No defeito de torção (Figura 43 - a) a tira cortada enrola sobre forma de espiral. Este advém sobretudo dos ângulos de corte elevados e em tiras mais estreitas onde a secção resistente ao corte é menor. O arco ou *camber* (Figura 43 - b) acontece devido à existência de tensões residuais internas, que fazem com que a tira cortada seja separada, quase por arrancamento, do restante material por uma força perpendicular ao corte. Por fim, o defeito de flecha (Figura 43 - c) é muito comum em tiras largas devido ao elevado peso próprio e à falta de apoio da tira no sentido contrário ao corte, dando o aspeto de enrolamento na tira cortada [50].

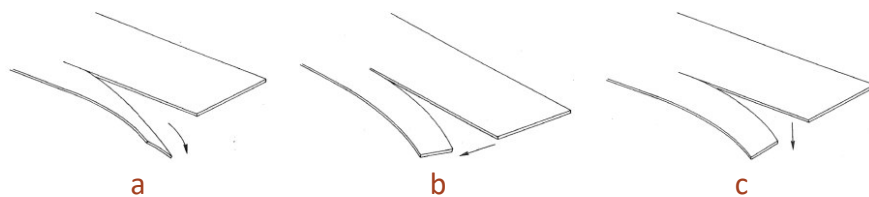


Figura 43 - Defeitos de torção de tiras de chapa, torção (a), arco (b) e flecha (c) [50]

2.2.4.4 Folga entre lâminas

A folga entre lâminas é a distância entre as arestas de corte, da lâmina móvel e da fixa, no momento em que estas se cruzam durante o processo. Uma regra aproximada a adotar para obter o valor da folga no corte de aço macio diz que se deve usar 10% da espessura do material [50], como se pode verificar na Figura 44.

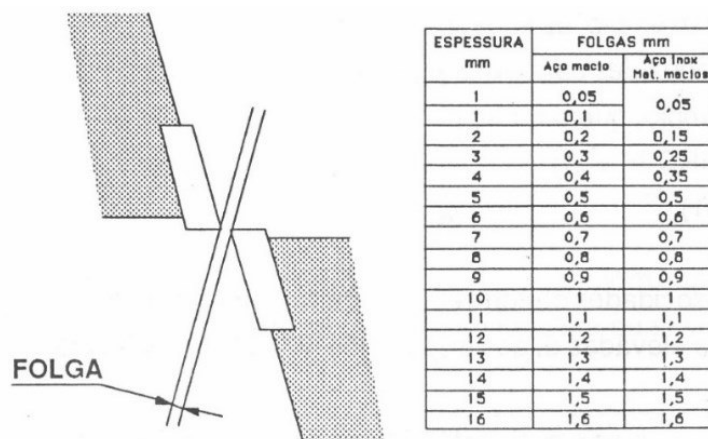


Figura 44 - Folgas recomendadas para corte de guilhotina [50]

O excesso de folga (Figura 45 - a) faz com que o material deslize nas arestas das lâminas, o que pode levar à sua danificação. Em corte de chapas finas pode ocorrer quinagem ou, se no caso de cortar o material, a tira surge com rebarbas. Existe também uma probabilidade menor de a guilhotina entrar em sobrecarga devido a entalamento do material entre lâminas.

Quando a folga é muito reduzida (Figura 45 - b) tem lugar um efeito de corte duplo, ou seja, a face cortada da tira irá ter duas superfícies distintas, uma lisa, efetuada pela lâmina superior, e uma áspera, efetuada pela lâmina inferior.

A folga deverá ser sempre ajustada em função da espessura e características do material, de maneira a obter o corte com a melhor qualidade possível (Figura 45 - c) [49].

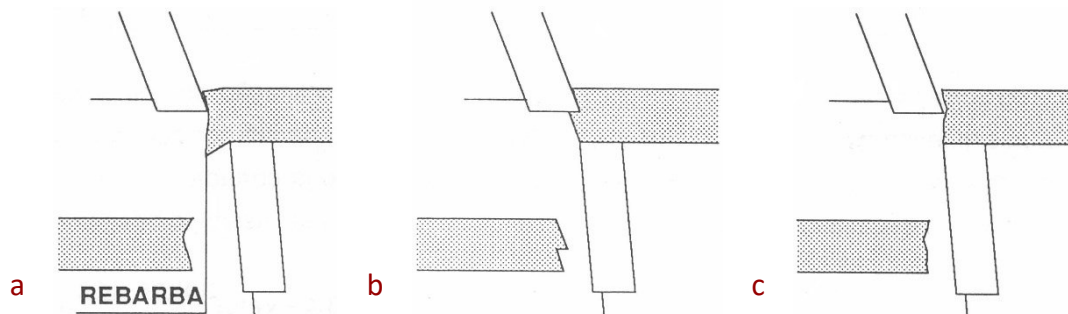


Figura 45 - Influência da folga entre lâminas [excessiva (a), reduzida (b) e correta (c)] [50]

2.2.5 Constituintes mais relevantes

As guilhotinas (Figura 46) são compostas por órgãos estruturais ou principais, que possibilitam a operação da máquina, e por equipamentos auxiliares, que complementam a máquina em termos de funcionalidade e segurança.

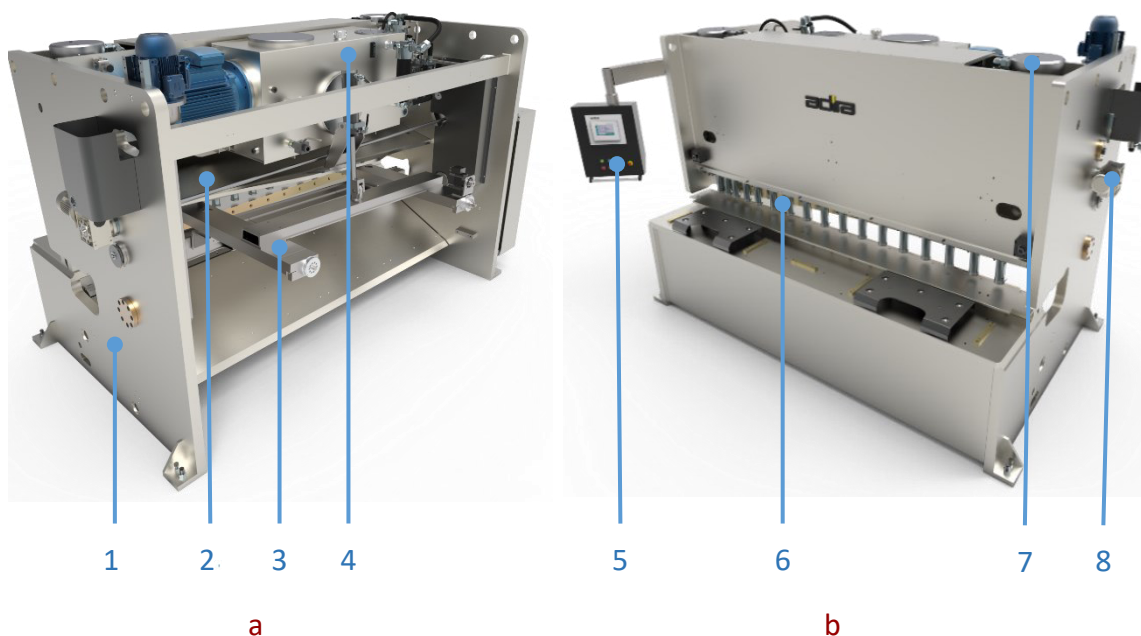


Figura 46 - Indicação dos constituintes mais relevantes de uma guilhotina [vista posterior (a) e frontal (b)] (elaboração própria)

A Tabela 10 identifica cada órgão principal indicado na Figura 46.

Tabela 10 - Identificação dos órgãos principais de uma guilhotina hidráulica

1	Estrutura monobloco	5	Sistema de controlo
2	Porta-lâminas	6	Sistema de calcamento
3	Esbarro posterior	7	Atuador hidráulico
4	Grupo hidráulico	8	Sistema de regulação da folga

2.2.5.1 Estrutura monobloco

A estrutura de guilhotinas hidráulicas é fabricada em construção soldada, monobloco, dimensionada de maneira a garantir a máxima rigidez. Após soldadura, a estrutura é sujeita a maquinação das zonas de ligação com outros órgãos [57].

A estrutura (Figura 47) é composta por dois montantes, o conjunto da chapa frontal soldado, que contém uma barra inferior para o sistema de calcamento, denominada de barra dos calcadores, e um caixão, para suportar os esforços de corte e a chapa a cortar.

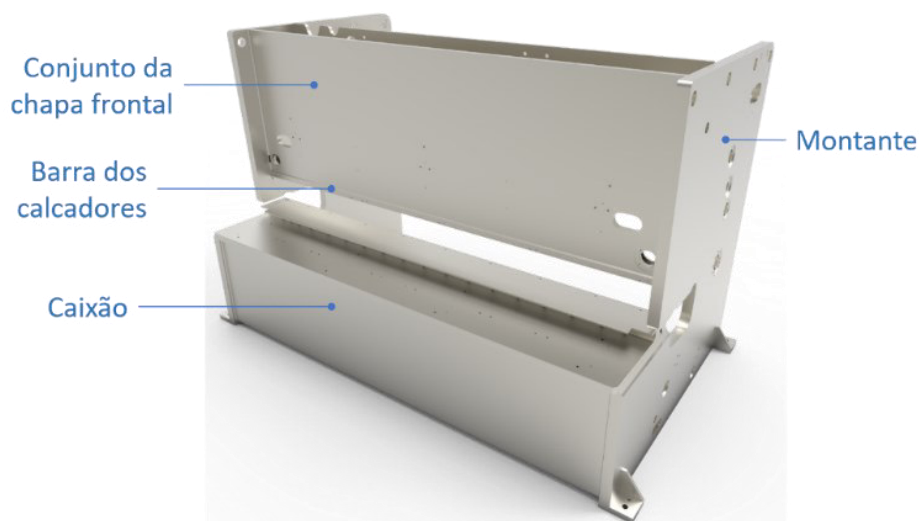


Figura 47 - Estrutura principal de uma guilhotina hidráulica (elaboração própria)

2.2.5.2 Porta-lâminas

O porta-lâminas (Figura 48) é um corpo de estrutura soldada, monobloco, dimensionado para aguentar os esforços de reação do corte e da carga aplicada pelos atuadores hidráulicos [57]. Esta estrutura é composta por dois montantes, apoiados nos guiamentos principais da máquina, um avental ou chapa frontal, onde se fixa a lâmina móvel, e reforços estruturais posteriores de maneira a elevar a sua rigidez e suportar o peso do esbarro posterior.

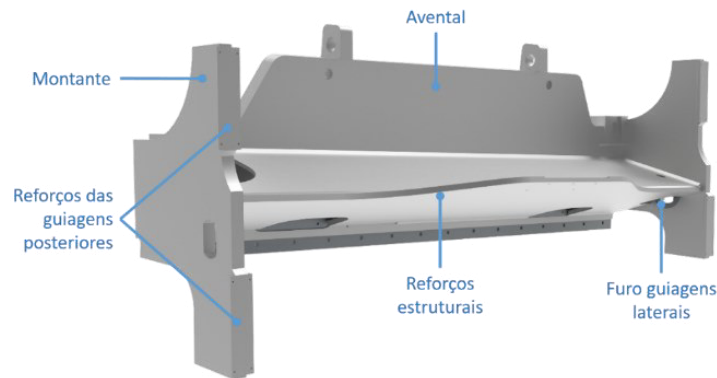


Figura 48 - Porta-lâminas de guilhotina hidráulica de grande capacidade (elaboração própria)

2.2.5.3 Atuadores hidráulicos

Os atuadores hidráulicos (Figura 49) são fixos à estrutura e articulados ao porta-lâminas, evitando o aparecimento de cargas transversais, e suportam o peso do porta-lâminas. Atuados hidraulicamente, estes podem ser aplicados num circuito hidráulico em série ou em paralelo. Estes atuadores são compostos por um cilindro retificado, um pistão/haste e, um conjunto de vedantes e juntas, que garantem o guiamento em todo o curso e inexistência de fugas de óleo [57].



Figura 49 - Atuador hidráulico de pistão (elaboração própria)

2.2.5.4 Grupo hidráulico

O grupo hidráulico (Figura 50), de construção simples, assegura o funcionamento da guilhotina a grandes cadências com consumo de energia reduzido, e garante proteção contra sobrecargas. Este grupo é composto por um conjunto acoplado de um motor elétrico de corrente alternada com uma bomba hidráulica, um depósito em aço e um bloco de válvulas para controlo do sistema [57].

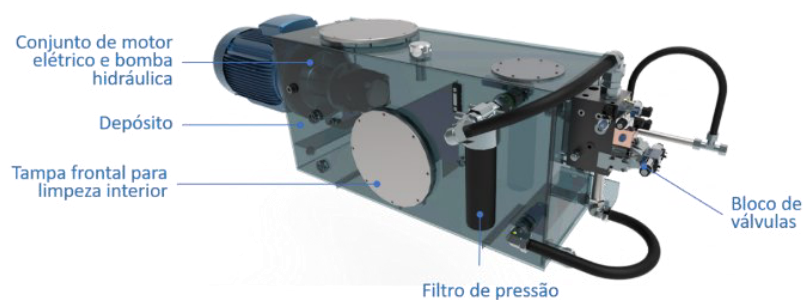


Figura 50 - Conjunto do grupo hidráulico (elaboração própria)

2.2.5.5 Esbarro posterior

O conjunto esbarro (Figura 51), responsável pelo cumprimento da largura solicitada da tira de chapa a cortar, é composto por uma régua, dois braços basculantes e dois suportes de fixação ao porta-lâminas.

A régua é um corpo soldado, com alguma complexidade de fabrico, posicionada para a frente da máquina e que recebe a tira de chapa a cortar. Os braços são fabricados tipicamente em corpo soldado, a partir de perfil normalizado, e são fixos ao porta-lâminas com auxílio dos suportes. Através de um sistema de transmissão mecânica por fusos, de esferas ou trapezoidais, fazem a movimentação da régua para o curso desejado [57].

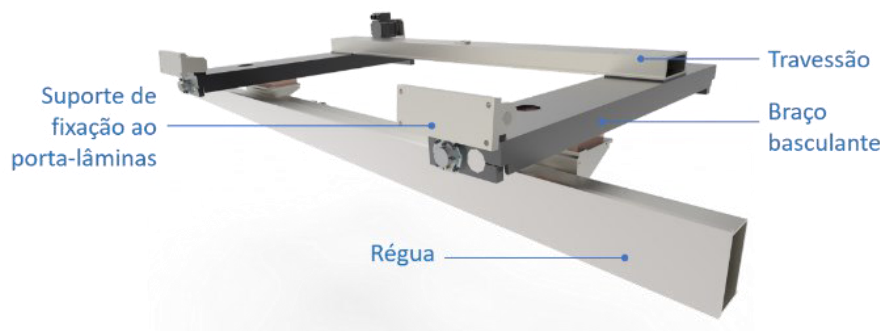


Figura 51 - Esbarro posterior de uma guilhotina (elaboração própria)

2.2.5.6 Sistema de regulação da folga

Este sistema pode ser aplicado em controlo manual ou motorizado (Figura 52), sendo que o último é o mais frequente nas guilhotinas atuais, também devido ao elevado peso estrutural do porta-lâminas. Este sistema motorizado, composto por um moto-redutor, um sistema de transmissão mecânica e um conjunto de guiamento excêntrico, é responsável pelo ajuste da folga entre lâminas e guiamento posterior inferior do porta-lâminas.

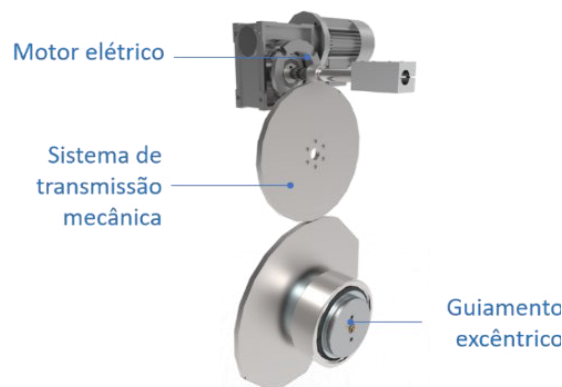


Figura 52 - Representação da regulação da folga motorizada com guiamento excêntrico de uma guilhotina de corte paralelo (elaboração própria)

2.2.5.7 Sistema de calcamento

O sistema de calcamento é composto por um conjunto de vários calcadores (Figura 53) acionados hidráulicamente e com o principal objetivo de garantir um eficaz calcamento da chapa, sem a danificar, impedindo o movimento da mesma durante todo o corte [57].

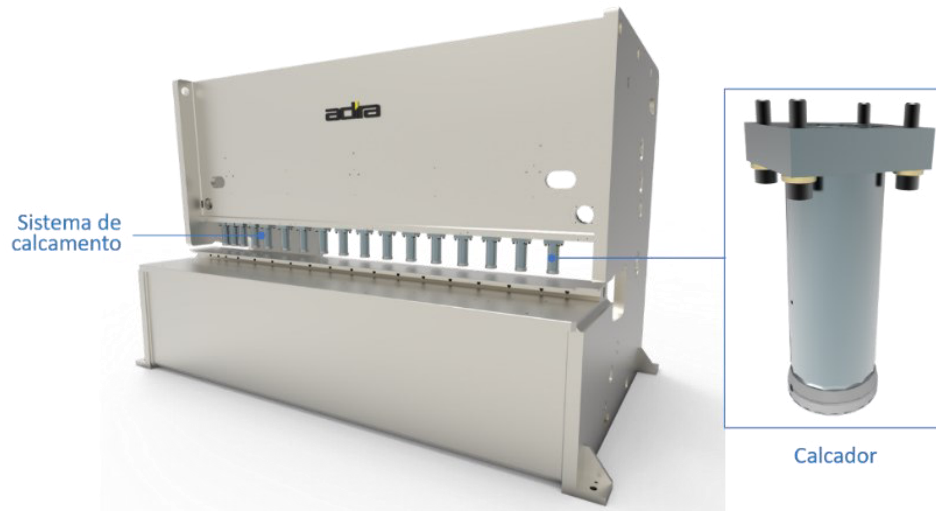


Figura 53 - Sistema de calcamento composto por um conjunto de calcadores hidráulicos (elaboração própria)

2.2.5.8 Sistema de controlo

Atualmente, devido sobretudo às exigências do mercado, o sistema de controlo é composto por um comando numérico (Figura 54), denominado também por *Direct Numerical Control* (DNC). Este comando é onde o operador da máquina insere todos os parâmetros necessários para corte, espessura, comprimento, largura e matéria-prima da chapa a cortar.



Figura 54 - Comando numérico de uma guilhotina ADIRA (elaboração própria)

2.2.6 Estado-da-arte dos processos de corte por guilhotina

Na Tabela 11 podem-se observar dois casos de estudo distintos referentes ao processo de corte por guilhotina de alumínio e aço.

Tabela 11 - Estado-da-arte de processos de corte por guilhotina

Autor(es)	Descrição da aplicação
Gasiorek et al. [58]	Devido à abundância de utilização do metal como matéria prima em muitas indústrias, cada vez mais é importante ter uma visão mais aprofundada do processamento do metal. Tal conhecimento é alcançado através de testes experimentais ou por calculo numérico. Este estudo vem demonstrar o rigor de cálculos por elementos finitos em relação a testes de corte efetuados em chapas de alumínio. O estudo da chapa a cortar foi feito em malha de elementos quadriláteros em 3 tamanhos distintos, com elementos de 0,1 mm (640 elementos finitos), 0,07 mm (1848 elementos) e 0,05 mm (6511 elementos). O teste experimental do corte foi feito em laboratório especial para testes com todo o material necessário para a medição dos resultados. O resultado obtido em laboratório foi de muito boa qualidade de corte, mas em ambiente industrial com uso de guilhotina, foi significativamente mais fraco. Em relação à comparação dos resultados experimentais com os calculados, o que mais se aproximou, foi a simulação com maior número de elementos (6511), com um desvio da força máxima de corte a rondar os 3%.
Oliveira [59]	Este estudo, realizado numa empresa de produção de materiais macios, baseia-se na melhoria do processo de corte por guilhotina de pontas e caudas das bobines de chapa de aço fino de maneira a melhorar a qualidade do corte e diminuir perdas e retrabalhos nos processamentos posteriores. A rebarba formada pelo corte pode aumentar quando submetida ao processo de laminação a frio, o que danifica os cilindros de trabalho e aumenta os custos de produção por trocas precoces dos cilindros. Com um estudo aprofundado do comportamento da chapa durante o corte, concluiu-se que a folga aplicada, de cerca dos 12% da espessura da chapa, estava não conforme. Após vários testes em chapas de diferentes espessuras, obtiveram-se rebarbas com alturas inferiores a 1,5% da espessura com aplicação de uma folga entre os 4 e 8% da espessura da chapa a cortar.

2.3 Dimensionamento mecânico de guilhotinas

Após cálculo dos parâmetros mais importantes do processo de corte por guilhotina, deve-se selecionar quais os materiais a serem utilizados e quais as normas que devem ser cumpridas de maneira a garantir um produto certificado, fiável e com qualidade.

2.3.1 Materiais comumente utilizados

O material mais comumente utilizado para fabrico das estruturas para guilhotinas é o aço ao carbono, definido pela norma EN 10025-2. Segundo esta norma, as designações mais comuns no mercado de chapas planificadas são o S235JR, S275JR e S355JR. Para os cálculos de dimensionamento estrutural o aço utilizado é o S275JR, dada a complexidade do sistema de corte por guilhotina e consequentemente a complexidade geométrica do corpo estrutural e porta-lâminas [60-62].

Na Figura 55 indicam-se as propriedades mecânicas dos aços mais comuns, segundo Eurocódigo 3, parte 1-1 (secção 3, Quadro 3.1) [63].

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

Figura 55 - Valores nominais das tensões para aços estruturais laminados a quente [63]

No caso de se utilizar em secções tubulares, as propriedades mecânicas são as indicadas na Figura 56.

Norma e classe de aço	Espessura nominal t do componente da secção [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550

Figura 56 - Valores nominais das tensões para secções tubulares em aço [63]

Na Tabela 12 identifica-se a simbologia ilustrada na Figura 55 e Figura 56.

Tabela 12 - Nomenclatura da simbologia da Figura 55 e Figura 56 [63]

Simbologia	Identificação
f_y	Tensão de cedência
f_u	Tensão de rutura
t	Espessura do material

2.3.2 Normalização aplicável

O estrutura da guilhotina e o corpo do porta-lâminas consistem em conjuntos soldados compostos por união de chapa planificada de aço, aos quais se aplica para produção as indicações do Eurocódigo 3 com base nas seguintes partes da norma NP EN 1993:

- NP EN 1993-1-1:2010
Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.
- NP EN 1993-1-8:2010
Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-8: Projeto de ligações.

As normas de segurança aplicáveis às guilhotinas, segundo o IPQ (Instituto Português da Qualidade) [64], abrangidas pela Diretiva Máquinas, que constam do comunicado da Comissão Europeia publicada no Jornal Oficial da União Europeia de 9 de março de 2018 [65] que publica os títulos e referências das normas harmonizadas atualmente em vigor, são as que se seguem:

- NP EN ISO 12100:2018
Segurança de máquinas — Princípios gerais de conceção — Avaliação e redução de riscos (ISO 12100:2010).
- EN ISO 13850:2015
Segurança de máquinas — Função de paragem de emergência — Princípios de conceção (ISO 13850:2015).
- EN ISO 13857:2008
Segurança de máquinas — Distâncias de segurança para impedir que os membros superiores e inferiores alcancem zonas perigosas (ISO 13857:2008).
- EN 13985:2003+A1:2009
Máquinas-ferramenta — Segurança — Guilhotinas.
- EN 60204-1:2018
Segurança de máquinas — Equipamento elétrico de máquinas — Parte 1: Requisitos gerais (IEC 60204-1:2016, modificada).

2.3.3 Verificação estrutural

O dimensionamento da estrutura e do porta-lâminas devem ser baseados em modelos de cálculo adequados aos estados limites que irão estar sujeitos, garantindo que ambos estão em equilíbrio com os esforços aplicados e que desempenham com eficácia as funções para os quais foram concebidos.

2.3.3.1 Métodos convencionais

O dimensionamento de uma guilhotina hidráulica, dado a sua complexidade geométrica, deve ser subdividida em vários conjuntos e tratados como vigas simplesmente apoiadas de maneira a poder simplificar os cálculos. A secção transversal a ter em conta nos cálculos é de classe 4, devido à permissão de uma pequena deformação durante o corte sem atingir a tensão de cedência, e sujeita a uma flexão composta.

Segundo Eurocódigo 3, Parte 1-1 (secção 6), no caso de secções transversais da Classe 4, e na ausência de esforço transversal, a tensão longitudinal atuante máxima $\sigma_{x,ED}$, calculada com base nas secções transversais efetivas, deve satisfazer o critério [63]:

$$\sigma_{x,ED} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4)$$

Como alternativa, pode ser utilizado o critério simplificado:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}}{W_{eff,y,min} \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Nz}}{W_{eff,z,min} \cdot f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (5)$$

Na Tabela 13 identifica-se a simbologia das equações.

Tabela 13 - Critério de satisfação da análise elástica de primeira ordem

Simbologia	Identificação
$\sigma_{x,ED}$	Valor de cálculo da tensão longitudinal atuante devida ao momento fletor e ao esforço normal [MPa]
γ_{M0}	Coeficiente parcial de segurança
A_{eff}	Área efetiva da seção transversal, quando submetida a compressão uniforme [mm ²]
$W_{eff,min}$	Módulo de flexão efetivo da secção transversal, quando submetida apenas a um momento fletor em relação ao eixo considerado [mm ³]
e_N	Afastamento dos centros de gravidade da área efetiva e bruta da seção transversal quando esta se encontra submetida à compressão [mm]

As solicitações mecânicas dos elementos subdivididos, como referido, são do tipo tração-compressão, flexão e torção, para isso, na Tabela 14 está representado as expressões de calculo de verificação estrutural para cada tipo de solicitação mecânica.

Tabela 14 - Expressões de cálculo das tensões para cada solicitação mecânica

Tração e compressão	Corte	Flexão	Torção
$\sigma = \frac{F}{A} < \sigma_{z,adm}$	$\tau = \frac{F}{A} < \tau_{z,adm}$	$\sigma_b = \frac{M \cdot y}{I} < \sigma_{b,adm}$	$\tau_t = \frac{M_t \cdot r}{I_p} < \sigma_{z,adm}$

O critério mais comum utilizado no dimensionamento das estruturas das guilhotinas é o é o de von Mises [56], por contemplar todas as tensões principais e considerar que a cedência se dá quando a energia de distorção de um estado bidimensional ou tridimensional de tensão ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) é igual à energia de distorção para o estado uniaxial de tração/compressão, e a sua equação é dada por:

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} = \sigma_{ced} \quad (6)$$

2.3.3.2 Método de Elementos Finitos

A aplicação dos métodos convencionais de dimensionamento em casos reais, nas quais a complexidade do projeto é bastante grande, é praticamente nula. No âmbito da engenharia de estruturas, o método de elementos finitos (MEF) vem facilitar imenso o cálculo dos estados de tensão e deformação de geometrias arbitrárias sujeitas a ações exteriores, os quais se designam como análise estrutural ou de estruturas [66].

Devido ao crescimento global da complexidade estrutural e à evolução dos computadores, o uso desta ferramenta é cada vez mais corrente. A formulação do MEF pode ser aplicada em análises de tensões ou deformações, análise de transferência de calor e mecânica dos fluidos, entre outras [67].

A base do MEF consiste na divisão do corpo em elementos de dimensões finitas, ligados por nós, ao qual se designa por malha. Mediante a geometria a analisar, a malha pode ser mais refinada nas zonas críticas, isto é, os elementos finitos podem ter dimensão inferior nas zonas em que o corpo tenha pequenos detalhes [66, 67].

Na Figura 57 pode-se observar um exemplo de refinamento de malha devido a um pequeno entalhe presente na geometria do elemento estrutural a analisar. Neste caso específico o entalhe tem de ser contemplado, logo deve ser retratado no modelo computacional. Contudo, se possível, pequenos detalhes, como pequenos furos, interferências entre peças ou arestas vivas, devem ser eliminados de maneira a ter uma simulação mais rápida e leve [68].

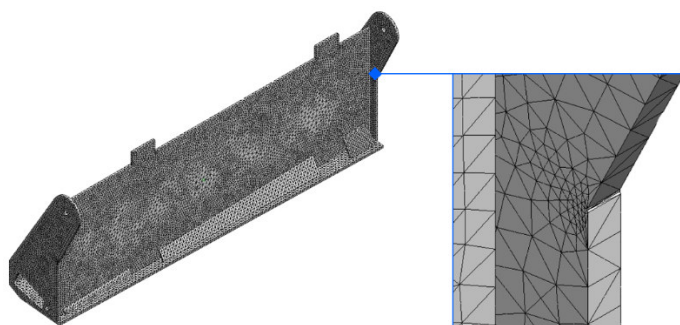


Figura 57 - Exemplo de refinamento de malha em estudo por elementos finitos de um porta-lâminas de uma guilhotina hidráulica (elaboração própria)

Muitas empresas optam pela obtenção de *softwares* de modelação capazes de resolver as operações matemáticas associadas. Atualmente no mercado pode-se encontrar o SolidWorks®, Inventor® e Solid Edge®, que são ferramentas desenvolvidas para desenho CAD, com opção de ferramenta de simulação integrada, ou o Abaqus®, Ansys® ou Nastran®, que são *softwares* mais dedicados à simulação por elementos finitos.

2.3.4 Estado-da-arte do projeto de guilhotinas

Na Tabela 15 podem-se observar dois estudos desenvolvidos no âmbito de guilhotinas hidráulicas. Estes estudos consistem na melhoria do corpo estrutural e no desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao corte de chapa fina de aço.

Tabela 15 - Estado-da-arte do projeto de guilhotinas hidráulicas

Autor(es)	Descrição da aplicação
Araújo et al. [69]	No processo de corte de chapas finas por guilhotina hidráulica pode-se observar que, na fase final do corte, existe uma pequena porção de material não cortado que suspende a tira de aço só cortado, o que causa a deformação da tira cortada. De maneira a evitar esta deformação, foi desenvolvida uma ferramenta periférica da máquina, que se designa por mesa de apoio de chapas finas. Foram consideradas várias soluções, como por exemplo a utilização de cilindros de membrana, apoios flexíveis e em formatos de tesoura, uma plataforma de atuação pneumática e outra fixa à lamina superior e um sistema de molas. O sistema adotado foi o da plataforma com acionamento pneumático, composta por uma plataforma em corpo soldado acionada por quatro cilindros pneumáticos, por sua vez guiados por um sistema externo aos cilindros. Esta ferramenta sustenta a tira de chapa durante todo o corte de maneira automatizada. Concluiu-se que, para além do sucesso a evitar a deformação da tira cortada, o impacto económico da máquina foi minimamente afetado.

Marques [70]

Este estudo, realizado em parceria com a empresa Tomás Castro Silva Lda., teve como principal objetivo a melhoria do comportamento mecânico do corpo estrutural de uma guilhotina, que teve como base um modelo de estrutura já existente no mercado. Foi feita uma análise estática e dinâmica da estrutura submetida ao esforço de corte com recurso aos *softwares* SolidWorks® e Ansys®, e os resultados comparados com a estrutura física através de uma análise experimental. Constatou-se que, ao reforçar a espessura e modificar a geometria de alguns dos elementos que compõem a estrutura, é possível obter uma diminuição a rondar os 50% a nível das deformações do corpo. De reforçar que todas estas alterações impostas não incrementaram qualquer custo nem peso ao corpo e que, a nível do desempenho, igualaram a concorrência no respetivo mercado de guilhotinas hidráulicas.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Caracterização da entidade acolhedora
- 3.2 Evolução da guilhotina ADIRA
- 3.3 Objetivos do trabalho
- 3.4 Requisitos e limitações
- 3.5 Metodologia a seguir
- 3.6 Aplicação da ferramenta *Lean DfX*
- 3.7 Projeto/resultados
- 3.8 Processos de fabrico e materiais
- 3.9 Desenhos de pormenor
- 3.10 Custos e retorno de investimento

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Caracterização da entidade acolhedora

A Adira Metal Forming Solutions S.A., empresa de sociedade anónima pertencente ao grupo Sonae Capital, SGPS, S.A., é um fabricante e fornecedor global de soluções de engenharia, especializado na produção de quinadoras hidráulicas, elétricas e híbridas, guilhotinas hidráulicas de corte paralelo e oscilante, e comércio de máquinas de corte laser de marca *MC Machinery Systems, Inc.*, uma subsidiária da *Mitsubishi Corporation*.

A história da marca Adira (Figura 58) remonta a 1956 na Rua António Bessa Leite nº1000 na cidade do Porto, Portugal. No entanto, e após a reestruturação ao nível acionista e de produção em 2017, as instalações da fábrica situam-se agora na Rua das Lages nº 67 em Vila Nova de Gaia, Portugal.



Figura 58 - Logotipo atual da marca ADIRA [71]

Atualmente, as principais competências da empresa centram-se no desenvolvimento das suas máquinas, montagem, assistência técnica e vendas. Presente pelo mundo todo, a ADIRA marca mais presença a nível Europeu (Figura 59) e é representada em mais de 30 mercados, o que faz com que a produção seja grande parte para exportação.



Figura 59 - Presença da ADIRA no mundo [71]

A Figura 60 apresenta o organograma da empresa ADIRA, fornecido pelo departamento de recursos humanos. De referir que a hierarquia apresentada apenas faz referência à empresa ADIRA e não aos departamentos pertencentes ao grupo Sonae Capital.

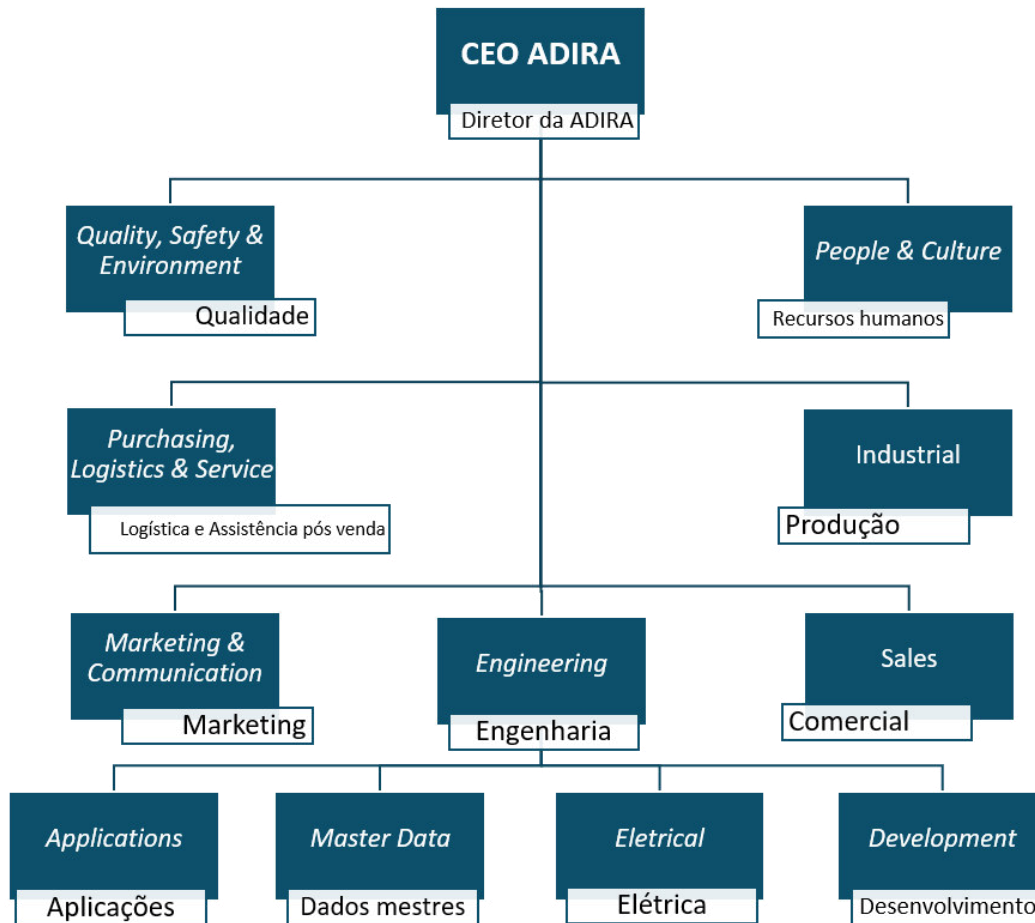


Figura 60 - Organograma da empresa ADIRA

O tema deste trabalho enquadra-se no departamento de engenharia, no grupo responsável pelo desenvolvimento, tendo intervenção e apoio dos departamentos da produção, logística e qualidade.

3.2 Evolução da guilhotina ADIRA

A primeira guilhotina de corte paralelo desenvolvida pela ADIRA, designada por GHV (guilhotina vertical ou de corte paralelo) surgiu nos meados dos anos 60, com acionamento mecânico. Entretanto, esta sofreu algumas alterações, nomeadamente na aplicação do acionamento hidráulico nos anos 80 (Figura 61).



Figura 61 - Primeira guilhotina mecânica desenvolvida pela ADIRA [71]

Nos finais dos anos 90 e início do novo milénio, esta máquina sofre o primeiro e último desenvolvimento sendo designada inicialmente por GVX (Figura 62). Foi desenvolvido o corpo estrutural e revisto todos os órgãos principais de funcionamento com o destaque para a utilização de um comando numérico com visor. Atualmente esta máquina-ferramenta denominada apenas por GV, é considerada uma das máquinas mais robustas e fiáveis da empresa, mas com um elevado custo de fabrico, dada a complexidade estrutural.



Figura 62 – Primeira guilhotina GVX desenvolvida pela ADIRA (arquivos fotográficos da ADIRA)

Este modelo GV divide-se em três gamas de espessuras de chapa a cortar, 16, 20 e 25 mm, e com comprimentos nominais de corte de 3, 4 e 6 metros. Assim sendo, na Figura 63 pode-se observar as gamas deste produto consideradas como normalizadas para venda ao público. De salientar, que apesar de só ser destacado 4 gamas deste modelo, é possível obter as mencionadas anteriormente, sendo considerado como máquina especial.

GV		GV 1630	GV 1660	GV 2030	GV 2530
Capacidade corte (ângulo de corte máx.)					
Aço macio (45daN/mm ²)	mm	16	16	20	25.5
Aço inoxidável (70daN/mm ²)	mm	10	10	14	17
Capacidade corte (ângulo de corte normal)					
Aço macio (45daN/mm ²)	mm	13	13	16	20
Aço inoxidável (70daN/mm ²)	mm	8	8	10	14
Comprimento de corte	mm	3050	6100	3050	3050
Cava dos montantes	mm	410	410	410	410
Ângulo de corte					
0,5° a nominal	graus	2	1.5	2	2
0,5° a máximo	graus	3.5	2.75	3.5	3.5
Ajuste de folga entre lâminas	mm	0,05 - 2,5	0,05 - 2,5	0,05 - 3	0,05 - 3,5
Potência do motor eléctrico	kW	30	30	37	45
Número de caldeadores	–	16	31	16	16
Força de calcamento	ton	45	76	58	95
Curso do Esbarro	mm	1100	1100	1100	1100
Frequência de corte					
Ângulo de corte normal	cortes/min.	16 a 32	8 a 17	13 a 25	9 a 17
Ângulo de corte máximo	cortes/min.	10 a 25	5 a 13	9 a 21	6 a 14
Dimensões (Maq. CE)					
Comprimento	mm	4150	7240	4170	4250
Largura	mm	2370	2370	2370	2370
Altura	mm	2550	2770	2550	2730
Peso Aproximado	Kg	16000	35000	17000	23000

Figura 63 - Especificações das gamas normalizadas da GV da marca ADIRA [4]

3.3 Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho consiste no desenvolvimento da guilhotina hidráulica de corte vertical, GV, principalmente pelo facto de que o processo de engenharia desta máquina esta desatualizado, tanto ao nível dos desenhos técnicos dos grupos funcionais como a métodos de fabrico dos conjuntos aplicados. Após um breve estudo da comercialização deste modelo de guilhotina nos últimos anos, optou-se pela melhoria da gama para corte de chapa até 20 mm com 3 metros de comprimento, a qual se designa por GV2030.

Neste sentido, são traçados vários objetivos iniciais:

- Desenvolvimento do corpo da estrutura e do porta-lâminas ao nível do fabrico;
- Uniformização das gamas para reduzir a quantidade de componentes diferentes entre gamas do modelo GV;
- Diminuir ou manter o custo de produção da máquina;
- Idealizar uma guilhotina inovadora a nível dos grupos funcionais;
- Incrementar automatismo ao nível de comando da máquina;
- Novo design com aspeto inovador que se destaque no mercado.

3.4 Requisitos e limitações

O desenvolvimento da nova máquina GV deve obedecer aos requisitos mencionados de seguida e pelos impostos empiricamente por limitações do equipamento. Após um estudo da atual máquina GV2030, seguindo os objetivos iniciais impostos, e consequente *brainstorming* com os operários intervenientes no fabrico e montagem destas guilhotinas, foram indicados alguns pontos necessários de intervenção. Foi então elaborado um conjunto de requisitos mais detalhados, por grupos funcionais da máquina, a considerar no desenvolvimento da nova GV.

Neste sentido, foram delineados os seguintes requisitos:

❖ **Corpos da estrutura e do porta-lâminas**

- Evitar pré-maquinações das peças constituintes dos corpos soldados da estrutura e do porta-lâminas, de maneira a evitar deslocações entre a Adira e o respetivo fornecedor até à entrega dos conjuntos finais soldados;
- Minimizar a complexidade, a nível do fabrico, do corpo do porta-lâminas, devido à complexidade da soldadura do avental em ângulo próprio e a maquinação do corpo em ângulos complexos (Figura 48);
- Diminuir as dimensões finais da estrutura de maneira a evitar que o produto seja expedido por transporte especial e que o cliente necessite de efetuar fosso nas fundações;
- Uniformizar a estrutura o máximo possível de maneira a que esta esteja preparada para equipar qualquer opcional, com o principal intuito de minimizar diferentes referências da mesma gama e para uma possível aplicação de sistema opcional após a venda da mesma. Devido à elevada complexidade de montagem, os opcionais a considerar são os de maior impacto funcional, como mesa de apoio de chapas finas e o sistema de anti torção (Figura 64), ambos aplicados por baixo da rampa de descarga (Figura 71 - 6);
- Eliminar os guiamentos laterais do porta-lâminas, dado o facto de ser uma das implicâncias de pré-maquinação, e colocar um guiamento central.



Figura 64 - Vista em perspetiva dos sistemas de mesa de apoio de chapas finas (a) e de anti torção (b)

❖ Atuadores hidráulicos principais

- Uniformizar os tamanhos dos cilindros para se poder aplicar entre as várias gamas do modelo;
- Utilização de tubo retificado normalizado para o corpo dos cilindros de maneira a evitar, o máximo possível, fabrico a partir de varão ou chapa planificada de aço;
- Pistão e haste em peças separadas e utilização de varão cromado normalizado;
- Uniformização dos pistões entre as várias gamas;
- Estudar possibilidade de diminuição do ângulo máximo de corte de maneira a diminuir o curso dos cilindros, o que consequentemente possibilita a diminuição da altura da estrutura;
- Rever a amarração dos cilindros ao porta-lâminas de maneira a facilitar a montagem dos conjuntos e evitar maquinação das amarras, para garantir o nivelamento, após a montagem (Figura 65).

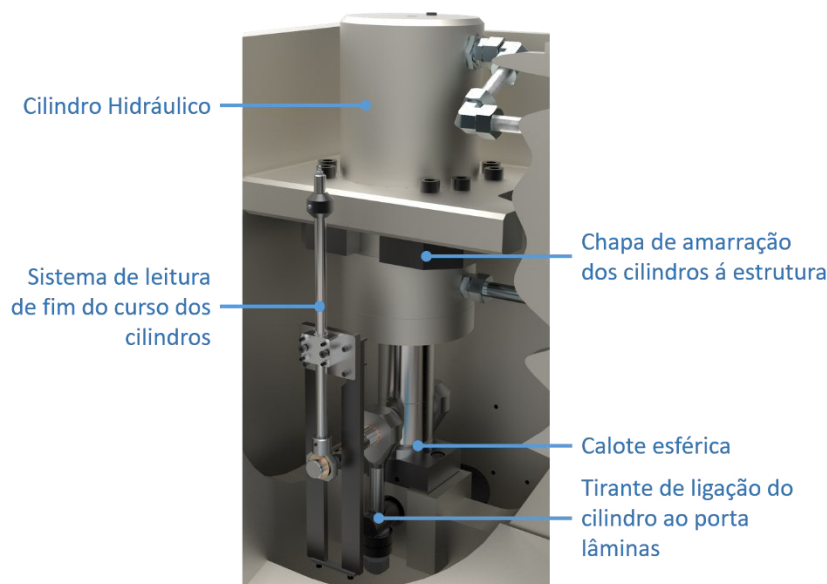


Figura 65 - Detalhe de uma vista em corte do sistema de amarração dos cilindros ao porta-lâminas

❖ Circuito hidráulico principal

- Uniformização do grupo energético para todas as gamas GV ao nível do conjunto bomba-motor (Figura 50);
- Estudar possibilidade de alteração do tipo de bomba, com o intuito de minimizar o ruído e reduzir o preço, ou utilização de dupla bomba para diminuição de cilindrada individual e respetivo custo;
- Estudar possibilidade de diminuição de volume do depósito de maneira a tornar a máquina mais ecológica;
- Colocação permanente de um permutador de calor com o intuito de facilitar a diminuição do volume do depósito;
- Filtro de ar de substituição rápida para evitar parar a máquina quando for necessário a manutenção do mesmo;

- Uniformização do bloco principal de válvulas para todas as gamas GV;
- Rever a montagem do circuito hidráulico e otimizar a disposição dos respectivos blocos hidráulicos de segurança na máquina, devido à falta de espaço para o operador poder manipular os acessórios hidráulicos mais facilmente (Figura 66).

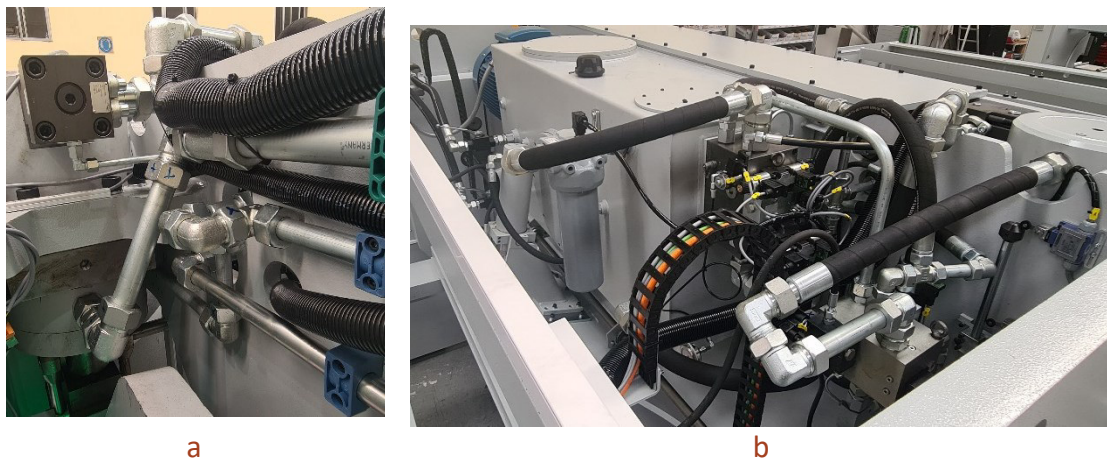


Figura 66 - Exemplo de um circuito hidráulico de uma GV2030, a) Ligação ao cilindro hidráulico esquerdo e calçadores, b) grupo energético e ligações ao bloco principal

❖ Guiamentos principais do porta-lâminas

- Rever e melhorar, se possível, os guiamentos superiores, inferiores e frontais, de maneira a evitar o sobredimensionamento;
- Estudar possibilidade de alteração dos guiamentos laterais do porta-lâminas;
- Estudar a possibilidade de troca dos rolamentos em aço por casquilhos de bronze ou poliméricos;
- Rever o conjunto de guiamentos inferiores ou sistema de regulação da folga, de maneira a facilitar a montagem do conjunto. Devido à necessidade de transmissão entre o guiamento aplicado no lado esquerdo e o direito da máquina, existe uma possibilidade de colisão com o cilindro de escamoteamento ou com porta-lâminas (Figura 67).

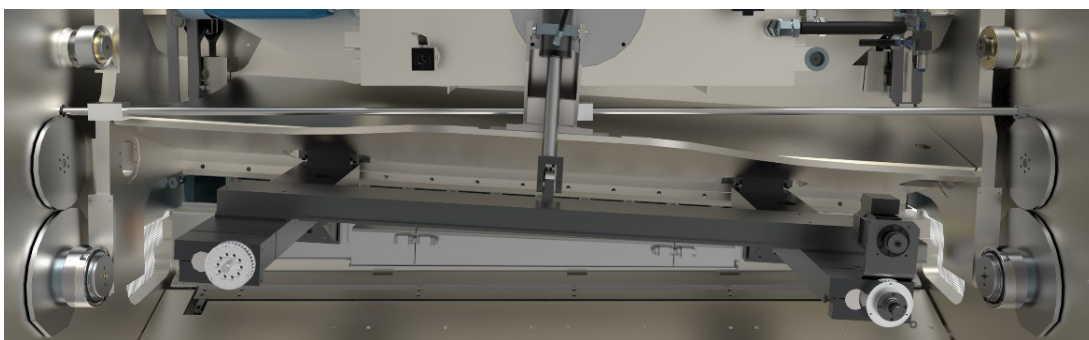


Figura 67 - Vista posterior da máquina com destaque do veio de ligação de transmissão mecânica do sistema de regulação da folga

❖ Esbarro posterior

- Possibilidade de evitar a retração do esbarro durante o processo de corte de tiras de aço de pouca largura, dado o facto de que no corte das tiras de espessuras grandes, implica a utilização do ângulo máximo de corte, o que faz que ao cortar em todo o comprimento útil o esbarro seja “obrigado” a recuar para evitar colisão com a rampa de descarga (Figura 68);
- Uniformização da régua do esbarro, para que esta possa ser aplicada em todas as gamas com o mesmo comprimento (Figura 51).

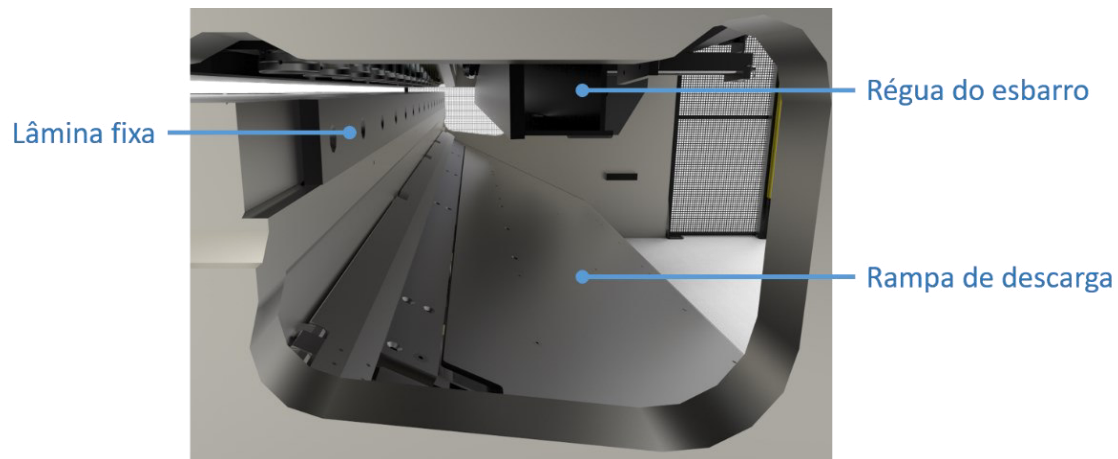


Figura 68 - Vista lateral de uma GV da posição da régua do esbarro antes de iniciar o corte

❖ Conjuntos opcionais da máquina

- Estudar a possibilidade de aplicação de sensores elétricos para medição automática do comprimento e espessura de chapa a cortar, com o intuito de automatizar o processo de corte;
- Estudar a possibilidade de modificação do sistema de mesa de apoio de chapas finas (MACF) ao nível da montagem, ou apresentação de um novo sistema (Figura 64 - a);
- Alteração do sistema atual de linha de corte, atualmente composto por iluminação LED e um cabo de aço a todo o comprimento, para um sistema inovador com componentes de alta precisão no mercado, tipo laser por exemplo (Figura 69);
- Rever o sistema de anti torção para utilização de cilindros normalizados e respetiva montagem, com principal objetivo de redução do custo (Figura 64 - b).



Figura 69 - Linha de corte destacada pela sombra do cabo de aço iluminado por LED verde

3.5 Metodologia a seguir

A abordagem seguida neste trabalho encontra-se dividida em duas principais fases, a de desenvolvimento do produto, com a respetiva apresentação e descrição das alterações realizadas, e verificação das melhorias entre a máquina de base e a proposta através da ferramenta lean, LDfX. O objetivo da utilização desta ferramenta é permitir identificar quais os conjuntos melhorados que necessitam de mais intervenção. Assim, este trabalho de dissertação envolveu a realização das seguintes atividades:

- Pesquisa de bibliografia sobre máquinas de ferramentas para corte e respetivo enquadramento no trabalho a desenvolver, e pesquisa sobre as ferramentas de *Lean Management*, com foco no desenvolvimento de produto;
- Análise pormenorizada da situação atual da máquina GV2030, consultando os intervenientes diretos da empresa neste modelo de máquinas, desde a conceção até à expedição;
- Identificação e planeamento das ações de melhoria;
- Desenho das ideias, através do *software* Solid Edge®, propostas para o desenvolvimento do produto;
- Comparação dos resultados das implementações com a atual máquina, desde o custo de fabrico, montagem e expedição a tempos de fabrico e montagem;
- Verificação dos resultados e cumprimentos dos objetivos propostos;
- Atuação sobre o processo de melhoria para correção ou prevenção de eventual não cumprimento de objetivos;
- Escrita do presente relatório.

3.6 Aplicação da ferramenta *Lean DfX*

A aplicação desta ferramenta visa ilustrar de forma intuitiva quais os conjuntos que, comparando com a atual, cumprem com os requisitos impostos para o novo modelo. Para isso, faz-se uma breve apresentação da situação atual da máquina para facilmente compreender as melhorias.

3.6.1 Descrição do equipamento inicial

Na Figura 70 estão representados e indicados os conjuntos principais do equipamento atual de modelo GV2030 versão 2.0.

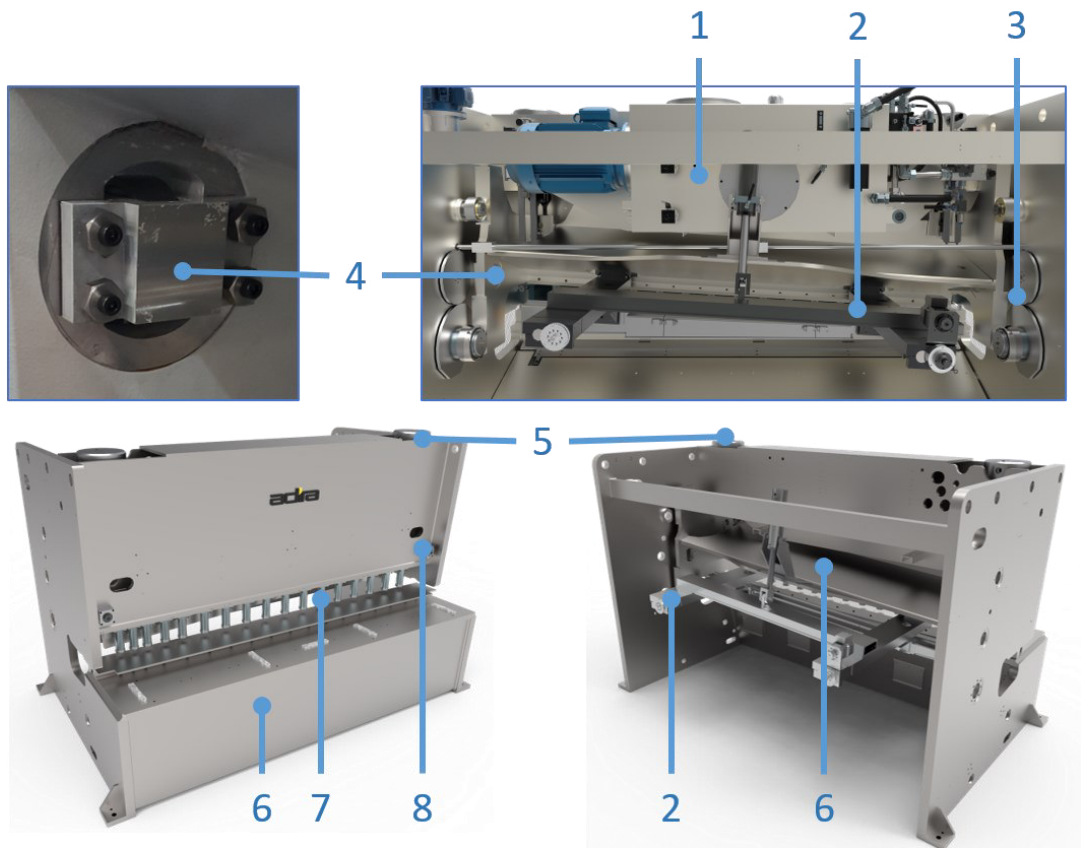


Figura 70 - Detalhe dos conjuntos principais que constituem o modelo 2.0 da GV2030

Na Tabela 16 segue descrição dos conjuntos indicados.

Tabela 16 - Identificação dos conjuntos indicados na Figura 70

Item	Descrição	Função
1	Grupo energético	Grupo hidráulico de bomba de engrenagens acionada por um motor CA, com uma capacidade de 470 litros de óleo e capaz de gerar uma pressão nominal de 250 bar.
2	Conjunto esbarro	Conjunto composto por dois braços em perfis normalizados UPN e uma régua frontal reforçada com um limite de curso máximo de 1000 mm e comprimento de 3000 mm. Em detalhe na Figura 51.

3	Conjunto de guiamentos posteriores	Conjunto constituído por guiamentos superiores e inferiores que impedem o movimento longitudinal posterior do porta-lâminas durante o corte e guiamento no movimento ascendente e descendente do mesmo.
4	Guiamento lateral	Impede colisão transversal do porta-lâminas com o montante da estrutura.
5	Atuadores hidráulicos	Composto por um pistão/haste maquinado e com tratamento superficial em cromo duro de Ø220 mm de diâmetro capaz de gerar força superior a 95 toneladas.
6	Corpos estruturais	Composto por o corpo da estrutura e do porta-lâminas em conjuntos soldados em monobloco em chapa de aço S275.
7	Calcadores	Conjunto composto por 17 unidades com um pistão/haste de Ø50 mm dimensionados para uma pressão máxima de 250 bar capaz de impedir movimento da chapa durante corte.
8	Guiamento frontal	2 conjuntos aplicados na chapa frontal da estrutura que impede o movimento longitudinal frontal do porta-lâminas.

Na Figura 71 estão assinalados os restantes conjuntos do equipamento atual que o completam como uma máquina *standard*. Na Tabela 17 descreve-se a função de cada conjunto, com o intuito de dar a entender o princípio de funcionamento respetivo.

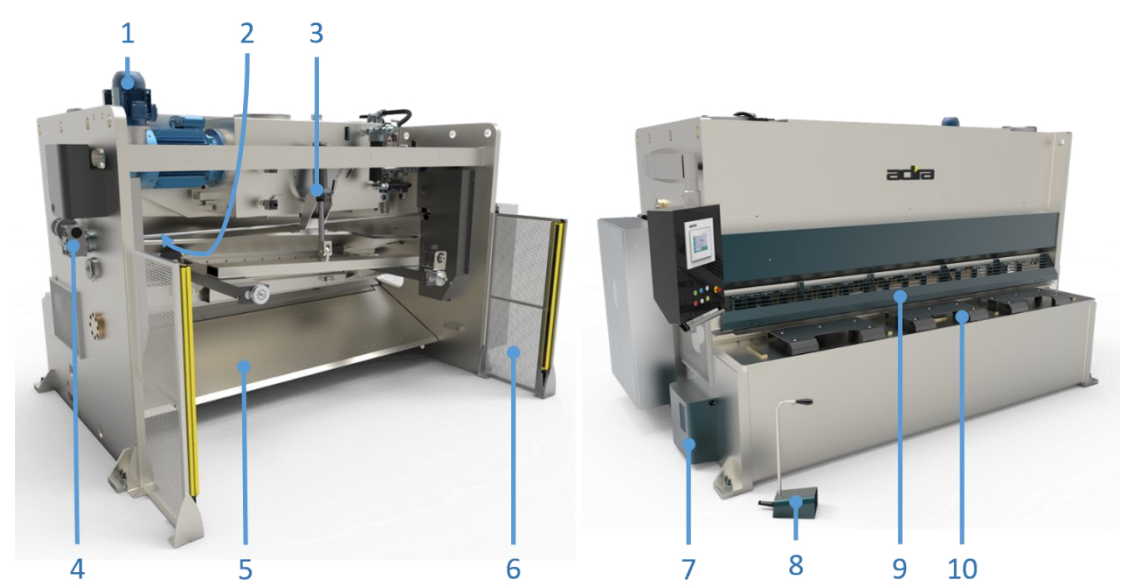


Figura 71 - Identificação de conjuntos funcionais da GV 2030 de design atual

Na Tabela 17 identificam-se os conjuntos assinalados na Figura 71 e refere-se a respetiva função de cada um.

Tabela 17 - Identificação dos conjuntos representado na Figura 71

Item	Descrição	Função
1	Grupo hidráulico do sistema de anti torção*	Este grupo hidráulico de acionamento externo, constituído por um conjunto de motor de corrente alternada e bomba de engrenagens externas, é responsável pela alimentação dos cilindros hidráulicos do sistema de anti torção (SAT).
2	Amarração dos cilindros principais	Os cilindros hidráulicos principais são fixos (amarrados) à estrutura por auxílio de um anel de fixação bipartido e fixos ao porta-lâminas com auxílio a um veio, dois tirantes em aço cromado e calotes esféricas que permitem a inclinação do porta-lâminas sem danificar os cilindros. Detalhe em pormenor na Figura 65.
3	Cilindro de escamoteamento	Este cilindro hidráulico é responsável por recolher o conjunto do esbarro quando for necessário corte de tiras com largura superior ao curso do esbarro.
4	Sistema de regulação da folga	O sistema de regulação da folga motorizada e guiamento inferior é responsável pelo ajuste da folga entre lâminas, para aperfeiçoamento da qualidade do corte e também para evitar o deslocamento longitudinal do porta-lâminas.
5	Rampa de descarga	A rampa de descarga é composta por chapas planificadas reforçadas em aço, responsáveis pela expulsão da tira de aço cortada para fora da máquina, dada a sua inclinação em relação ao chão.
6	Guardas posteriores de segurança	Este sistema permite evitar que algum operário chegue perto de conjuntos posteriores em movimento, como por exemplo o esbarro, a correia de transmissão entre os braços do esbarro ou os guiamentos, parando completamente a máquina caso o feixe laser das células foto elétricas seja interrompido. Este conjunto é desenvolvido segundo a diretiva máquinas para elementos mecânicos em movimento [2].
7	Grupo pneumático*	O grupo pneumático só é aplicado caso a máquina tenha um dos opcionais de MACF ou SAT. Na MACF, o grupo pneumático alimenta os dois cilindros pneumáticos responsáveis pelo movimento dos braços, e no SAT,

		alimenta os cilindros responsáveis pela abertura da rampa e pela colocação de uma barra mola na posição horizontal que faz a prensagem da tira de aço a cortar contra o porta-lâminas.
8	Grelha frontal de proteção	Conjunto de segurança reforçado em aço que impede o operário de colocar as mãos por baixo dos calcadores ou entre as lâminas durante o corte. Este conjunto é desenvolvido segundo os requisitos de segurança em guilhotinas da norma EN 13985.
9	Pedal	Sistema de acionamento do operador para proceder ao corte da chapa.
10	Almofada	A almofada é constituída por uma chapa quinada em aço e por esferas transferidoras que auxiliam o deslocamento da chapa de aço a cortar em cima da mesa do caixão.

(*) - Conjuntos pertencentes aos sistemas opcionais das máquinas de configuração base (Figura 72)

Contudo, além dos conjuntos normalizados que constituem a máquina base GV2030, existe os dois opcionais que complementam este modelo de máquinas, reforçando a qualidade do corte das tira cortadas e minimizando os defeitos das mesmas (Figura 43).

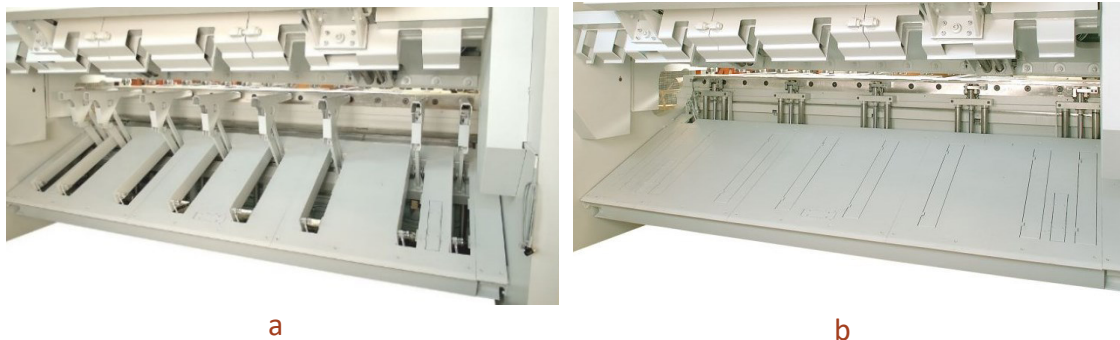


Figura 72 - a) Sistema de apoio para corte de chapas finas (MACF) e b) sistema de anti-torção de chapa (SAT)

Na Figura 72 pode-se observar os dois sistemas opcionais de MACF e SAT. O sistema MACF é acionado por cilindros pneumáticos e utilizado em corte de tira de chapas finas com espessuras até 6 mm, e com larguras superiores a cerca de 200 mm, no qual apoia a tira durante o corte. O SAT é utilizado para tiras de chapa com espessura superior a 6,5 mm e em tiras de largura superiores a 15 vezes a sua espessura. Este sistema é acionado com recurso a cilindros hidráulicos não normalizados que geram pressão sobre a tira a cortar contra o porta-lâminas, mas é "libertado" pneumaticamente debaixo da rampa de descarga.

3.6.2 Divisão do equipamento em módulos

De maneira a perceber se o impacto das alterações aplicadas no desenvolvimento da máquina GV foram ao encontro dos objetivos iniciais propostos, selecionou-se os seguintes módulos:

- **Estrutura** – devido a ser o elemento com mais impacto no custo e desempenho da máquina tem de ser verificado, garantindo que as intervenções aplicadas não prejudicam essas mesmas características;
- **Porta-lâminas** – com a diminuição do ângulo máximo de corte, e consequente aumento da força de corte, tem de se verificar se o desempenho não foi afetado e as alterações aplicadas no modelo desenvolvido, ao nível do fabrico, foram atingidas;
- **Atuadores ou cilindros hidráulicos** – neste conjunto, atualmente composto por duas unidades, é feita a comparação de custo com as quatro unidades desenvolvidas no novo sistema;
- **SAT** – selecionou-se este conjunto devido a necessidade de verificar que o custo e a quantidade de peças individuais foram de facto minimizados;
- **Regulação da folga** – devido a ser uma das principais necessidades de intervenção, há que comparar o mesmo com o atual devido à considerável alteração de montagem do mesmo;
- **Amarração dos cilindros** – devido à considerável alteração feita ao processo de montagem e modificação dos elementos que a constituem tem de se verificar se foi benéfico em tempo de montagem e respetivo custo;
- **Grupo hidráulico e pneumático** – apesar de ser dos conjuntos com menos intervenção tem de se verificar se o objetivo de aumentar a eficiência energética da máquina foi atingida, neste caso, minimizada comparativamente com a máquina atual;
- **Máquina pronta** – é importante também verificar se o conjunto máquina desenvolvido foi de facto atingido ao nível das dimensões para expedição e impacto ambiental.

3.6.3 Seleção dos domínios, módulos e variáveis

A seleção dos domínios para comparação dos resultados, entre o novo modelo e a atual máquina, foi elaborada com foco principal nos conjuntos com mais impacto no custo e desempenho da máquina. Dessa maneira, na Tabela 18 indicam-se os domínios selecionados, módulos da máquina a comparar e respetivas variáveis.

Tabela 18 - Identificação dos domínios, módulos e variáveis selecionados para análise comparativa

Domínios	Módulos	Variáveis
<i>Design for Cost (DfC)</i>	Estrutura soldada Porta-lâminas soldado Cilindros hidráulicos	Custo de fabrico externo Custo de fabrico interno
<i>Design for Manufacturing (DfM)</i>	Estrutura Porta-lâminas	Tempo de maquinação Peso do conjunto soldado
<i>Design for Optimization (DfO)</i>	Anti torção Regulação da folga Circuito hidráulico	Quantidade peças normalizadas Quantidade peças de fabrico Custo de compra
<i>Design for Assembly (DfA)</i>	Anti torção Regulação da folga Amarração dos cilindros	Quantidade de peças Tempo de montagem Custo de montagem
<i>Design for Structural Integrity (DfSI)</i>	Estrutura Porta-lâminas	Tensão admissível Deformação horizontal de corte Deformação vertical de corte
<i>Design for Eco Design (DfED)</i>	Produto final	Quantidade de óleo Eficiência energética Quantidade de ar comprimido
<i>Design for Expedition (DfE)</i>	Produto final	Largura total Altura total Custo de expedição

Como referido anteriormente, o corpo estrutural é o elemento que mais impacto tem no custo total da máquina, tanto de fabrico externo como interno, além de ser, juntamente com o corpo do porta-lâminas, os principais corpos que estão sujeitos às cargas máximas impostas pelo processo de corte. Dada a alteração dos atuadores hidráulicos ao nível do fabrico e da quantidade também é importante a verificação do custo dos mesmos. Dessa maneira selecionou-se os domínios do custo (DfC), do fabrico (DfM) e do desempenho estrutural (DfSI) para análise dos dados de custo externo e interno dos conjuntos respetivos e de desempenho estrutural do corpo da estrutura e do porta-lâminas.

Visto este projeto ter como base de estudo a melhoria de um produto já no mercado e a minimização de peças de fabrico e consequente minimização do custo é um dos objetivos impostos, é importante verificar se os mesmos foram atingidos com sucesso e ter uma visão mais simples dos indicadores. Para isso selecionou-se os domínios de otimização (DfO) e de montagem (DfA) para análise da diferença das quantidades de peças desenvolvidas e normalizadas e respetivo custo interno e externo.

Outros dois objetivos iniciais, era a diminuição das dimensões totais da máquina e o aumento ecológico da máquina. O intuito da diminuição das dimensões era a tentativa de minimizar o custo de expedição da máquina devido a ser uma máquina de grande porte, por isso se selecionou a análise ao domínio de expedição (DfE). Para verificar se de facto o novo modelo desenvolvido é mais ecológico faz-se uma análise aos consumos de óleo, energia e ar pressurizado no domínio ecológico (DfED).

3.6.4 Construção das tabelas de desempenho

A construção das tabelas de desempenho divide-se em duas fases principais: a primeira foca-se na análise individual de cada domínio selecionado, e a segunda na análise comparativa entre os elementos sujeitos aos mesmo domínios.

Na Figura 73 está ilustrado o modelo da tabela de desempenho utilizada para a comparação dos resultados obtidos do modelo da guilhotina desenvolvida com a do modelo de base. O critério de cores das células dos resultados obtidos, segue como ilustrado na Figura 73, no canto superior direito com a seguinte descrição:

- Menos de 40% a célula do valor é destacada a vermelho;
- De 40% a 69% a célula do valor é destacada a laranja;
- De 70% a 89% a célula do valor é destacada a amarelo;
- De 90% a 100% a célula do valor é destacada a verde.

De referir que este esquema de cores é aplicável aos campos de eficiência, mas para a eficácia ou o valor se destaca a verde, e a variável é considerada como bem sucedida, ou a vermelho, para indicar a reprovação da variável em questão.

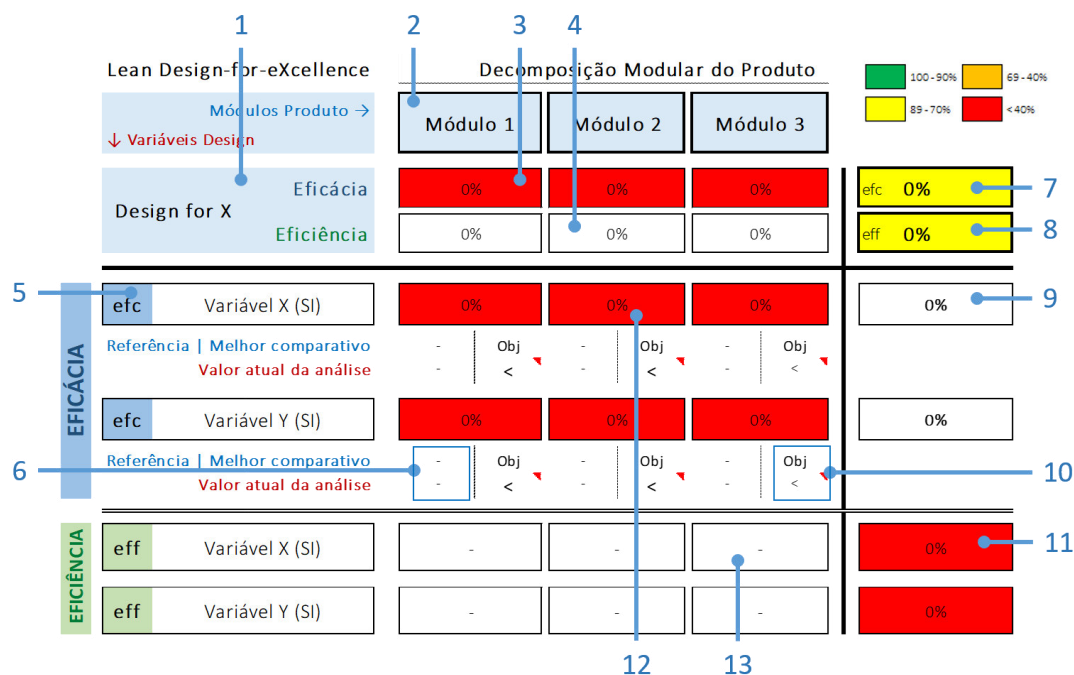


Figura 73 - Exemplo do modelo de uma tabela de desempenho selecionada para verificação dos resultados

Na Tabela 19 faz-se a descrição do modelo de tabela de desempenho (Figura 73) para construção da mesma.

Tabela 19 - Descrição do modelo da tabela de desempenho utilizada para análise dos resultados obtidos

Item	Descrição
Células de preenchimento manual	
1	Preencher com o domínio a analisar;
2	Preencher com os módulos selecionados para análise do respetivo domínio;
5	Preencher com as variáveis (X,Y) selecionadas para o domínio no campo da eficácia e replicar as mesmas no campo de eficiência;
6	Colocação dos resultados da máquina base na linha “Referência” e os resultados obtidos na linha de “Valor atual da análise”;
10	Na célula indicada, por baixo da célula de objetivo indicada como “Obj.”, deve-se colocar o sinal de menor, “<”, se o objetivo da variável for minimizar o valor de referência, ou o sinal de maior, “>”, se o objetivo for maximizar o valor de referência;
Células de preenchimento automático	
3	Indica o valor da média da eficácia dos resultados obtidos de todas as variáveis para o respetivo módulo;
4	Indica o valor da média da eficiência dos resultados obtidos de todas as variáveis para o respetivo módulo;
7	Indica a média da eficácia dos módulos do domínio a analisar;
8	Indica a média da eficiência dos módulos do domínio a analisar;
9	Indica a média da eficácia dos resultados obtidos para os módulos da variável respetiva (X,Y);
11	Indica a média da eficiência dos resultados obtidos para os módulos das variáveis (X,Y);
12	Indica o valor da eficácia da variável respetiva para o respetivo módulo;
13	Indica o valor da eficiência da variável X para o respetivo módulo;

Os valores de referência da guilhotina de base foram obtidos através de uma análise pormenorizada da máquina atual ao nível do desempenho, estudo por MEF, com recurso ao programa de CAD, Solid Edge, e os custos, em parceria com o departamento de logística e da produção, obtidos com a maior coerência possível, nomeadamente a nível da contabilização do custo interno de fabrico e montagem. O caso de estudo por MEF é a comparação do desempenho do corpo da estrutura e do corpo do porta-lâminas do modelo atual e do desenvolvido. Neste sentido, os valores obtidos para a análise pelas tabelas de desempenho são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores de referência para análise *Lean* dos domínios e respetivos módulos selecionados

DfX	Variáveis	Módulos		
CUSTO		Estrutura	Porta-lâminas	Cilindros Hidráulicos
	Fabrico [€]	33 608 34 187	10 651 9 229	8 694 7 230
MANUFACTURING		Estrutura	Porta-lâminas	
	Maquinação [min]	6 720 13 150	2 280 2 030	
	Maquinação [€]	3 434 6 720	1 165 1 037	
	Peso [kg]	10 150 10 660	2 880 2 520	
OPTIMIZATION		Anti-torção (SAT)	Regulação da folga	Circuito hidráulico
	Peças normalizadas [un]	444 438	138 82	343 279
	Peças fabrico [un]	148 126	37 18	56 31
	Custo de compra [€]	9 140 7 305	4 095 2 547	11 365 9 865
ASSEMBLY		Anti-torção (SAT)	Regulação da folga	Amarração dos cilindros
	Quantidade peças [un]	592 564	175 100	124 244
	Montagem [min]	1 290 1 050	390 60	195 125
	Custo de montagem [€]	514 418	155 24	78 50

		Estrutura	Porta-lâminas
STRUCTURAL INTEGRITY	Tensão Admissível [MPa]	214 207	207 214
	Deslocamento horizontal [mm]	0,314 0,139	0,125 0,243
	Deslocamento vertical [mm]	2,87 2,95	0,844 1,100
Produto final			
ECO DESIGN	Óleo [litros]	470 300	
	Eficiência energética [kWh]	2,5 0	
	Ar comprimido [litros]	10,3 1,9	
Produto final			
EXPEDITION	Largura [mm]	2 350 2 230	
	Altura [mm]	2 590 2 495	
	Custo de expedição [€]	8 750 2 950	
NOTA		Valores da guilhotina 2.0 destacados a cor de tijolo Valores da guilhotina 3.0 destacados a azul	

3.7 Projeto/resultados

Na Figura 74 está representado, em vista isométrica, a guilhotina desenvolvida com base no modelo GV2030 atual (Figura 71).



Figura 74 - Versão final da guilhotina desenvolvida, GV2030 versão 3.0

Durante a fase de desenvolvimento deste modelo, foi proposta a adição de blindagens de maneira a criar um visual mais inovador e apelativo para o lançamento no mercado, devido ao corpo estrutural ser muito idêntico à guilhotina atual ao nível da geometria.

Neste capítulo, são descritos em detalhe todos os problemas encontrados durante o desenvolvimento e as melhorias desenvolvidas com sucesso. Inicialmente apresenta-se e descreve-se a solução final do trabalho, para efeitos de enquadramento do projeto. De seguida é apresentado o estudo de melhoria desde a análise crítica do equipamento de versão 2.0, no qual a melhoria se baseia, até aos pormenores de construção da máquina e análise de custos.

3.7.1 Descrição da solução final e subconjuntos

O desenvolvimento da máquina GV2030 versão 3.0 foi, no geral, conseguido com sucesso, tendo sido detetados durante o desenho algumas premissas incapazes de serem aplicadas, as quais serão indicadas no capítulo 3.7.7. Na Figura 75 está indicada a posição dos conjuntos principais da guilhotina 3.0, para os quais se desenvolveram novos processos, ou de fabrico ou de montagem, ou até mesmo novas configurações, como por exemplo o sistema de apoio para chapas de aço finas.

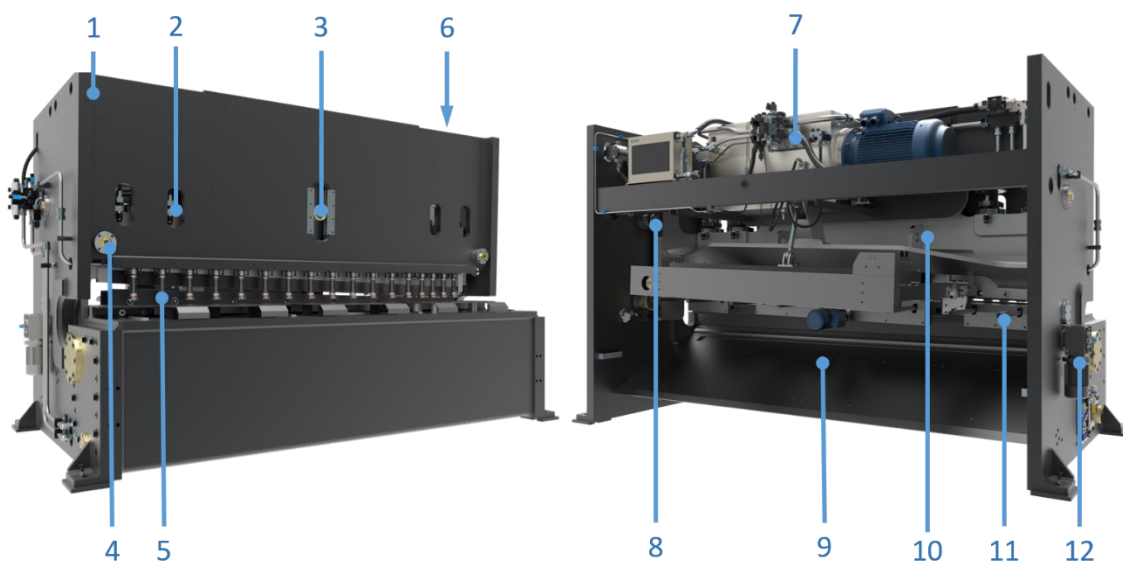


Figura 75 - Indicação dos principais conjuntos abordados no capítulo 3.7.1

Na Tabela 21 identificam-se os conjuntos indicados na Figura 75.

Tabela 21 - Identificação dos conjuntos indicados na Figura 75

Item	Descrição	Item	Descrição
1	Corpo da estrutura	7	Grupo energético
2	Amarração dos cilindros	8	Guiamento posterior superior
3	Guiamento central	9	Rampa de descarga e SAT
4	Guiamento frontal	10	Corpo do porta-lâminas
5	Calcadores	11	Esbarro e MACF
6	Cilindros hidráulicos	12	Motor da regulação da folga

❖ **Corpo da estrutura**

Na Figura 76 pode-se observar o conjunto estrutura que sofreu grandes alterações ao nível do método de fabrico. Este conjunto foi desenvolvido em dois elementos principais, estrutura e caixão, fabricados separadamente e montados por auxílio de cavilhões, e dimensionados para resistir ao esforço de corte de chapa até 20 mm de espessura, o que garante o correto posicionamento em relação ao conjunto soldado da estrutura.

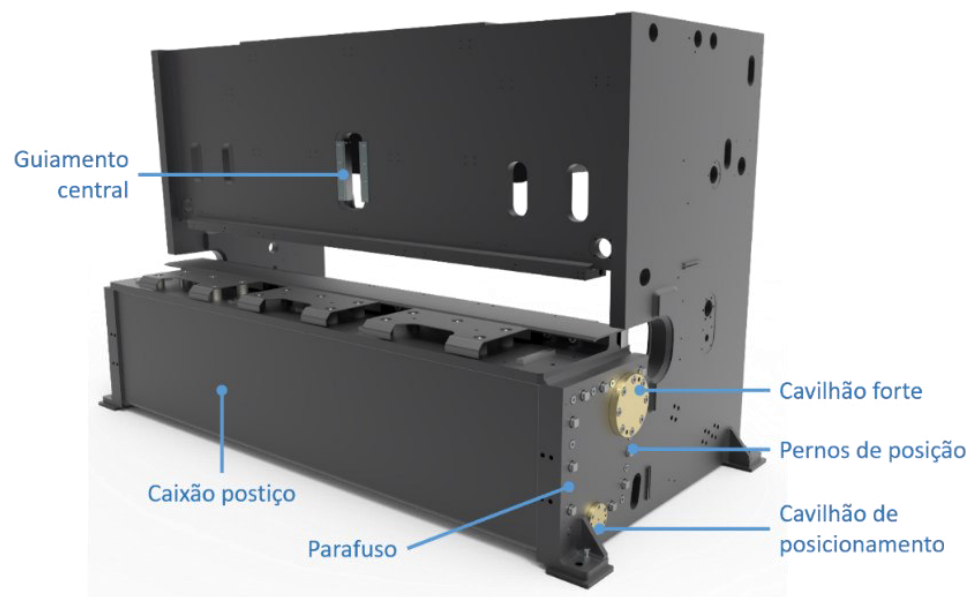


Figura 76 - Conjunto do corpo estrutural com indicação dos elementos de ligação e posicionamento

O conjunto soldado do caixão postigo é unido à estrutura por auxílio do cavilhão forte, sobredimensionado e impedido de rodar durante o processo de corte pelo cavilhão de posicionamento. Os pernos roscados de posição, aplicados apenas no montante direito, garantem que o caixão encosta sem qualquer folga no montante esquerdo, enquanto que o aperto dos parafusos garante a fixação entre a estrutura e o caixão. As restantes alterações aplicadas consistiram na diminuição da profundidade da cava em 240 mm,

que permitiu a diminuição da largura da estrutura, e furação nos montantes que viabilizam a alimentação hidráulica dos calcadores por fora da máquina, o que facilita a montagem do circuito hidráulico.

❖ Corpo do porta-lâminas

O corpo do porta-lâminas (Figura 77) foi desenhado para evitar qualquer intervenção de pré-maquinação, garantido o sucesso da respetiva premissa, e foi tida em conta a complexidade geométrica do mesmo ao nível do fabrico. Devido à diminuição do ângulo de corte máximo e consequentemente aumento do esforço de corte, relativamente à máquina atual, foi necessário reforçar a espessura da chapa frontal do porta-lâminas. Na Figura 77 pode-se observar a indicação dos pormenores de maquinação para montagem dos elementos apontados.

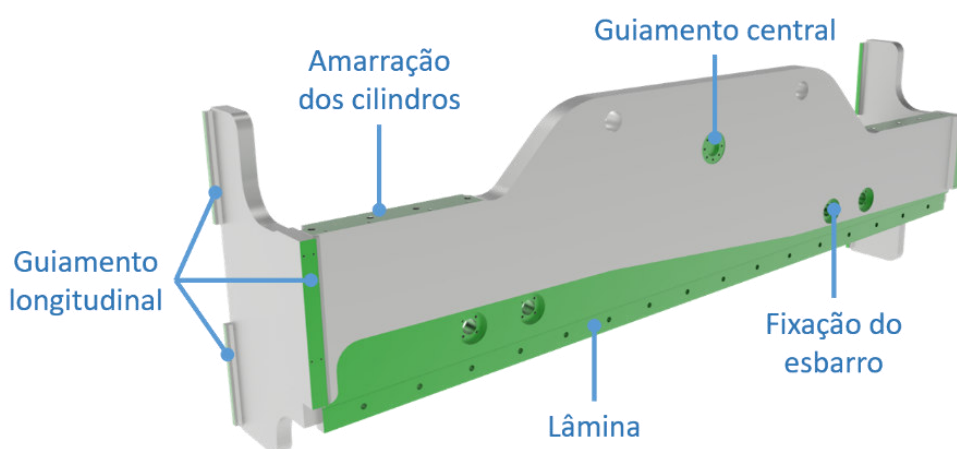


Figura 77 - Conjunto do corpo do porta-lâminas com indicação dos pormenores de maquinação para montagem dos elementos apontados

Como se pode observar na Figura 77, a maquinação aplicada a este conjunto, destacada a verde, resume-se à face frontal do corpo, restando apenas a maquinação para a amarração dos cilindros (faces de topo da chapa do avental) e para as chapas de guiamento longitudinal (faces posteriores e frontais dos montantes do porta-lâminas). De referir que é possível efetuar todo o processo de maquinação do corpo posicionado frontalmente para a fresadora.

❖ Atuadores ou cilindros hidráulicos

Como referido anteriormente, os atuadores hidráulicos foram redesenhados de maneira a abranger outras gamas deste modelo de máquina e reduzir o custo unitário. Na Figura 78 está ilustrada uma vista explodida do conjunto unitário do atuador hidráulico principal. Pode-se observar que este conjunto foi dividido em 5 elementos principais, nomeadamente o corpo do cilindro e a haste (fabricados a partir de matéria prima retificada) e as tampas e o pistão em aço Ck 45.

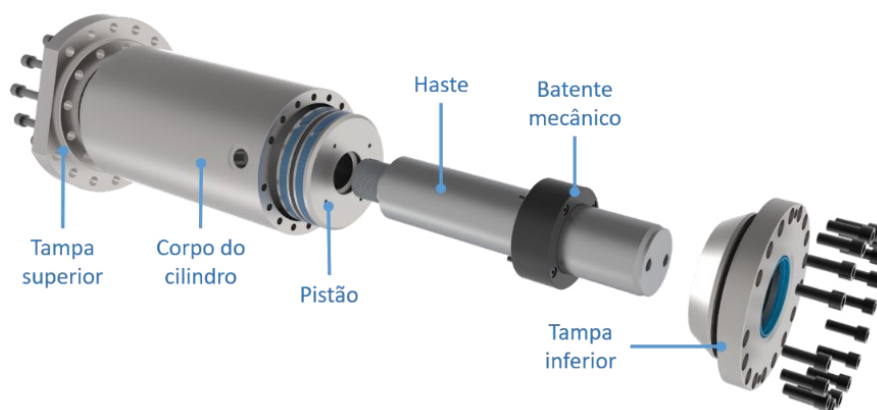


Figura 78 - Vista explodida de um atuador hidráulico da máquina desenvolvida

❖ Amarração dos cilindros hidráulicos

A amarração dos cilindros, tanto à estrutura como ao porta-lâminas, foi modificada de maneira a facilitar a montagem e evitar qualquer maquinação durante o processo de montagem da máquina. Com auxílio a arruelas esféricas normalizadas, que são anilhas em forma de calote, e uma calote intermédia, consegue-se evitar que qualquer empeno, devido à soldadura da estrutura ou erro de maquinação, não transmita torção para a haste do cilindro.

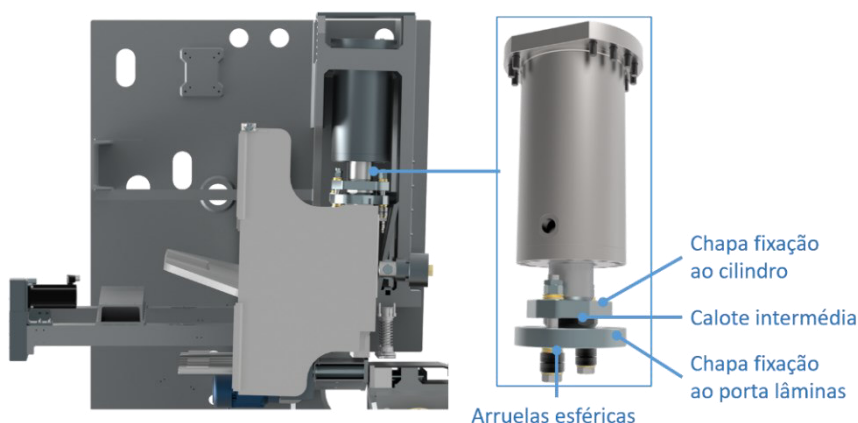


Figura 79 - Vista lateral com detalhe para a amarração dos cilindros hidráulicos

Na Figura 79 pode-se observar a montagem desenvolvida para amarração dos cilindros à estrutura e ao porta-lâminas da guilhotina 3.0.

❖ Grupo energético ou hidráulico

Na Figura 80 está representado o grupo energético desenvolvido, constituído por um depósito com capacidade para 300 litros de óleo, conjunto de motor de corrente alternada e bomba de palhetas de 100 cm³, filtro de ar e de retorno, o bloco principal das válvulas e acessórios hidráulicos. Foi revista a posição do bloco para a parte posterior da máquina de maneira a ter melhor acesso, para o ajuste ou manutenção das

válvulas hidráulicas, e colocou-se um filtro de pressão de retorno para evitar a entrada de sujidade no depósito, na descarga de óleo para o tanque.

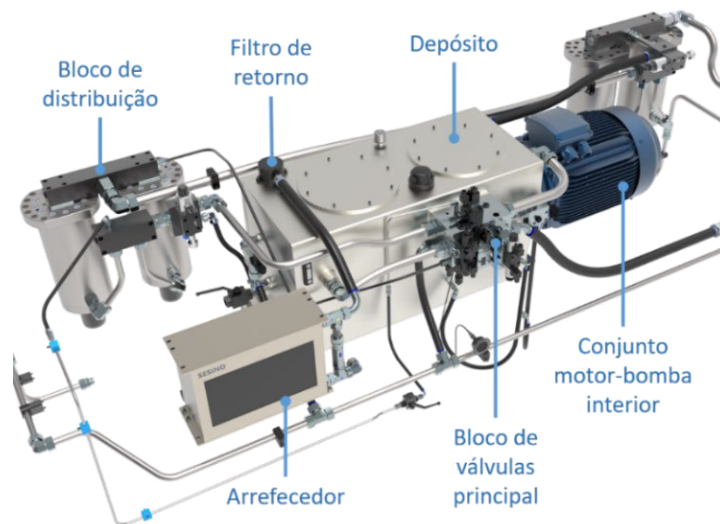


Figura 80 - Detalhe do grupo energético da guilhotina desenvolvida, versão 3.0

O circuito hidráulico é muito idêntico ao atual, tendo, no entanto, sido aplicados alguns blocos de distribuição extra, devido à duplicação da quantidade de cilindros, para garantir a sincronia de movimento no acionamento dos mesmos. Neste grupo energético foi colocada uma bomba de palhetas que, além de fazer menos ruído, também tem um custo inferior às de engrenagens exteriores, e diminuiu-se o volume de óleo para o funcionamento da máquina graças à aplicação permanente de um arrefecedor. Quanto à montagem do circuito, foram consideradas as limitações anteriormente detetadas no modelo atual 2.0 e foram alteradas as posições dos blocos hidráulicos de modo a que a sua montagem seja mais facilitada, principalmente nas máquinas de 3 m, para as quais o espaço para operar é diminuto. Na Figura 81 pode-se verificar que as disposições dos respetivos acessórios do circuito hidráulico estão mais espaçadas entre eles, do que ilustrado na Figura 66.



Figura 81 - Vista posterior com foco no circuito hidráulico da guilhotina desenvolvida

❖ Sistema de regulação da folga entre lâminas

A grande modificação realizada neste grupo consiste na alteração do conjunto de sistema de regulação da folga e guiamento inferior. Este sistema foi simplificado com a utilização de material normalizado, como as rodas dentadas com dimensões disponíveis para compra no mercado corrente, e duplicação da motorização, ou seja, a regulação da folga entre lâminas é feita por dois moto-redutores com leitura de posição por *encoder*. Na Figura 82 pode-se observar o conjunto unitário da regulação da folga que se aplica nos dois montantes.

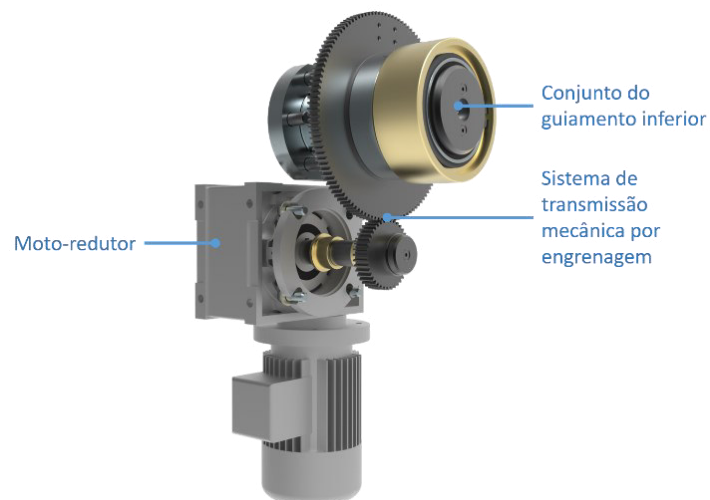


Figura 82 - Sistema de regulação de folga e guiamento inferior do modelo da guilhotina 3.0

❖ Guiamentos do porta-lâminas (posteriores, frontais e central)

A máquina também inclui os guiamentos frontais, posteriores superiores e inferiores. O guiamento central é uma nova aplicação que vem substituir os dois guiamentos laterais que eram aplicados no porta-lâminas, e composto apenas por uma cavilha flangeada, rolamento e o anel de guiamento, este último responsável apenas pela orientação do porta-lâminas no plano transversal, como se pode observar na Figura 83.



Figura 83 - Vista de pormenor, sem blindagem frontal, do guiamento central aplicado na máquina desenvolvida

Os restantes guiamentos não sofreram alterações dignas de registo, à exceção da alteração do corpo do guiamento frontal para fabrico em barra redonda e uniformização do guiamento superior de maneira a uniformizar a aplicação dos mesmos nos montantes.

❖ Sistema de mesa de apoio de chapa fina (MACF)

O sistema de mesa de apoio de chapas finas foi alvo de outra grande alteração efetuada, já que este foi redesenhado para ser aplicado na régua do esbarro, que também foi reforçado de maneira a abranger todas as gamas de 3 metros do modelo GV. Na Figura 84 pode-se verificar a aplicação do sistema de MACF na régua, com recurso a um acionamento elétrico por aplicação de um moto-reductor, composto por veios retificados para suportar a chapa fina e acionados por engrenamento. De referir que o novo sistema, além de ter montagem mais simples, permite pré-montagem na régua antes de ser montado no conjunto máquina, o que permite reduzir o tempo de montagem.

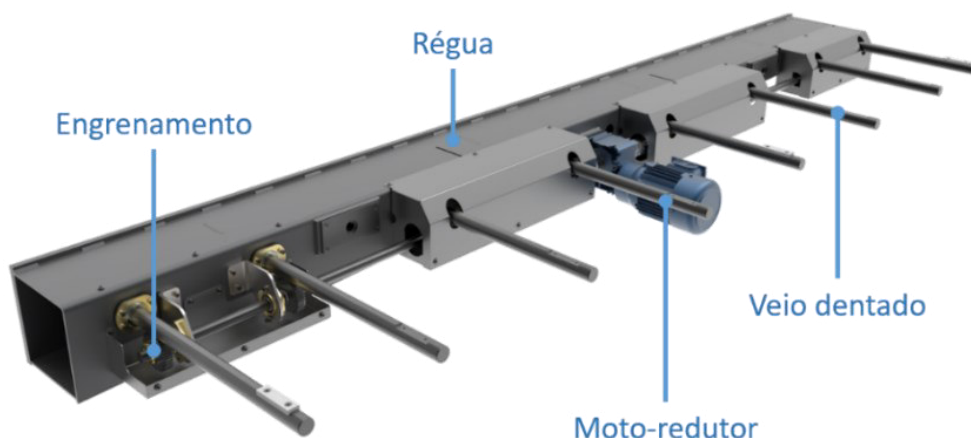


Figura 84 - Detalhe da régua do esbarro com o sistema de mesa de apoio de chapas finas desenvolvido

❖ Sistema de anti-torção de chapa (SAT)

O sistema de anti-torção de chapa (Figura 85) foi alvo de reforço do pistão/haste dos cilindros hidráulicos, de maneira a reforçar o guiamento do mesmo, e de reposicionamento em altura em relação ao plano de corte, de maneira a evitar a necessidade de efetuar um fosso nas instalações dos clientes para máquinas com 4 metros ou mais de comprimento.

Todo o circuito hidráulico do SAT foi redesenhado de maneira a simplificar a montagem. Com a aplicação de calhas metálicas, soldadas ao caixão, para fixação das abraçadeiras dos tubos hidráulicos, evita-se dar furação durante o processo de montagem. Na Figura 85 está representado o conjunto do SAT que, para além da simplificação de montagem, permite reduzir consideravelmente o custo total.

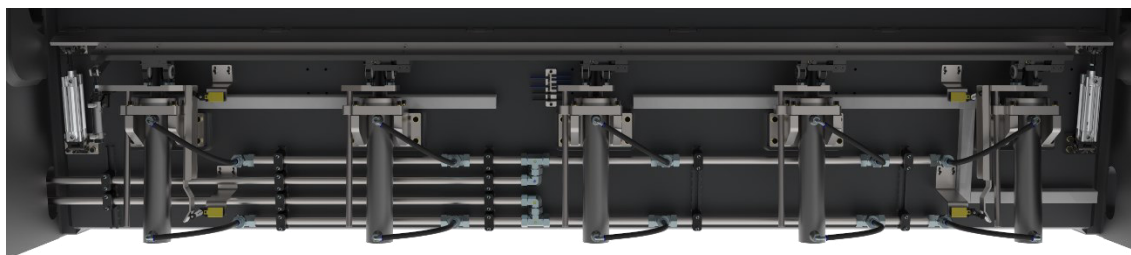


Figura 85 - Representação do conjunto de SAT na guilhotina desenvolvida

❖ Calcadores

Devido à diminuição do ângulo máximo de corte, e consequente aumento do esforço de corte, surgiu a necessidade de reforço do pistão do calcador de maneira a aplicar mais pressão para fixação da chapa a cortar. De referir que, para além do reforço do pistão, adicionou-se um canal na patela inferior do calcador para colocação de anel em borracha.



Figura 86 - Conjunto do calcador aplicado na guilhotina de versão 3.0

Na Figura 86 pode-se ver o conjunto do calcador, com destaque para o anel de borracha instalado na patela inferior do calcador, de modo a reduzir o ruído de impacto da patela quando atuado o calcador para bloqueio da chapa de aço a cortar.

❖ Outros conjuntos

Durante a fase de desenvolvimento do projeto decidiu-se não aplicar a iluminação da linha de corte mas, após reunião com o departamento de assistência técnica pós-venda, constatou-se que de facto grande parte dos clientes deste modelo de máquina utiliza a linha de corte para pequenos acertos de chapa. Como a máquina já estava praticamente desenhada, fez-se um estudo de mercado de lasers para este tipo de aplicações. Dadas as limitações em termos de espaço em volta da zona de corte, foi considerado um laser de pequenas dimensões, utilizado em linhas de corte de cartão.

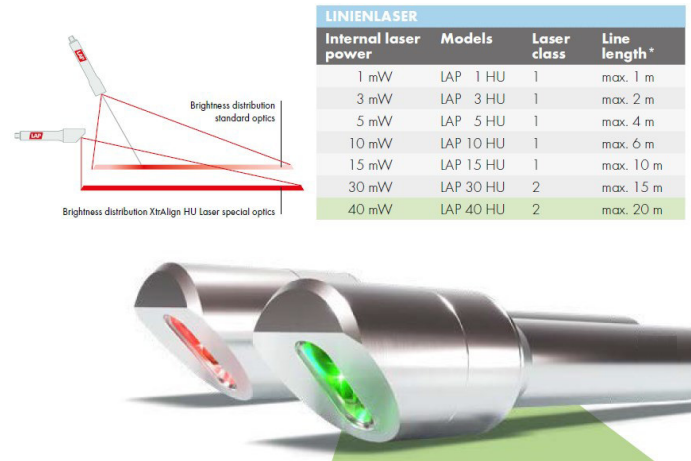


Figura 87 - Caraterísticas técnicas do laser selecionado para a linha de corte do modelo GV desenvolvido

Na Figura 87 pode-se verificar o laser selecionado, destacado a verde, de 40 mW e respetivas características técnicas, com destaque da potência do laser. A potência necessária depende do nível refratário do material a iluminar, ou seja, o laser só se reflete caso esteja a uma dada altura mínima. Como no modelo desenvolvido 3.0 se minimizou o espaço envolvente da zona de corte, optou-se por validar esta aplicação na fase de montagem da máquina.

Uma das inovações previamente estipuladas consiste na adição de um sistema de corte automático, ou seja, o cliente só necessitaria de colocar a chapa em cima da mesa da guilhotina. Através de sensorização, o comando comunicaria com o autómato e ajustaria os parâmetros de corte à necessidade. Durante a fase de desenvolvimento do produto constatou-se, juntamente com o departamento comercial e de assistência pós-venda, que a aplicação de um sensor para deteção automática do comprimento da tira a cortar não seria um elemento de destaque perante os clientes deste tipo de produto, sendo que apenas se aplicou um sensor de leitura da espessura de chapa a cortar e um comando numérico apropriado para as novas funções da máquina. Na Figura 88 pode-se observar o sensor aplicado na estrutura e o comando numérico, com um aspeto mais inovador comparativamente ao atual aplicado (Figura 54).

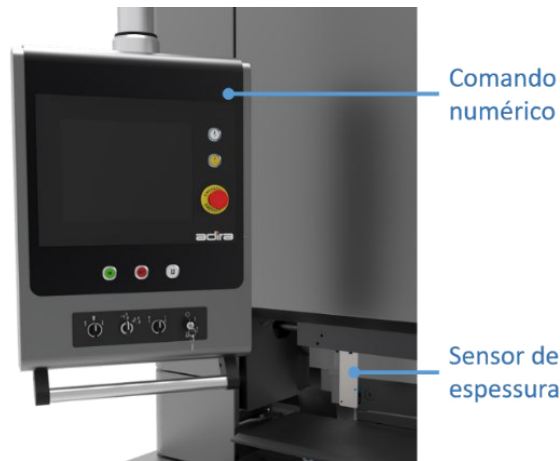


Figura 88 - Vista em pormenor do comando numérico e do sensor de medida de espessura

Projeto de melhoria de uma guilhotina hidráulica nos processos de fabrico e de montagem

Pedro Costa

Para concluir, apesar de não ter sido imposto como premissa, alterou-se o sistema de leitura de posição do porta-lâminas, de maneira a ter mais precisão e poder utilizar material já corrente de aplicações nas outras máquinas. Na Figura 89 pode-se observar o sistema de leitura igual ao aplicado nas quinadoras Adira, uma régua linear ótica com resolução de 5 μm , fixa na chapa de reforço da estrutura, e o patim da régua linear ao porta-lâminas.

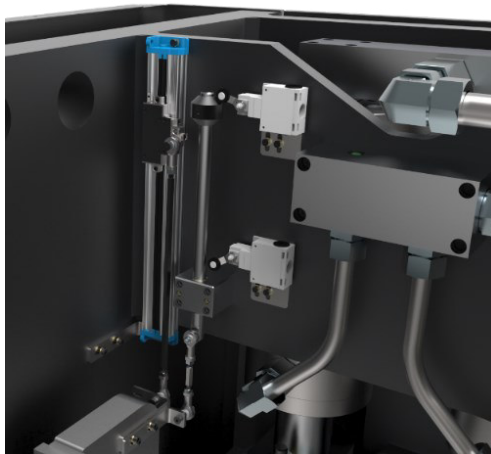


Figura 89 - Vista isométrica da aplicação da régua linear na máquina desenvolvida

Como referido anteriormente, foram desenvolvidas blindagens para toda a máquina e respetiva grelha frontal de proteção de maneira a criar um produto que se destacasse visualmente dos produtos comercializados pela concorrência (Figura 74).

3.7.2 Análise crítica do equipamento inicial

Após descrição do modelo de guilhotina desenvolvida, versão 3.0, é feita uma descrição e análise crítica do modelo de versão 2.0, separados por conjuntos principais, como mencionado no capítulo 3.6.1.

3.7.2.1 Corpo da estrutura e do porta-lâminas

As principais intervenções na estrutura consistiram na tentativa de eliminação completa de pré-maquinações, e diminuição da cava e das dimensões finais do conjunto da estrutura. A pior situação diz respeito ao caixão, cujo fabrico atualmente necessita de duas deslocações da Adira para o fornecedor para soldar no corpo estrutural. Isto acontece devido às maquinações na zona de fixação da lâmina e no conjunto da chapa frontal da estrutura (Figura 47). Na Figura 90 pode-se ver em detalhe a cava e identifica-se a zona de pré-maquinação do caixão.

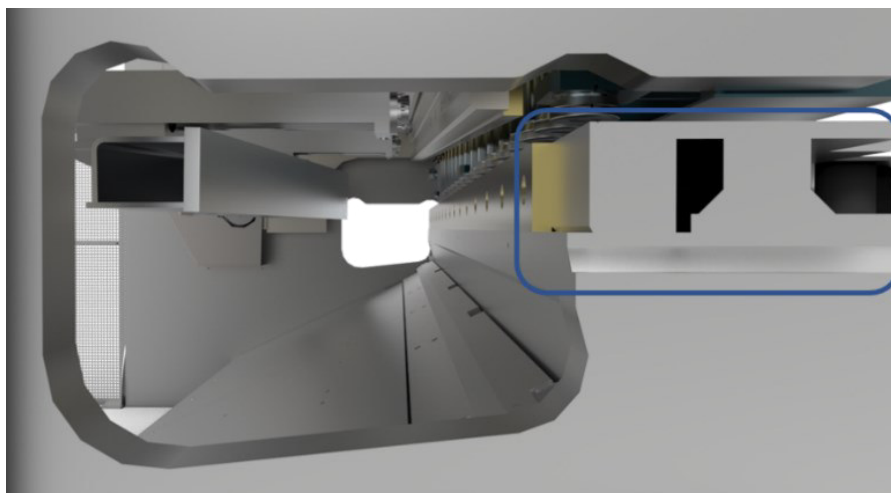


Figura 90 - Vista lateral de detalhe da cava e destaque da zona de pré-maquinação do caixão

Para o fabrico do porta-lâminas, é necessário redesenhar a geometria do corpo do mesmo, de maneira a facilitar os processos de soldadura e de maquinação. A disposição da chapa frontal em ângulo (Y), relativamente às abas laterais, dificulta o processo de soldadura por falta de faces para posicionamento correto da mesma. O processo de maquinação, dada a imposição dos respetivos ângulos (X e Z), é dificultado por falta de faces de apoio para aperto do corpo na fresadora (Figura 91).

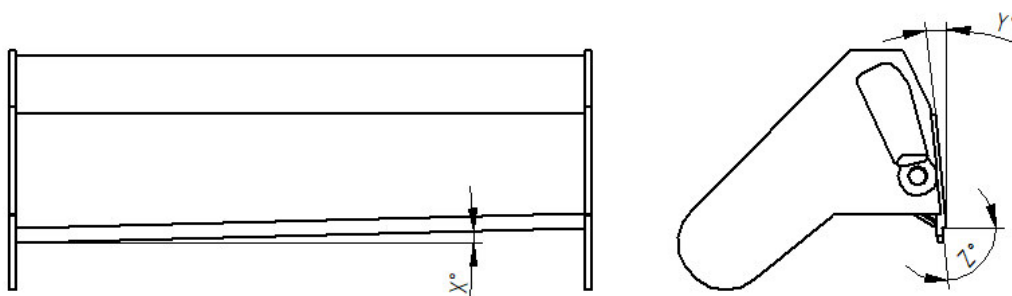


Figura 91 - Desenho 2D de um porta-lâminas com a indicação dos diferentes ângulos de fabrico [elaboração própria]

3.7.2.2 Atuadores principais hidráulicos

Atualmente, os atuadores hidráulicos são de elevado custo devido ao tempo de maquinação ser demasiadamente elevado, o que faz com que o custo aumente. A matéria prima dos elementos que os constituem provêm de varão de aço. Este conjunto de atuação é constituído pelo corpo do cilindro, um pistão/haste em peça única, tampa inferior, conjunto de vedantes e parafusos de fixação. Como se pode observar na Figura 92, os elementos que possuem mais maquinação são o corpo e pistão do cilindro, o que torna este elemento de elevado custo de fabrico.

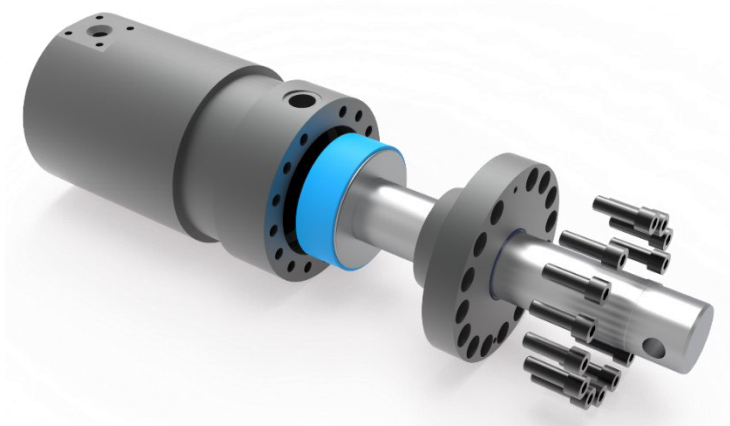


Figura 92 - Vista explodida de um cilindro hidráulico de uma GV2030

3.7.2.3 Circuito hidráulico principal

Como exemplificado na Figura 66, o principal problema do circuito hidráulico é a falta de espaço entre os montantes da estrutura para montagem do circuito e, principalmente, manipulação das mangueiras de alta pressão. Para se clarificar a grande restrição de manipulação das mangueiras de alta pressão, a Figura 93 indica os respectivos raios mínimos de curvatura para o modelo de manga [72] mais presente nas mangueiras das máquinas Adira, EN856 4SH.

EN 856 4SH



Figura 93 - Características do modelo de manga para mangueiras de alta pressão [72]

3.7.2.4 Guiamentos principais do porta-lâminas

O principal foco para intervenção neste conjunto é no sistema de regulação de folga que, para além de ser um conjunto de custo elevado, devido às rodas dentadas não serem normalizadas (Figura 52), o processo de montagem é complexo. Na Figura 94 consegue-se perceber que é um sistema com elevada possibilidade de colisão com outros sistemas, como o cilindro de escamoteamento por exemplo, devido à colocação

de um veio de transmissão entre o guiamento da direita e da esquerda. Esta colisão, detetada na fase de montagem da máquina, pode ocorrer devido a defeitos admissíveis de fabrico do porta-lâminas, da estrutura ou até mesmo de um elemento de compra.

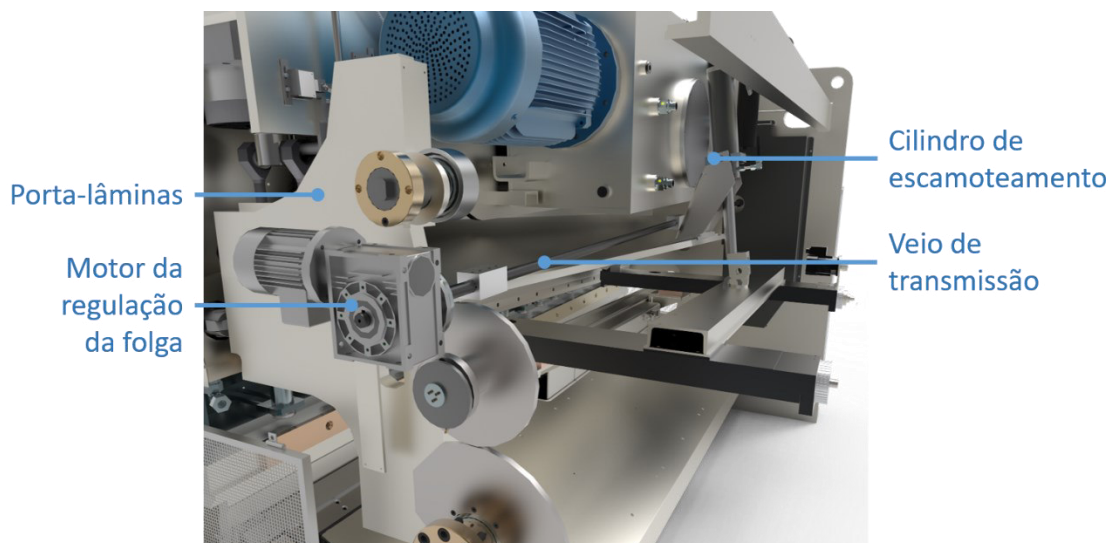


Figura 94 - Vista em corte da guilhotina 2.0 com detalhe para o veio de transmissão da regulação da folga

3.7.2.5 Conjuntos opcionais da máquina

Relativamente aos conjuntos opcionais, o foco está dirigido para a melhoria do SAT e do sistema de MACF (Figura 64).

O sistema de MACF tem um elevado tempo e complexidade de montagem associado. Por outro lado, ao analisar o funcionamento deste tipo de máquinas, mais indicadas para o corte de chapa grossa, observa-se que a utilidade deste sistema para o cliente é relativamente baixa em comparação com as restantes funções que a máquina pode desempenhar. Desta forma, o foco para este conjunto será em redesenhar o conjunto de apoio de chapa fina, minimizando o impacto que este tem no custo total da máquina.

No SAT, a complexidade de montagem é relativamente baixa, mas o custo é relativamente elevado, de cerca de 10% do valor total da máquina. Por essa razão, o foco principal neste conjunto é o desenvolvimento de um novo método de fabrico dos cilindros hidráulicos de maneira a minimizar o máximo possível o custo total garantindo a mesma fiabilidade de funcionamento.

3.7.3 Brainstorming de ideias de melhoria

Neste capítulo estão descritas as ideias de soluções em que este projeto se baseou. Para cada um dos subconjuntos mencionados no subcapítulo 3.7.4, é representada uma linha de pensamento de ideias a modificar no modelo desenvolvido da guilhotina 3.0. De maneira a se poder ter uma perspetiva diferente de todos processos a que este tipo de máquina está sujeito, foram elaboradas reuniões com os intervenientes dos departamentos de fabrico, montagem, logística e assistência pós-venda.

De maneira a evitar a pré-maquinação dos elementos estruturais, foram propostas duas soluções para cada elemento, estrutura e porta-lâminas. No entanto, observou-se que era impossível de evitar a pré-maquinação da barra dos calcadores nas duas soluções para o corpo estrutural, devido às cargas aplicadas nos calcadores e à impossibilidade de acesso para manutenção da barra dos calcadores.

❖ **Corpo da estrutura e do porta-lâminas**

A duas soluções propostas para o corpo da estrutura a desenvolver, com o objetivo de solucionar a aplicação de um caixão postiço, foram as seguintes:

1. **Corpo da estrutura com o conjunto da chapa frontal postiço** (Figura 95 - 1). O conjunto composto pela chapa frontal, barra dos calcadores e reforços posteriores, é fixo aos montantes da estrutura por ligação aparafusada e posicionado com recurso a cavilhas que resistem às reações que são aplicadas pelos calcadores e cilindros hidráulicos no conjunto soldado da chapa frontal;
2. **Corpo da estrutura com o conjunto do caixão postiço** (Figura 95 - 2). O conjunto caixão, composto por chapas que formam um conjunto fechado, e barras de suporte e posicionamento da lâmina fixa, é posicionado na estrutura com recurso a cavilhas que resistem ao esforço de corte e à força de calcamento, e fixo à estrutura por ligação aparafusada.

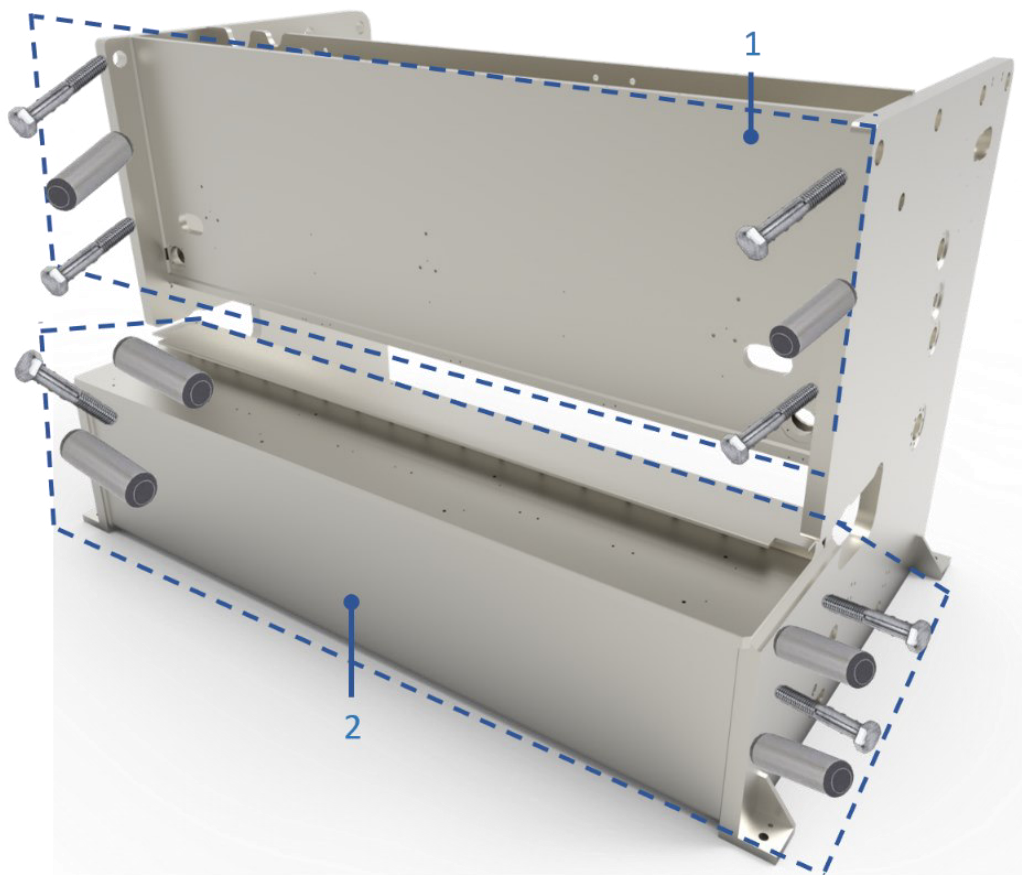


Figura 95 - Exemplo das soluções propostas para o corpo da estrutura sem pré-maquinações

As soluções propostas para o porta-lâminas foram propostas com base na eliminação dos guiamentos laterais, já que estes são o único elemento que impõe pré-maquinação do corpo. As soluções apresentadas foram:

1. **Colocação de guiamentos laterais fixos no avental do porta-lâminas**, substituindo os rolamentos dos guiamentos laterais por sistema de guias e patins (Figura 96 - 1);
2. **Colocação de um guiamento ao centro do avental do porta-lâminas** com recurso a um rolamento reforçado em vez dos dois atualmente aplicados nos guiamentos laterais (Figura 96 – 2).

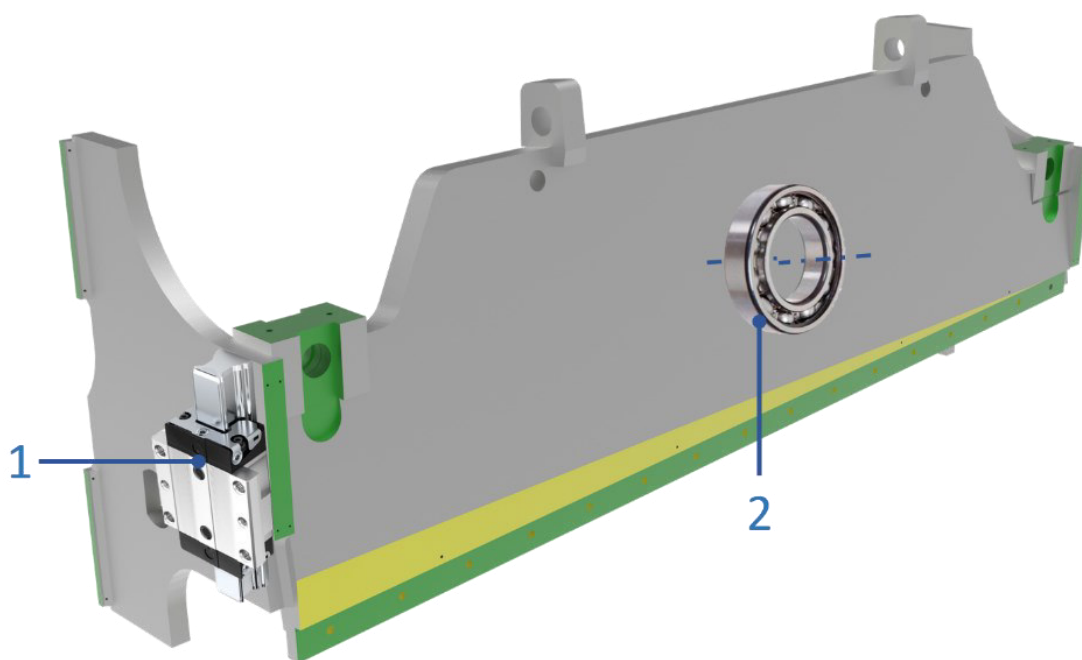


Figura 96 - Exemplo das soluções propostas para o corpo do porta-lâminas sem pré-maquinações

❖ Atuadores principais hidráulicos

Para a uniformização das dimensões dos cilindros foram apresentadas 2 propostas (Figura 97). Uma das soluções consiste em manter as 2 unidades por máquina e tentar uniformizar entre as gamas, enquanto a segunda, é aumentar a quantidade de unidades para 4 por máquina, caso em que as duas unidades adicionais são colocadas como destacado na Figura 97 a azul. O aumento da quantidade de cilindros por máquina tem o principal objetivo de diminuir o diâmetro dos mesmos e minimizar o ângulo máximo de corte o que, por consequência, minimiza o curso dos cilindros, o custo de aquisição dos mesmos e a altura do corpo da estrutura.

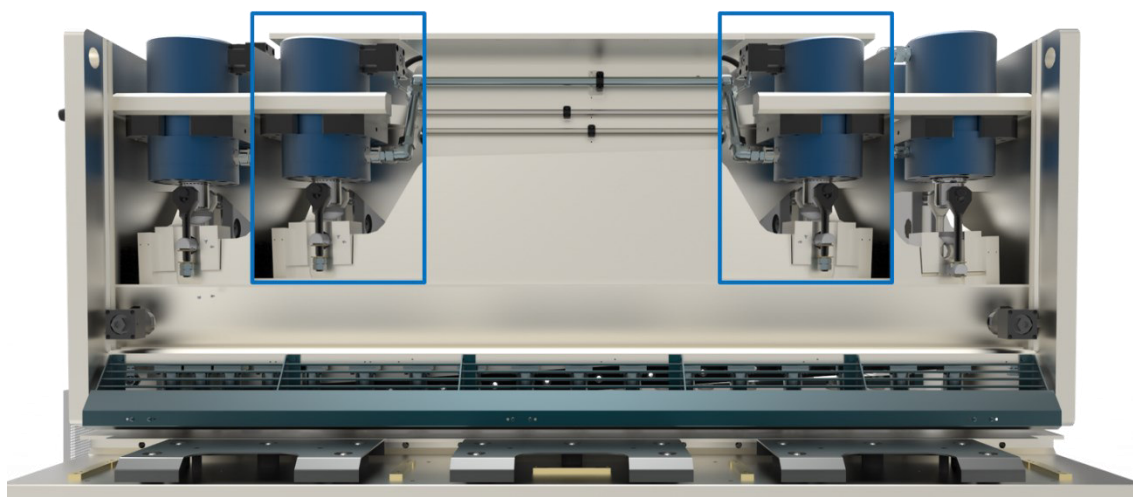


Figura 97 - Representação da solução proposta para aumento da quantidade de cilindros por máquina

❖ Esbarro posterior

Da ideia de tentar uniformizar as réguas de esbarro das guilhotinas surgem duas soluções para a aplicação do esbarro posterior:

- A primeira solução apresentada (Figura 98), consiste em fixar o esbarro à estrutura, caso em que é possível utilizar um esbarro idêntico ao das quinadoras. O guiamento da régua do esbarro é fixo à estrutura e a régua apenas se desloca no plano horizontal. Com esta aplicação surge a possibilidade de minimizar o curso do sistema de anti-torção, dada a eliminação de uma possível colisão da régua do esbarro com a rampa de descarga durante o processo de corte;
- A segunda solução seria manter o esbarro atual, fixo ao porta-lâminas, mas redimensioná-lo de maneira a minimizar as suas dimensões para evitar que este necessite de recuar no corte de tiras pequenas.



Figura 98 - Representação do esbarro de uma quinadora aplicado no modelo de guilhotina v2.0

❖ Grupo hidráulico

Para a intervenção no grupo hidráulico foram propostas algumas soluções para diminuição da complexidade de montagem e do custo do respetivo conjunto. As soluções consideradas foram:

- Troca da bomba hidráulica de engrenagens exteriores por uma bomba de palhetas (Figura 12) de maneira a diminuir o ruído de funcionamento da bomba e custo unitário;
- Colocação de 2 bombas hidráulicas de menor cilindrada para diminuição do custo e possibilidade de uniformização com as outras gamas;
- Criação de um bloco hidráulico intermédio, aglomerando as funções do bloco de segurança, bloco dos calcadores e do bloco para descida do porta-lâminas em modo manual;
- Desenvolvimento de um depósito aplicável a todas as gamas.

❖ Sistema de regulação da folga motorizada

As soluções apresentadas para o sistema da regulação da folga foram com o foco principal na simplificação do conjunto ao nível da sua montagem. Então, as soluções foram:

- Manter apenas o motor do lado direito da máquina para a regulação da folga, mas o veio de transmissão entre os montantes ser por baixo da rampa de descarga. Na Figura 99 está representada uma montagem esquemática, com o veio de transmissão por baixo da rampa de descarga, evitando a colisão com o porta-lâminas, e a transmissão de potência feita por correia dentada, em vez de engrenagens, o que permite reduzir o custo;
- Duplicar a motorização da folga, através da colocação de um motor em cada montante da estrutura, e assim evitar a aplicação de um veio de transmissão entre os montantes da estrutura, o que simplifica a montagem do conjunto.

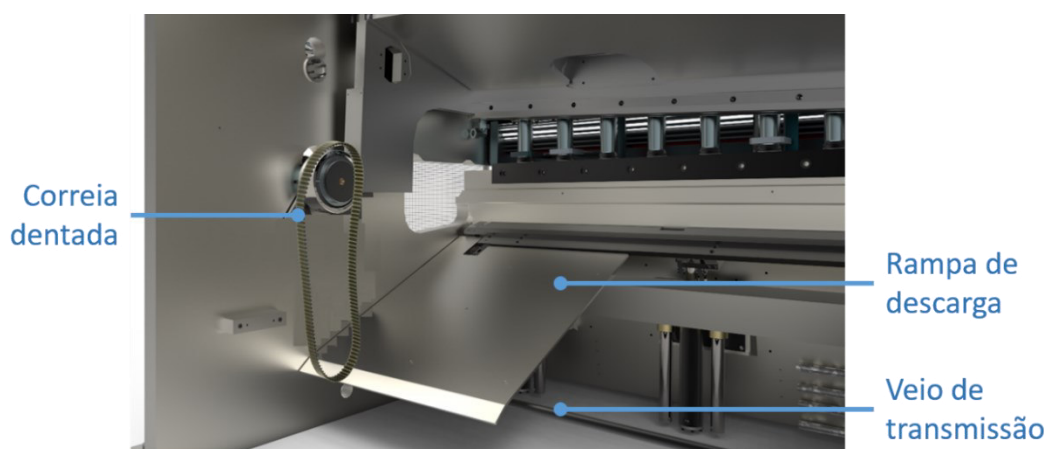


Figura 99 - Representação da solução de aplicação do sistema de regulação de folga por baixo da rampa de descarga

3.7.4 Seleção das ideias a implementar

Neste capítulo é realizado o processo de seleção das ideias a implementar para cada conjunto, a partir das diferentes ideias propostas no subcapítulo 3.7.3. para o projeto desenvolvida da guilhotina GV2030 versão 3.0. Considera-se a mesma ordem de conjuntos do capítulo anterior.

❖ **Corpo da estrutura e do porta-lâminas**

Para a construção do corpo da estrutura optou-se pela solução 2, que consiste na construção de uma estrutura com o caixão postiço. Optou-se por esta solução porque:

- O concorrente direto nacional da ADIRA tem uma solução no mercado idêntica à solução 1. Por essa razão não se optou por esta ideia com vista ter um modelo diferente e de destaque da concorrência;
- Nos finais dos anos 90, já se desenvolveu uma guilhotina de corte basculante, modelo GH da Adira, para corte de chapa até 8 mm de espessura e com 9 metros de comprimento com caixão postiço. Com efeito, até hoje não houve registo de problemas ocorridos devido à aplicação do mesmo por montagem.

Para a construção do corpo do porta-lâminas optou-se pela solução 2, que consiste em colocar um guiamento central, fixo na chapa do avental. Os principais motivos pela solução optada foram:

- Uma vez que o alvo de estudo é uma guilhotina de ângulo variável, o conjunto de guiamento por guias no avental é demasiado complexo. O ângulo variável obriga à aplicação destas guias por um sistema com rótula e, dada a robustez do corpo do porta-lâminas, têm de ser aplicadas guias reforçadas para suportar a carga a que este corpo está sujeito;
- Montagem das guias têm de ser após a colocação do porta-lâminas na posição de serviço, de maneira a evitar a possibilidade de danificar o guiamento na montagem do porta-lâminas na máquina;
- Processo de montagem do guiamento central é muito mais simples do que a aplicação das guias e patins no porta-lâminas após sua colocação na máquina.

❖ **Atuadores principais hidráulicos**

Foi decidido optar pela solução proposta para a atuação hidráulica a aplicação de 4 unidades de cilindros hidráulicos. Com o aumento das unidades por máquina é possível diminuir o diâmetro interno dos cilindros e aumentar a carga aplicada ao porta-lâminas, dado o aumento de área dos cilindros sujeitos à pressão nominal de serviço, a 250 bar. Com esta aplicação reforça-se o objetivo inicial de diminuição do ângulo máximo de corte e devido à diminuição do tamanho do cilindro é possível efetuar o fabrico dos mesmo através de matéria prima normalizada e consequente redução do custo unitário.

❖ **Esbarro posterior**

A solução optada para aplicação do esbarro na máquina foi de manter o mesmo método de montagem atual, nomeadamente a fixação ao porta-lâminas. De facto, a fixação do esbarro à estrutura tem algumas vantagens, mas as desvantagens apresentadas têm mais impacto no desempenho da máquina. Nesse sentido, de seguida apresenta-se as vantagens e desvantagens de fixação do esbarro à estrutura.

- **Vantagens:**
 - Régua uniformizada entre gamas do mesmo comprimento;
 - SAT com menor curso, o que pode ajudar a evitar fosso em algumas máquinas;
 - A complexidade de fabrico do esbarro é simplificada.
- **Desvantagens:**
 - Obriga a que o fabrico do porta-lâminas seja composto apenas por uma chapa grossa sujeita totalmente ao esforço de corte, o que coloca em risco a rigidez do elemento e obriga à colocação de um guiamento posterior por rolamentos a todo o comprimento, como por exemplo;
 - Obriga à retração do esbarro em todos os cortes de chapa, o que diminui imenso a cadência da máquina.

A aplicação no modelo 2.0, aplicada desde o último desenvolvimento deste modelo de guilhotina, está validada ao nível do funcionamento sem nunca ter tido nenhum registo de defeitos causados pela operação do esbarro. O foco será no redimensionamento da régua do esbarro de modo a evitar a retração do esbarro, aumentando assim a cadência da máquina. Além das desvantagens apresentadas do método de fixação à estrutura, a fiabilidade do sistema atual faz com que a sua seleção seja inerente.

❖ **Grupo hidráulico**

As soluções selecionadas para a melhoria do circuito hidráulico foram:

- Aplicação de uma bomba de palhetas interna;
- Uniformização do depósito para todas as gamas.

Esta solução tem como principais vantagens a diminuição do ruído do sistema hidráulico da guilhotina e do custo unitário. De referir que este tipo de bombas tem a desvantagem de que o primeiro arranque da bomba deve ser cuidadoso, devido à fragilidade das palhetas e ao ar presente no rotor. No primeiro arranque, o atrito das palhetas com o anel interno pode conduzir à rotura das lâminas das palhetas devido à ausência de óleo dentro da bomba.

A colocação de duas bombas externas de menor cilindrada obriga à aplicação de um motor com veio de saída duplo ou dois motores. Devido à falta de espaço na zona de montagem do depósito, excluiu-se esta solução.

Durante a elaboração deste projeto, a ideia de criação de um bloco intermédio foi aplicada noutra máquina. No entanto, teve lugar uma reunião com o departamento de montagem, que informou do aumento da dificuldade na construção do circuito hidráulico devido à falta de espaço envolvente. Na Figura 100 pode-se observar a aplicação do bloco numa GV de 3 metros, GV1630, e facilmente se percebe que o espaço envolvente é diminuto.

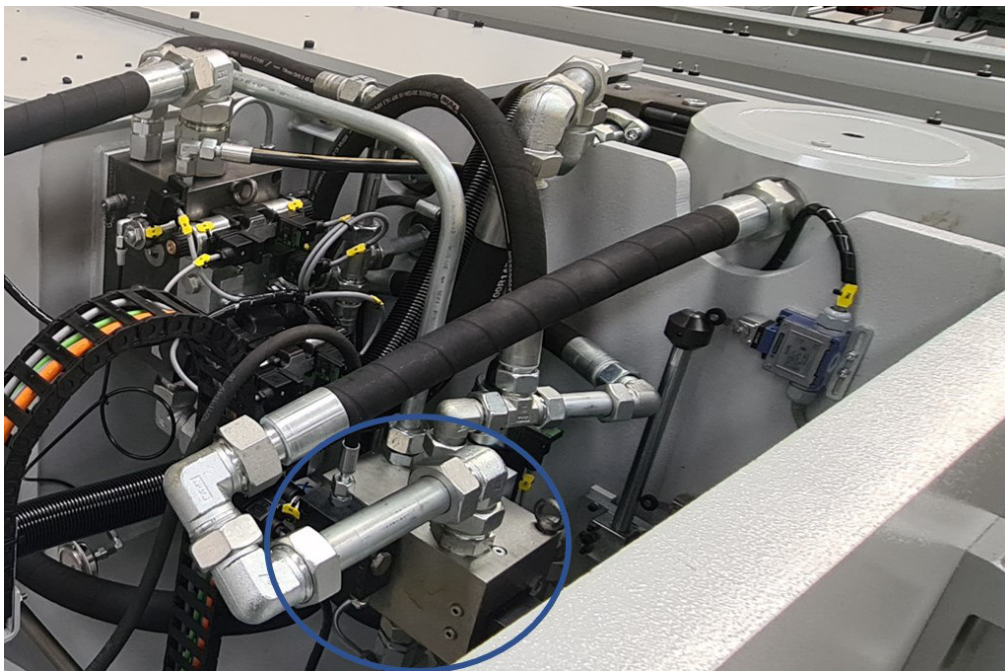


Figura 100 - Vista posterior de uma guilhotina, GV1630, com a aplicação do bloco hidráulico intermédio

❖ Sistema de regulação da folga motorizada

O sistema de regulação de folga não necessita de sincronismo no movimento do porta-lâminas, isto é, o lado esquerdo e direito do porta-lâminas movem-se exatamente ao mesmo tempo. A solução da aplicação do sistema de regulação no modelo 2.0 mas com a colocação do veio de transmissão por baixo da rampa implica a elaboração de blindagens de proteção do sistema na zona onde a tira de chapa cortada pode colidir com este conjunto. Desta forma, optou-se pela solução de aplicação de motores, um em cada montante da estrutura, porque a montagem do conjunto é mais simples e evita que as tiras cortadas colidam com o sistema. Após uma breve análise dos custos do atual sistema, da guilhotina 2.0, verificou-se que o custo unitário do motor é inferior ao custo de um sector dentado, o que reforça a seleção da solução optada.

3.7.5 Projeto das melhorias a implementar

Neste capítulo apresentam-se as soluções desenvolvidas como resultado do processo de seleção descrito nos capítulos 3.7.3 e 3.7.4.

3.7.5.1 Corpo da estrutura e do porta-lâminas

De maneira a poder comparar o desempenho dos corpos estruturais, entre o modelo atual e o desenvolvido, é feita uma análise estática, pelo MEF, na qual se compara os resultados do deslocamento, horizontal e vertical, e a máxima tensão instalada. Para este efeito tomou-se como base o caso de estudo dos corpos da estrutura e do porta-lâminas sujeitos ao esforço de corte máximo para uma chapa de aço macio de espessura de 20 mm.

3.7.5.1.1 Cálculo das cargas aplicadas ao caso de estudo

De seguida são apresentados os cálculos das cargas aplicadas do caso de estudo. Os cálculos apresentados são respetivos ao esforço de corte máximo e à força de calcamento dos calcadores.

Na Tabela 22 estão representados os valores para cálculo das cargas aplicadas ao sistema. Posteriormente utilizar-se-ão para a análise comparativa pelo MEF dos modelos da versão 2.0 e 3.0.

Tabela 22 - Dados fornecidos para estudo por elementos finitos dos modelos 2.0 e 3.0

		GV 2030	
		V 2.0	V 3.0
Calcadores			
$\emptyset_{\text{calc.}}$	Diâmetro do pistão [mm]	45	50
Qtd.	Quantidade [un]	17	
A_{calc}	Secção do pistão [mm ²]	1 590	1 963
Conjunto máquina			
P	Pressão de serviço [MPa]	25	
α_{ct}	Ângulo máximo de corte [grau]	3,5	3
Matéria-prima para corte			
e	Espessura da chapa [mm]	20	
$\tau_{\text{rot.}}$	Tensão de rotura [MPa]	430	
C	Fator de correção	0,7	

Devido ao sistema hidráulico destas máquinas consistir num circuito em série, a carga máxima do sistema, imposto pelo esforço de corte máximo, é distribuída pelas 4 unidades dos cilindros hidráulicos. De seguida apresentam-se os cálculos das cargas a aplicar no estudo pelo MEF, segundo os valores indicados na Tabela 22.

❖ **GV2030 (modelo 2.0)**

Segundo critério usado na Adira para dimensionamento de guilhotinas, deve ser considerada, no estudo por MEF, uma componente horizontal estimada em cerca de 20% da força de corte (F_c), devido à deformação do gume das lâminas ao longo do tempo de vida útil da máquina.

Segundo equação (3).

$$F_c = \frac{0,5 \times e^2}{\text{tg}(\alpha_{ct})} \times \sigma_{rot} \times C = \frac{0,5 \times 20^2}{\text{tg}(3,5)} \times 430 \times 0,7 = \mathbf{984261 \text{ N}}.$$

A componente horizontal da força de corte ($F_{c.Hor.}$) é:

$$F_{c.Hor.} = 20\% \cdot F_c = \mathbf{196852 \text{ N}}.$$

A força de calcamento ($F_{calc.}$) dos calcadores:

$$F_{calc.} = P \times A_{calc} \times Qtd. = 25 \times 1590 \times 17 = \mathbf{675933 \text{ N}}.$$

❖ **GV2030 (modelo 3.0)**

Assumindo o mesmo procedimento de cálculo do modelo de base 2.0,

$$F_c = \frac{0,5 \times 20^2}{\text{tg}(3)} \times 430 \times 0,7 = \mathbf{1148684 \text{ N}}.$$

$$F_{c.Hor.} = \mathbf{229737 \text{ N}}$$

$$F_{calc} = 25 \times 1963 \times 17 = \mathbf{834486 \text{ N}}.$$

Em função dos resultados obtidos, os valores das forças calculadas para os dois modelos, a colocar na simulação dos corpos dos porta-lâminas e estruturas, estão indicados na Tabela 23.

Tabela 23 - Valores para simulação dos corpos estruturais dos modelos da versão 2.0 e 3.0

		GV 2030	
		Versão 2.0	Versão 3.0
F_c	Força de corte máxima [N]	984261	1148684
$F_{c.Hor.}$	Força de corte horizontal [N]	196852	229737
F_{calc}	Força de calcamento [N]	675933	834486
$F_{guia.frt}$	Pré-carga guiamento frontal [N]	26 900	24 500
P	Pressão de serviço [MPa]	25	

3.7.5.1.2 Pré-processamento dos modelos numéricos

De seguida são descritos todos os parâmetros selecionados para elaboração do estudo pelo método de elementos finitos, como os modelos geométricos, tipo de malha e respetivo elemento, condições fronteira e as cargas a aplicar nos modelos.

❖ Modelos geométricos

Os modelos geométricos foram simplificados geometricamente, ou seja, pequenos raios de concordância foram redesenhados em arestas vivas, furos de pequenas dimensões para fixação de acessórios foram eliminados e até mesmo cordões de soldadura foram suprimidos. Para simplificar a simulação, os modelos a estudar foram analisados como uma peça, o que garante a continuidade correta da malha entre os vários elementos.

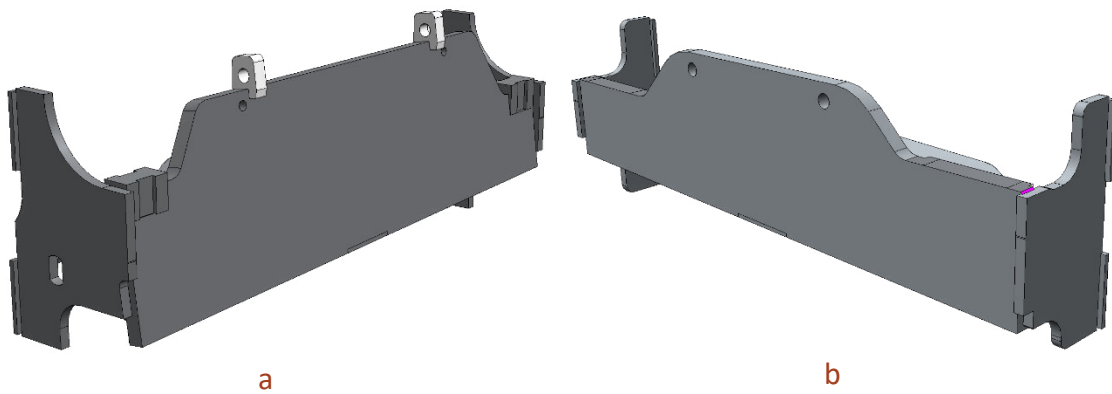


Figura 101 - Modelos geométricos simplificados dos porta-lâminas: a) versão 2.0 e b) versão 3.0

Na Figura 101 observam-se os modelos dos porta-lâminas da versão 2.0 (Figura 101-a) e 3.0 (Figura 101-b), com a simplificação mencionada. Para restringir a posição das cargas aplicadas nos porta-lâminas, foi feita uma separação de superfície nas áreas de contacto com os elementos responsáveis pelo guiamento dos porta-lâminas, frontais e posteriores, e na área referente ao esforço de corte segundo o caso de estudo.

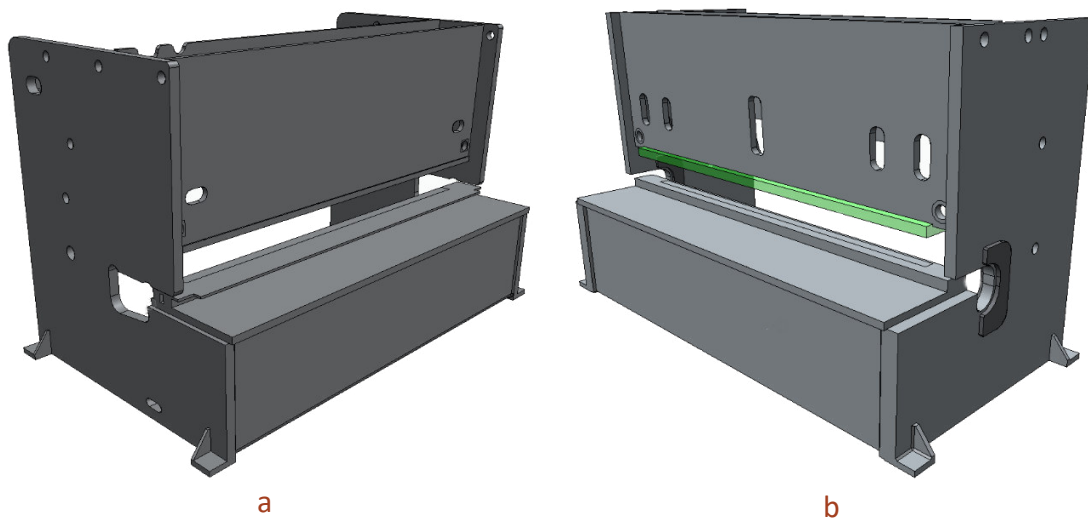


Figura 102 - Modelos geométricos simplificados das estruturas: a) versão 2.0 e b) versão 3.0

Na Figura 102 estão ilustrados os modelos geométricos dos corpos estruturais da versão 2.0 (Figura 102-a) e 3.0 (Figura 102-b). De maneira a simplificar a simulação, no modelo de versão 3.0 foram eliminadas as cavilhas que fazem a união do caixão à estrutura, e o caixão foi simulado como um corpo soldado à estrutura.

❖ **Software e tipo de malha**

O *software* utilizado na elaboração e simulação por elementos finitos dos modelos CAD foi o Solid Edge. A simulação por elementos finitos é executada através do Solid Edge Simulation com recurso ao *software* de processamento NX Nastran da Siemens.

❖ **Matéria prima dos modelos geométricos**

Como referido no capítulo 2.3.1, o aço ao carbono utilizado no fabrico do corpo do porta-lâminas é o S275. Para efeitos de estudo foi considerada a tensão de cedência de 275 MPa e tensão de rutura de 430 MPa (Figura 55).

❖ **Condições fronteira dos modelos**

Como se considera o carregamento a meio vão, a carga máxima é distribuída de igual forma pelos cilindros e a força de corte é máxima, aplicada ao centro de ambos os corpos, numa área da largura da chapa do avental pelo comprimento do cateto adjacente do ângulo de corte máximo.

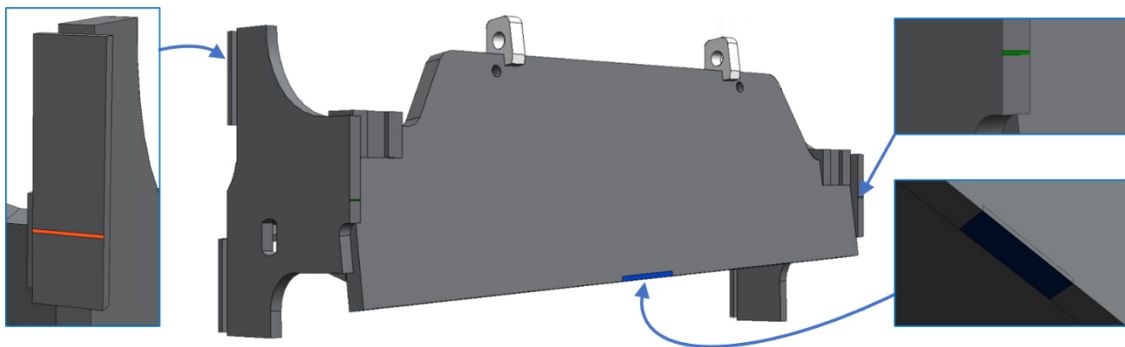


Figura 103 - Detalhe da restrição na zona da área de corte do porta-lâminas do modelo 2.0

Como o porta-lâminas é apenas fixo à haste dos cilindros hidráulicos e guiado pelos guiamentos posteriores e frontais fixos no corpo da estrutura, as restrições do corpo do porta-lâminas terão de ser nas faces de contacto com os guiamentos. Segundo recomendações do gabinete de projeto da Adira é estipulado que, para simulação, o porta-lâminas é restringido numa superfície limitada no avental, referente à área de corte (Figura 42). Após simulação, pode-se retirar o valor das forças de reação dos guiamentos e, posteriormente, colocá-las na simulação do corpo da estrutura. Na Figura 103 podem-se observar as áreas restritas referentes ao contato com os guiamentos posteriores (Figura 103 destacada a laranja), guiamentos frontais (Figura 103 destacada a verde), e na zona sujeita ao corte (Figura 103 destacada a azul). Foi aplicado o mesmo processo de restrição das áreas ao modelo do porta-lâminas da guilhotina 3.0.

Para posicionamento correto das áreas, estudou-se a máquina completa com o porta-lâminas no ângulo máximo, $3,5^\circ$ no modelo 2.0 e 3° no 3.0, e verificou-se a posição do contacto dos guiamentos com o porta-lâminas no corte a meio vão.

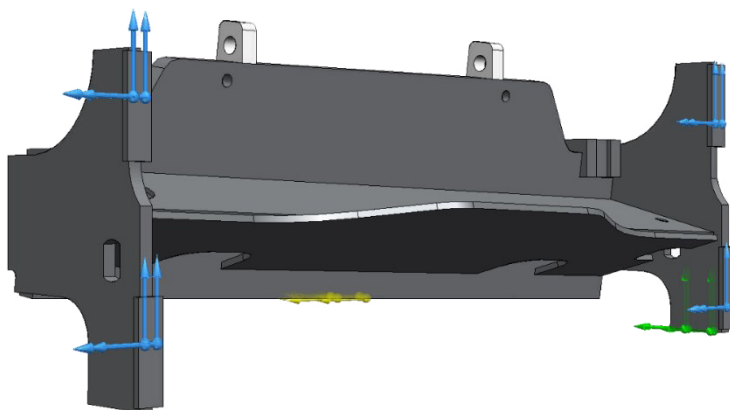


Figura 104 - Condições fronteira impostas no porta-lâminas do modelo de guilhotina 2.0

Na Figura 104, ao contrário dos outros *softwares* de simulação, são visíveis os eixos de liberdade impostos no porta-lâminas, restringindo o elemento de maneira a torná-lo isostático. As restrições dos guiamentos posteriores (destacados a azul) impedem o deslocamento no plano transversal. Ao centro do avental, a área restrita do esforço de corte (destacado a amarelo) impede o movimento no plano vertical, e na face inferior do montante esquerdo está restrito movimento no plano horizontal.

O mesmo princípio foi aplicado para o estudo do porta-lâminas desenvolvido. Na Figura 105 podem-se observar as mesmas condições fronteira aplicadas no porta-lâminas 3.0.

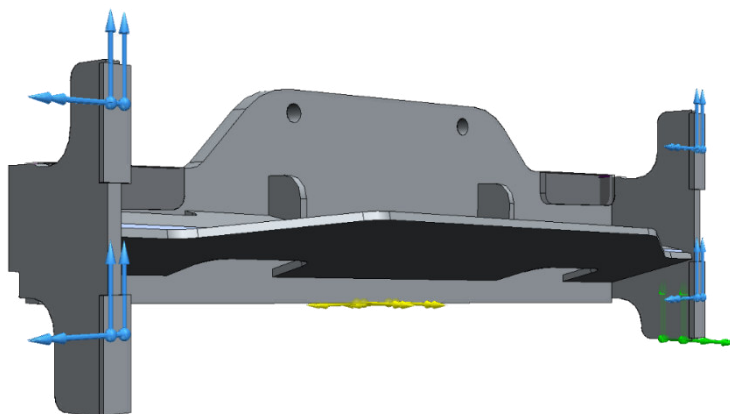


Figura 105 - Condições fronteira impostas no porta-lâminas do modelo de guilhotina 3.0

As condições fronteira do corpo da estrutura, são definidas como se a guilhotina fosse colocada apenas sobre a superfície, ou seja, livre sobre o plano horizontal para fletir quando submetida aos esforços de corte. Pode-se afirmar que a máquina durante o corte está praticamente em equilíbrio das forças aplicadas, ou seja, o esforço dos cilindros sobre a estrutura é oposto ao esforço de corte máximo e a força de corte horizontal é oposta às reações nos guiamentos.

Assim como no porta-lâminas, restringiu-se a área de corte a meio vão. Na Figura 106 pode-se observar com detalhe as áreas restringidas para o esforço de corte máximo vertical e horizontal.

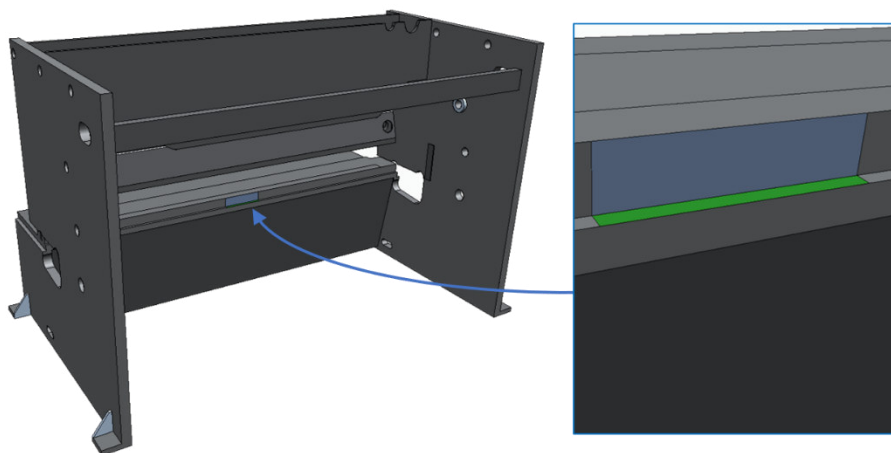


Figura 106 - Detalhe da restrição na zona da área de corte da estrutura do modelo 2.0

Na Figura 106 pode-se observar as áreas restritas referente à área para aplicação do esforço de corte máximo (destacada a verde) e para a componente horizontal da força de corte (destacada a azul). O mesmo processo de restrição das áreas foi aplicado ao modelo da estrutura 3.0.

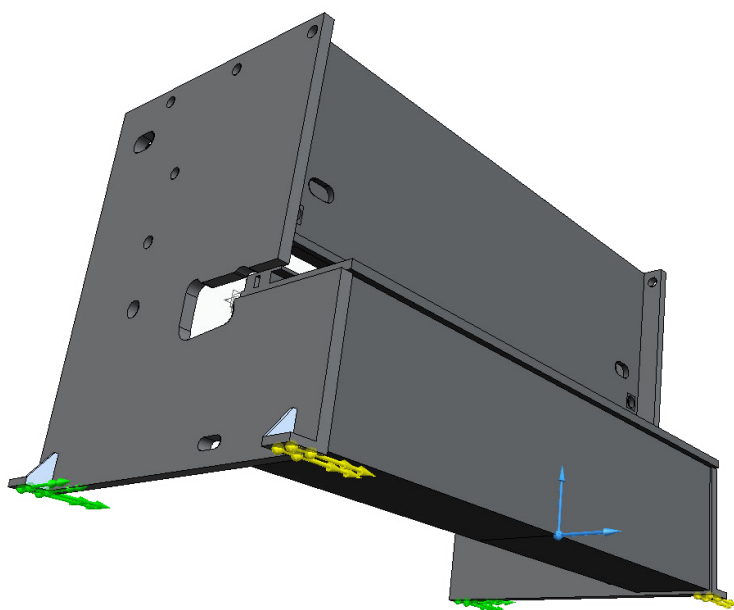


Figura 107 - Condições fronteira impostas na estrutura do modelo 2.0

Na Figura 107 podem se ver as restrições nas sapatas frontais (destacados a amarelo) que impedem a estrutura de se mover no plano vertical, mas deixando o caixão fletir, assim como as restrições nas sapatas posteriores (destacadas a verde) deixando os montantes também fletirem no plano longitudinal. De maneira a evitar que o caixão se desloque sobre a superfície, restringiu-se um ponto (destacado a azul).

O mesmo critério de aplicação das condições fronteira no modelo 2.0, aplicou-se também na estrutura do modelo 3.0, representada na Figura 108.

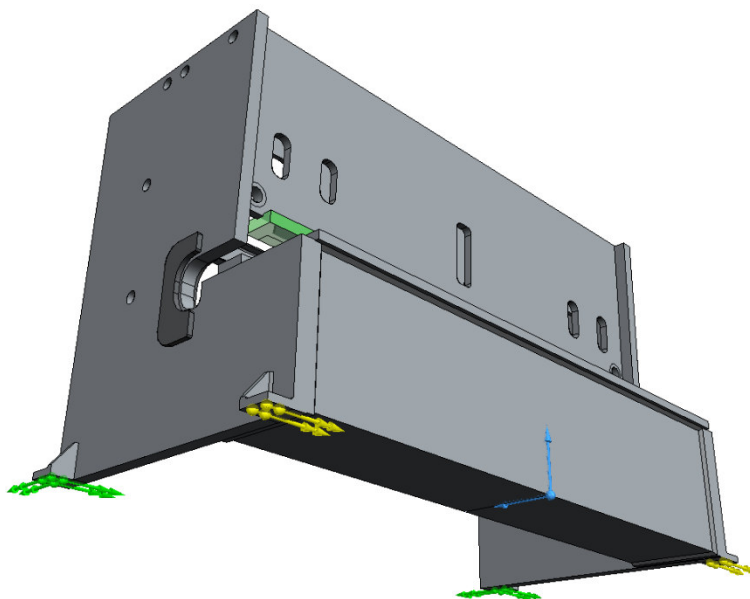


Figura 108 - Condições fronteira impostas na estrutura do modelo 3.0

❖ Aplicação das cargas nos modelos

De seguida são aplicadas as cargas ao corpo do porta-lâminas. Na Figura 109 encontram-se representadas as cargas exercidas pelos cilindros (destacadas a azul) posicionadas nos reforços para amarração dos mesmos, cujo a soma é igual ao esforço de corte máximo. A carga referente à componente horizontal da força de corte é colocada na área restringida na face frontal do avental (destacada a laranja), e as pré-cargas impostas nos guiamentos frontais (destacadas a verde) são aplicadas nos montantes.

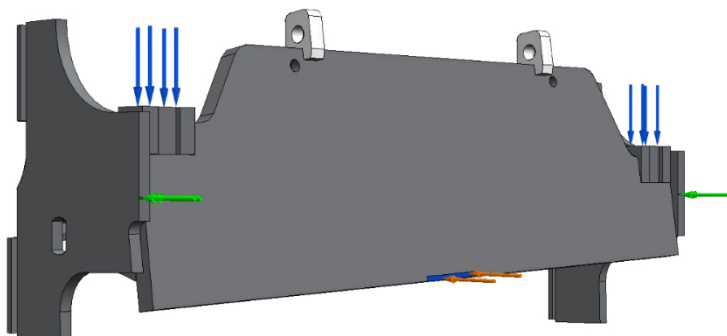


Figura 109 - Cargas aplicadas ao porta-lâminas do modelo 2.0

O mesmo critério das cargas, e respetivo esquema de cores, se aplica no porta-lâminas desenvolvido, como representado na Figura 110.

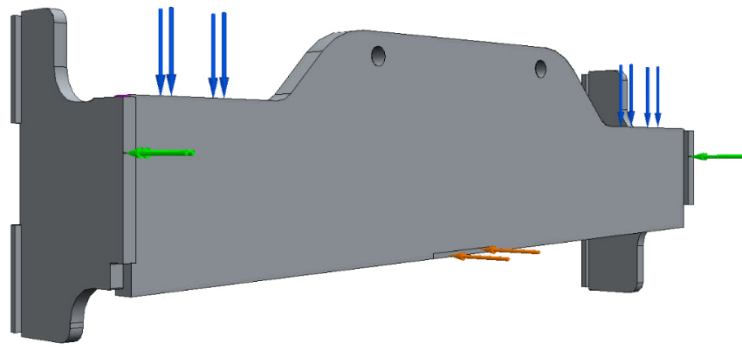


Figura 110 - Cargas aplicadas ao porta-lâminas do modelo 3.0

Após a simulação dos corpos dos porta-lâminas, com recurso aos resultados da análise dos mesmos, podem-se retirar as reações das forças aplicadas nas áreas restringidas para os guiamentos posteriores. De seguida está representada a aplicação das cargas ao corpo da estrutura (Figura 111).

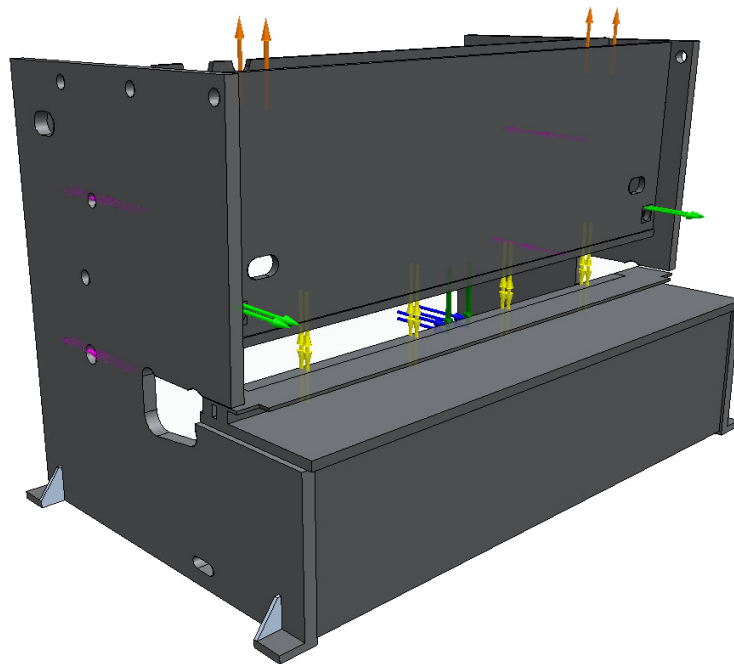


Figura 111 - Cargas aplicadas na estrutura do modelo 2.0

Na Figura 111 encontram-se representadas as cargas aplicadas na estrutura: a força exercida pelos cilindros hidráulicos (destacadas a laranja) nas chapas de fixação dos cilindros, o esforço de corte, componente vertical e horizontal, aplicado ao caixão (destacada a azul), a pré-carga imposta nos guiamentos frontais (destacadas a verde) aplicadas na chapa frontal, a força de calcamento aplicado no caixão e na barra dos calcadores (destacado a amarelo) e por fim as reações retiradas da simulação dos porta-lâminas aplicadas na furação respetiva (destacadas a roxo).

O mesmo critério de aplicação das cargas, incluindo o esquema de cores, é imposto no corpo da estrutura do modelo 3.0, representado na Figura 112.

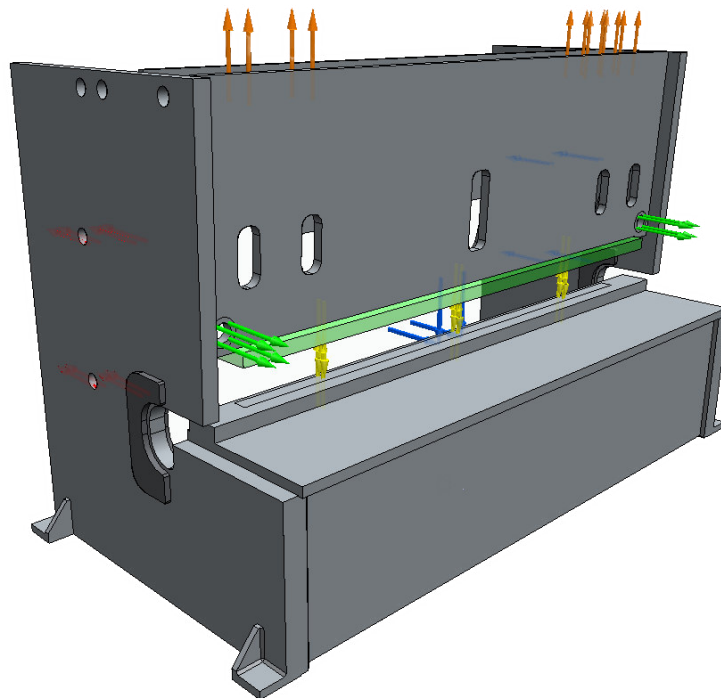


Figura 112 - Cargas aplicadas na estrutura do modelo 3.0

❖ Tipo de malha e elemento

A malha selecionada para a simulação é constituída por elementos tridimensionais tetraédricos sólidos de segunda ordem. Para a obtenção dos resultados finais do estudo, dos modelos 2.0 e 3.0, foram selecionados elementos com um tamanho de aresta de 25 mm. Nas áreas de contacto restringidas os elementos foram refinados para um comprimento de aresta de 5 mm.

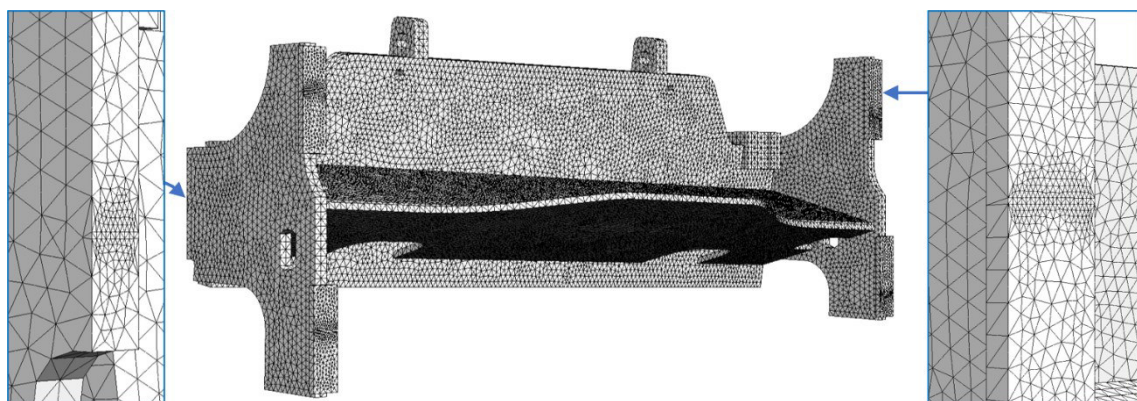


Figura 113 - Modelo geométrico do porta-lâminas 2.0 com detalhe para o refinamento de malha

Na Figura 113 está ilustrado o tipo de malha selecionado, e com os pormenores de refinamento da malha nas áreas divididas das faces de contacto com os guiamientos frontais e posteriores.

O tamanho da aresta do elemento selecionado, de 20 mm, foi definido através de um estudo inicial do porta-lâminas 2.0, de convergência da malha desde os 90 mm até aos

20 mm. Optou-se pelo elemento de 25 mm porque, como se verifica na Tabela 24, os valores para o tamanho de 20 mm de aresta praticamente não diferem do de tamanho de 25 mm, mas este último conduz ao dobro do tempo para obtenção dos resultados.

Tabela 24 - Resultados do estudo de convergência de malha

Tamanho de aresta [mm]	N.º de elementos	N.º de nós	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento máximo [mm]
90	14893	30467	128	1,10
45	44134	83696	167	1,12
35	80331	143624	192	1,13
30	111690	197084	207	1,13
25	165805	286473	214	1,13
20	242676	419288	215	1,13

3.7.5.1.3 Resultados obtidos dos modelos geométricos 2.0 e 3.0

Os estudos dos modelos baseiam-se na análise da máxima tensão instalada de von Mises e dos deslocamentos máximos, vertical e horizontal.

Segundo gabinete técnico da Adira, o deslocamento horizontal deve ser analisado na zona do corte porque é importante garantir que a folga entre lâminas não exceda um erro máximo de 30% da folga aplicada indicada no subcapítulo 2.2.4.4. Neste caso de estudo, para uma folga de 2 mm, o deslocamento máximo, ou seja, a soma dos deslocamentos na zona de corte do porta-lâminas com o da estrutura, não deve exceder os 0,6 mm. Na Figura 114 está representado o momento em que as lâminas se cruzam durante o corte e a folga estipulada. A deformação horizontal, indicada pela seta a cor de tijolo, representa os sentidos da deformação.

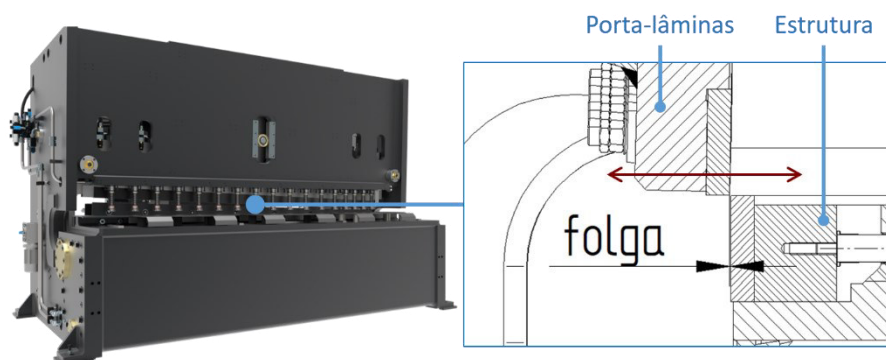


Figura 114 - Vista em detalhe da guilhotina 3.0 com pormenor da orientação do deslocamento horizontal

Dadas as grandezas de esforços a que este tipo de máquinas está sujeito, tais como a força de calcamento e o esforço de corte, prevê-se que haja o efeito de flexão do caixão

e da chapa frontal. Isto porque, para eliminar totalmente este efeito, a dimensão do corpo estrutural tomaria proporções enormes. Segundo estudos prévios por parte do gabinete técnico da Adira, a soma do deslocamento vertical combinado, do da chapa frontal com o do caixão, não deve ultrapassar os 6 mm independentemente do comprimento da máquina.

De seguida serão apresentados os resultados obtidos do corpo do porta-lâminas do modelo 2.0.

❖ **Corpo do porta-lâminas do modelo 2.0**

Como referido anteriormente, após simulação dos corpos dos porta-lâminas, com recurso a uma folha de cálculo obtiveram-se as reações dos nós das áreas restringidas dos guiamentos, que são usadas como dados de entrada na simulação dos corpos das estruturas.

○ Tensão de von Mises

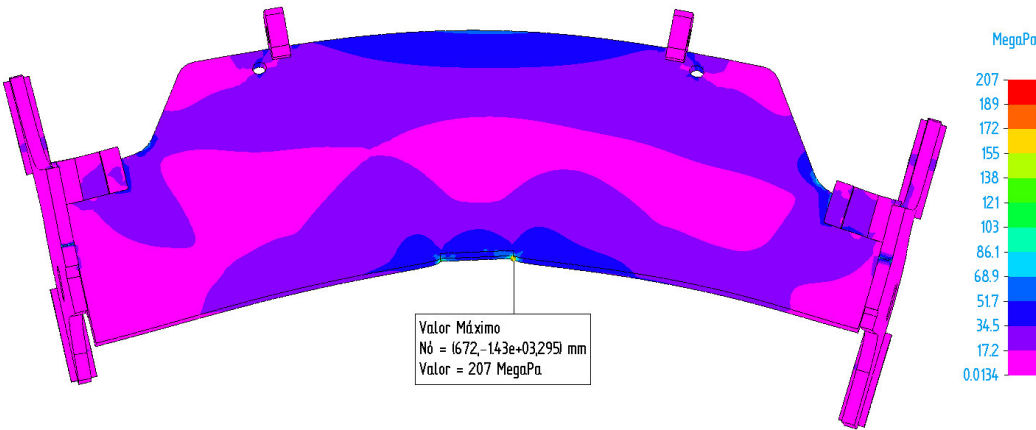


Figura 115 - Representação das tensões de von Mises instaladas no porta-lâminas do modelo 2.0

Na Figura 115 é visível que grande parte do corpo do porta-lâminas tem uma tensão instalada inferior a 70 MPa. A tensão máxima desenvolvida, como era de esperar, localiza-se na área de corte e apresenta um valor máximo de **207 MPa**.

Fazendo o estudo das forças de restrição na área restringida dos guiamentos posteriores, constatou-se que os resultados obtidos são praticamente idênticos entre os guiamentos superiores esquerdo e direito, e o mesmo acontece nos guiamentos inferiores. Na Tabela 25 estão representados os resultados das reações.

Tabela 25 - Resultados das reações dos guiamentos posteriores do modelo 2.0

Guiamentos posteriores do modelo 2.0			
	Superior esquerdo	Inferior esquerdo	Superior direito
			Inferior direito
Reação [N]	67783	29036	65734
			30864

○ Deslocamento horizontal máximo

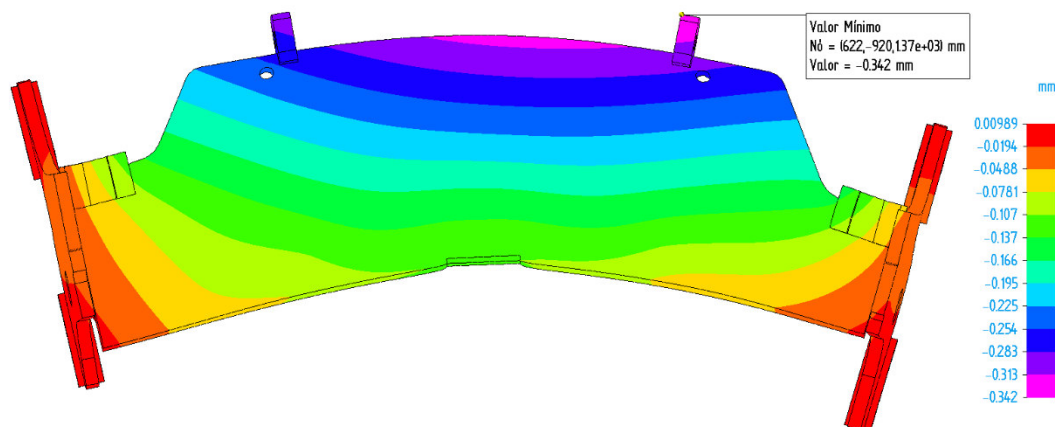


Figura 116 - Representação do deslocamento horizontal no corpo do porta-lâminas do modelo 2.0

Na Figura 116 está representado o deslocamento máximo horizontal do corpo do porta-lâminas na zona superior da chapa do avental, com um valor máximo absoluto de 0,342 mm no sentido posterior do corpo.

Como mencionado no início do capítulo, interessa analisar o deslocamento na zona de corte. Na Figura 117 está representada a leitura efetuada, a meio da área restringida de corte, do valor máximo de deslocamento do nó central, de **0,125 mm**.

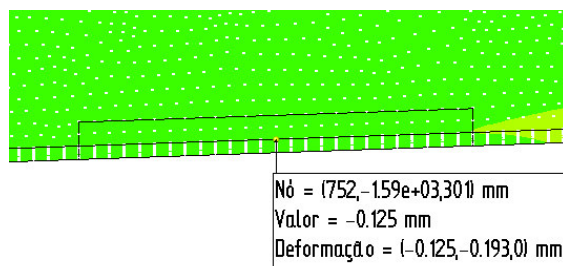


Figura 117 - Representação do valor máximo do nó na zona de corte do porta-lâminas do modelo 2.0

○ Deslocamento vertical máximo

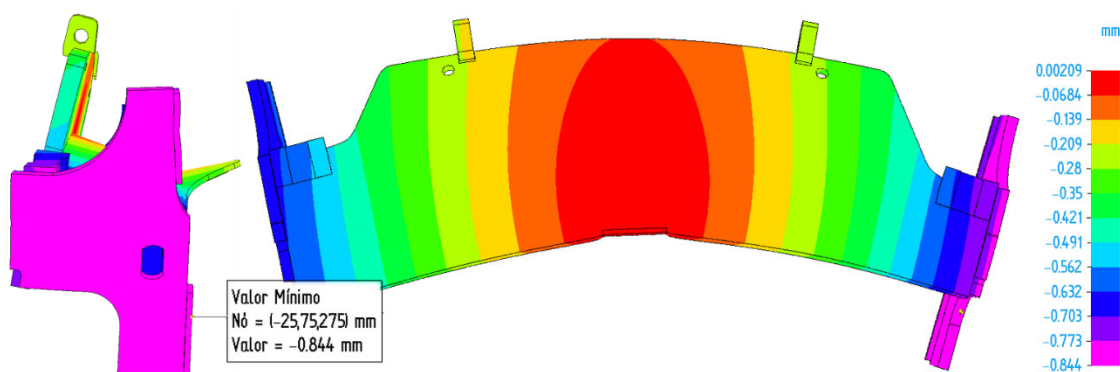


Figura 118 - Representação do deslocamento vertical no corpo do porta-lâminas do modelo 2.0

Na Figura 118 está representado o deslocamento vertical máximo do corpo do porta-lâminas situado no montante direito do corpo e apresenta um valor de **0,844 mm** no

sentido interior do corpo. Como a face de contato dos guiamentos posteriores tem cerca do dobro da largura dos anéis de guiamento, está garantido contato dos mesmos para um deslocamento máximo dos montantes do porta-lâminas.

❖ Corpo da estrutura do modelo 2.0

Com os resultados obtidos referente às reações do porta-lâminas sobre os guiamentos posteriores, pode-se executar a simulação do modelo do corpo da estrutura da guilhotina 2.0.

○ Tensão de von Mises

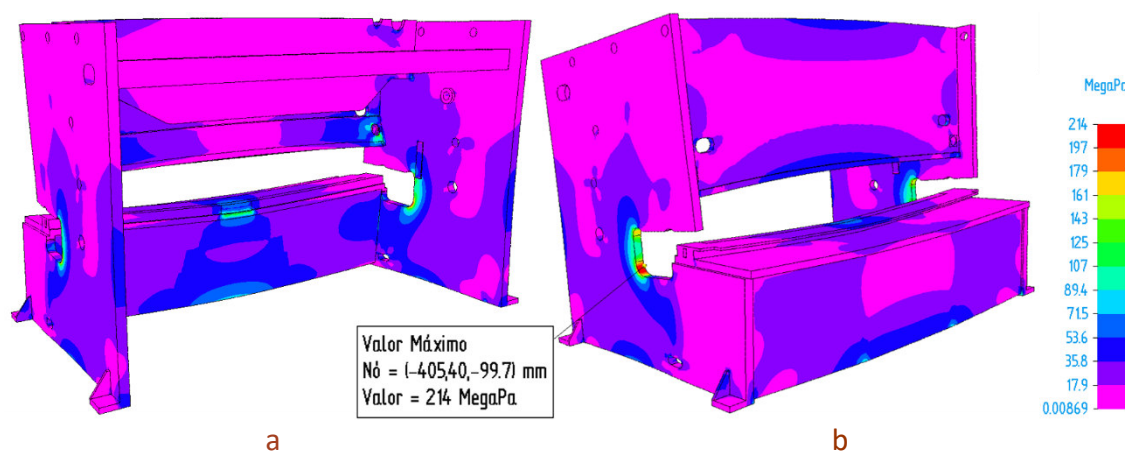


Figura 119 - Representação das tensões de von Mises instaladas na estrutura do modelo 2.0 na vista isométrica posterior (a) e frontal (b)

Na Figura 119 está representada a tensão máxima instalada no corpo da estrutura do modelo 2.0, localizada na zona da cava dos montantes, com um valor máximo de **214 MPa**. É visível também que a zona posterior dos guiamentos frontais e da zona de corte restringidas apresentam valores acima dos 100 MPa (Figura 120).

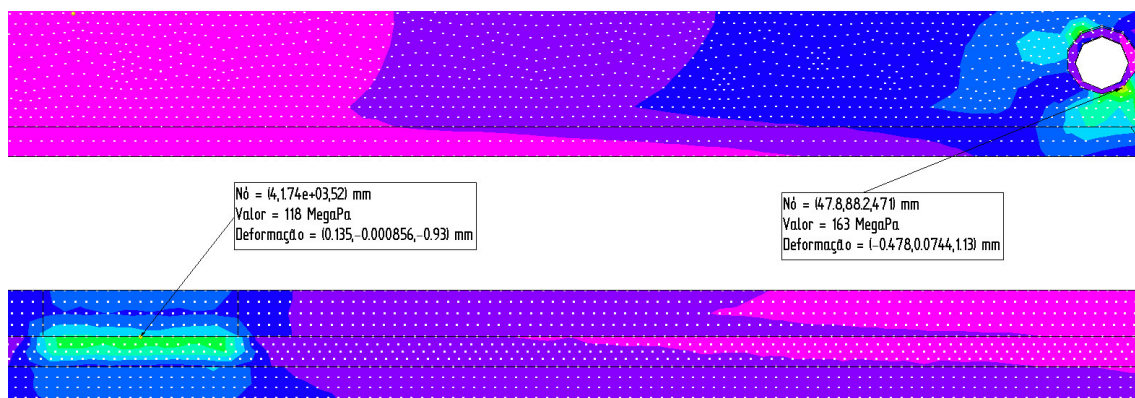


Figura 120 - Concentrações de tensão máximas dos nós na zona de corte e na zona do guiamento frontal

○ Deslocamento horizontal máximo

Como referido na análise do porta-lâminas é importante que a soma das deformações horizontais do porta-lâminas e do caixão não ultrapasse os 0,6 mm.

Na Figura 121 está representado o deslocamento máximo horizontal localizado na chapa frontal da estrutura no sentido posterior do corpo, com um valor máximo absoluto de 2,57 mm.

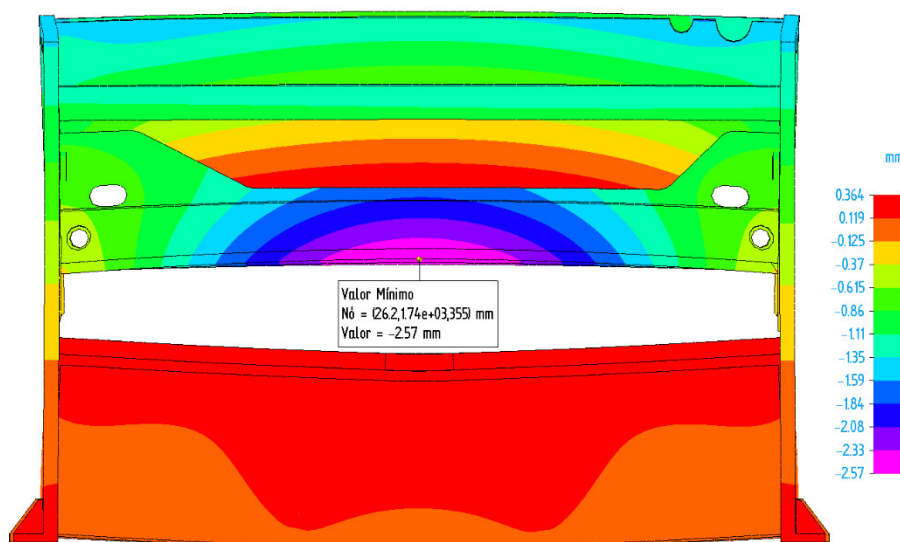


Figura 121 - Representação do deslocamento máximo horizontal na vista posterior da estrutura do modelo 2.0

Independentemente do valor máximo do deslocamento horizontal, o importante é analisar a zona restringida do corte. O deslocamento do nó central na área do corte é de **0,314 mm** (Figura 122).

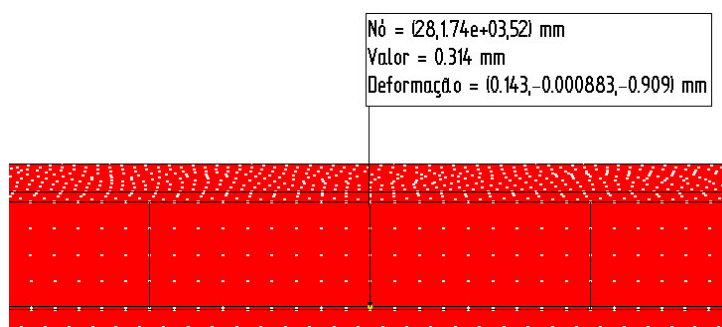


Figura 122 - Representação do valor do deslocamento horizontal do nó central na zona de corte da estrutura do modelo 2.0

Somando os valores obtidos da deformação horizontal do corpo do porta-lâminas, de 0,125 mm, com o da estrutura na zona de corte, tem-se um deslocamento máximo combinado de 0,439 mm, o qual está dentro do limite máximo de 0,6 mm.

○ Deslocamento vertical máximo

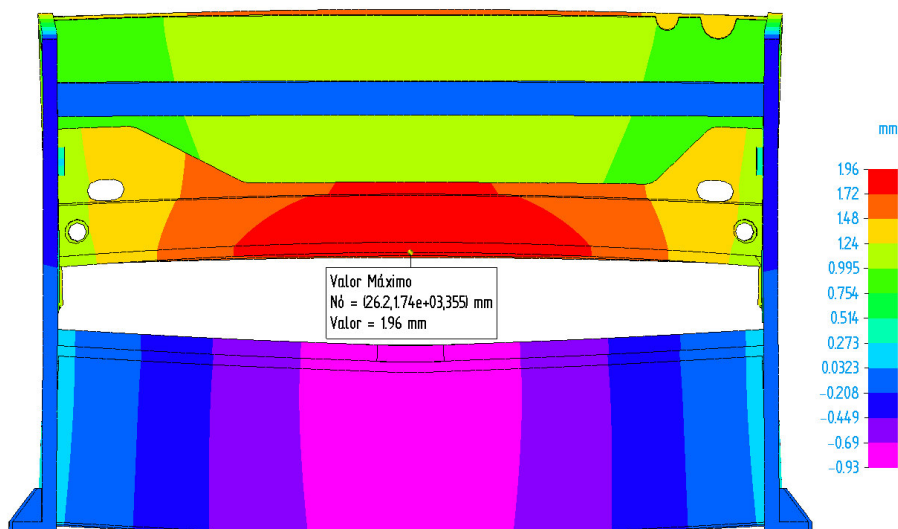


Figura 123 - Representação do deslocamento máximo vertical na vista posterior da estrutura do modelo 2.0

Sabe-se que o deslocamento máximo vertical na estrutura se situa na chapa frontal e apresenta um valor de 1,96 mm no sentido superior da máquina. Como referido, deve-se analisar o deslocamento da chapa frontal e do caixão, de maneira a garantir que a soma dos dois deslocamentos não ultrapasse o máximo permitido, de 6 mm.

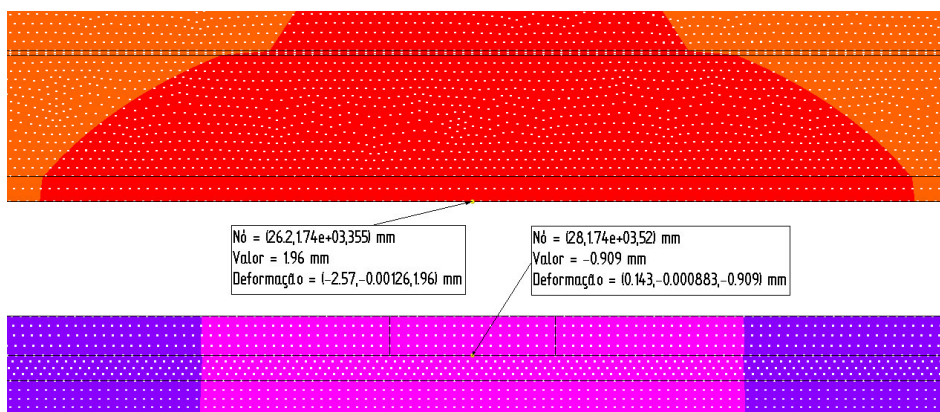


Figura 124 - Detalhe do deslocamento vertical dos nós centrais na chapa frontal e caixão da estrutura do modelo 2.0

Somando os dois valores, obtém-se um deslocamento vertical combinado de **2,87 mm** no corpo da estrutura da guilhotina 2.0.

Na Tabela 26 estão apresentados os valores do estudo de MEF da guilhotina 2.0.

Tabela 26 - Resultados obtidos do estudo por MEF dos modelos da guilhotina 2.0

	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento horizontal [mm]	Deslocamento Vertical [mm]
Corpo do porta-lâminas	207	0,125	0,844
Corpo da estrutura	214	0,314	2,870

De seguida são apresentados os resultados obtidos para os modelos geométricos da guilhotina desenvolvida, versão 3.0.

❖ **Corpo do porta-lâminas do modelo 3.0**

- Tensão de von Mises

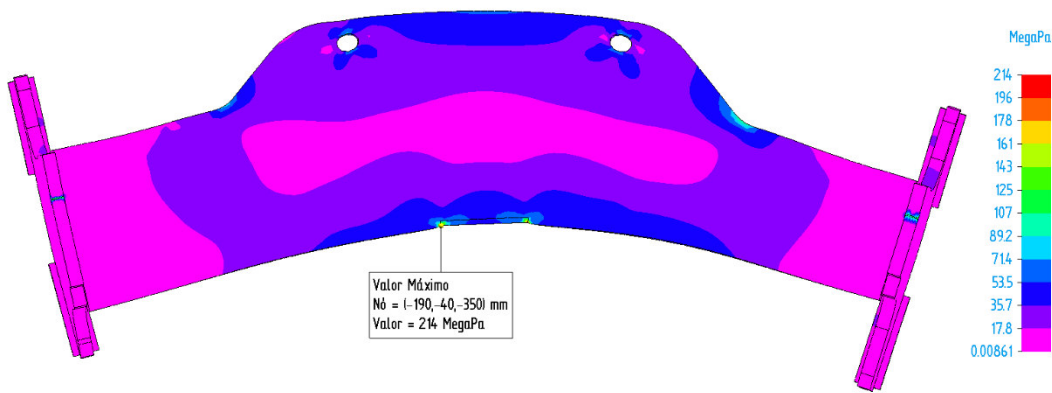


Figura 125 - Representação das tensões de von Mises instaladas no porta-lâminas do modelo 3.0

Na Figura 125 está representada a tensão máxima desenvolvida no corpo do porta-lâminas do modelo 3.0, localizada na área restringida da zona de corte, com um valor máximo de **214 MPa**. É visível que grande parte da estrutura da máquina tem uma tensão instalada inferior a 90 MPa. Seguindo o mesmo método de estudo das reações na área restringida dos guiamentos posteriores, na Tabela 27 estão representados os resultados das reações do modelo 3.0.

Tabela 27 - Resultados das reações dos guiamentos posteriores do modelo 3.0

Guiamentos posteriores do modelo 3.0				
	Superior esquerdo	Inferior esquerdo	Superior direito	Inferior direito
Reação [N]	51696	89036	55126	84952

○ Deslocamento horizontal máximo

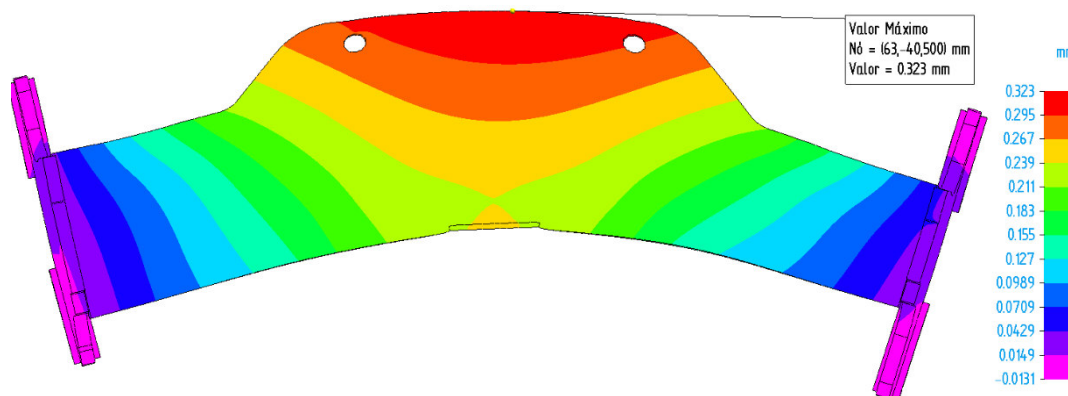


Figura 126 - Representação do deslocamento horizontal no corpo do porta-lâminas do modelo 3.0

Na Figura 126 está representado o deslocamento máximo horizontal do corpo do porta-lâminas, o qual se situa na área superior da chapa frontal e apresenta um valor de 0,323 mm no sentido posterior do corpo.

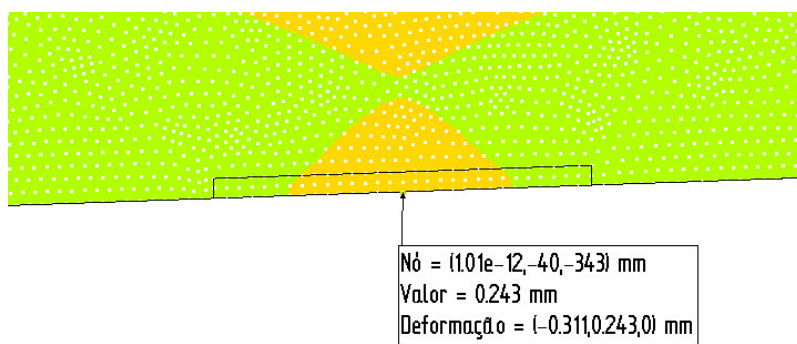


Figura 127 - Representação do valor máximo do nó na zona de corte do porta-lâminas do modelo 3.0

Visto que neste estudo do deslocamento horizontal o importante é a verificação do deslocamento na zona de corte, na Figura 127 está indicado o mesmo na respetiva área. No nó central da área restringida do corte, o deslocamento horizontal apresentado é de **0,243 mm**.

○ Deslocamento vertical máximo

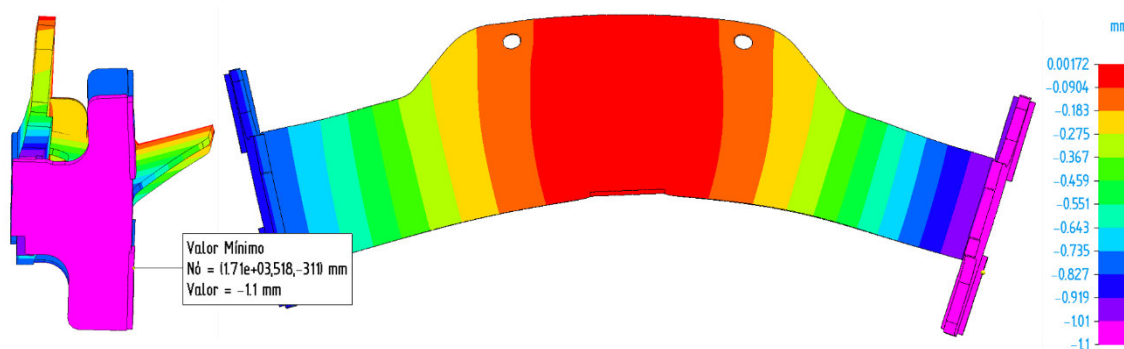


Figura 128 - Representação do deslocamento vertical no corpo do porta-lâminas do modelo 3.0

Na Figura 128 está representado o deslocamento vertical máximo do corpo do porta-lâminas situado no montante direito do corpo, que apresenta um valor de 1,1 mm no sentido interior do corpo.

Como já referenciado na análise do porta-lâminas do modelo 2.0, a face de contato do corpo do modelo 3.0 com os guiaamentos posteriores, possui uma área para contato sobredimensionada o que garante sempre o contato entre os elementos.

❖ Corpo da estrutura do modelo 3.0

- Tensão de von Mises

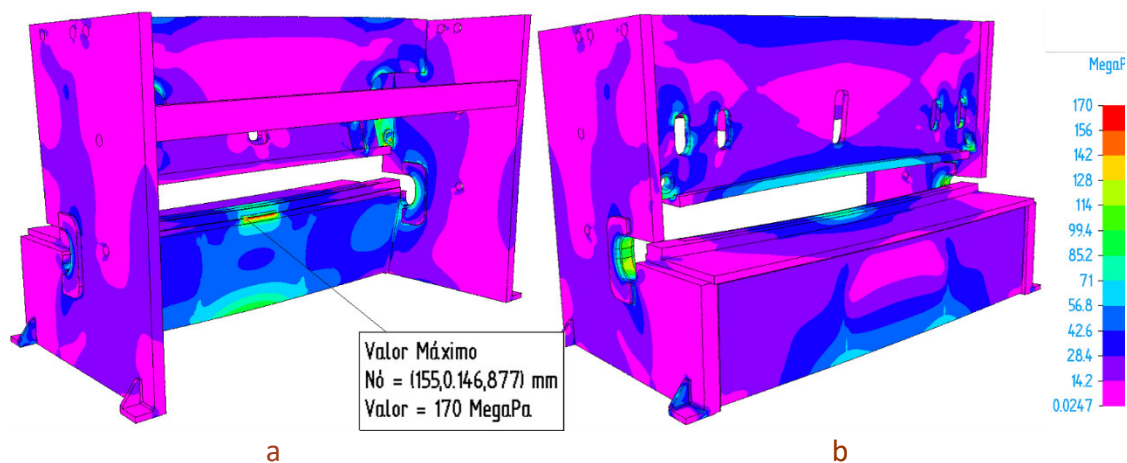


Figura 129 - Representação das tensões de von Mises instaladas na estrutura do modelo 3.0 na vista isométrica posterior (a) e frontal (b)

Na Figura 129 está representada a tensão máxima instalada no corpo da estrutura do modelo 3.0, localizada na zona de corte com um valor máximo de **170 MPa**. É visível também que a zona posterior dos guiaamentos frontais e a cava do montante da estrutura apresentam valores acima dos 115 MPa (Figura 120).

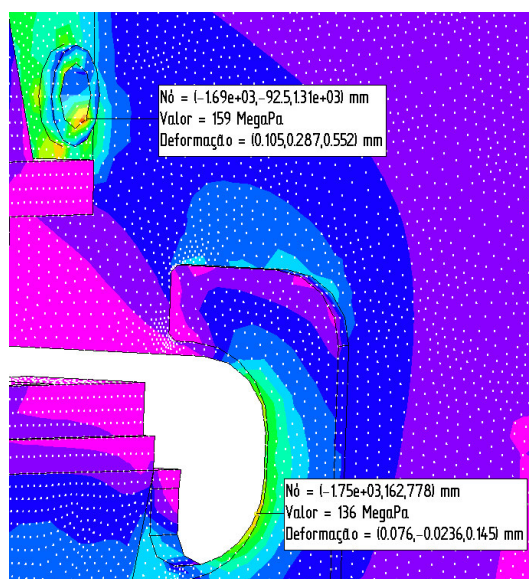


Figura 130 - Concentrações de tensão máximas dos nós da cava e da zona posterior do guiamento frontal

- Deslocamento horizontal máximo

Na Figura 131 está representado o deslocamento máximo horizontal localizado na chapa frontal da estrutura no sentido posterior do corpo com um valor máximo de 3,15 mm.

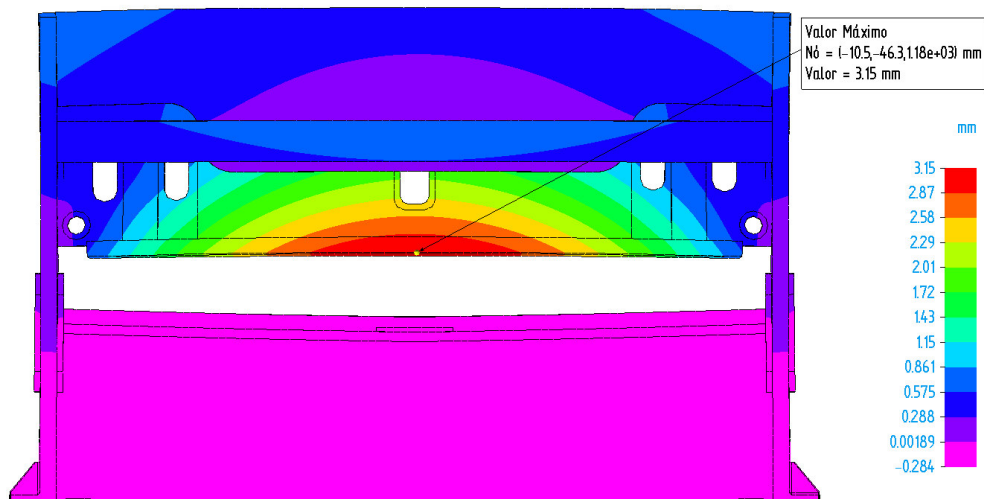


Figura 131 - Representação do deslocamento máximo horizontal na vista posterior da estrutura do modelo 3.0

Contudo, a importância desta análise consiste em verificar o resultado obtido na zona de corte restringida. Na Figura 132 está representado o deslocamento obtido do nó central na área do corte com um valor absoluto **0,139 mm**.

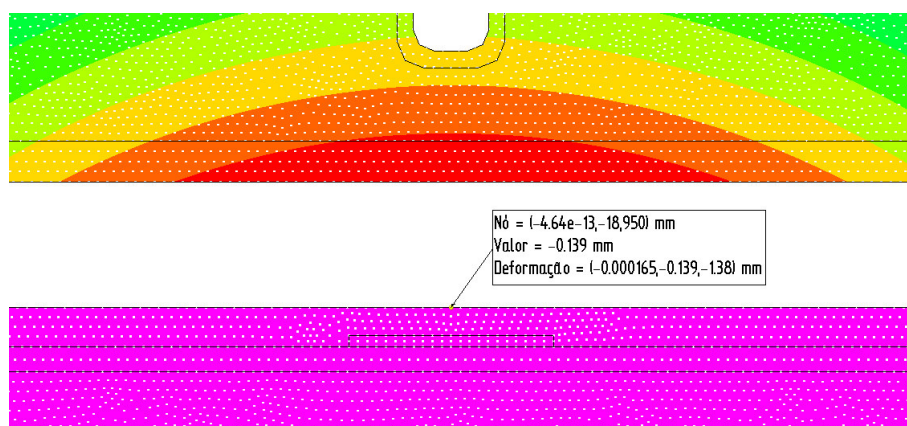


Figura 132 - Representação do valor do deslocamento horizontal do nó central na zona de corte da estrutura do modelo 3.0

Somando os valores obtidos da deformação horizontal do corpo do porta-lâminas, de 0,243 mm, com o da estrutura na zona de corte, tem-se um deslocamento máximo combinado de 0,382 mm, o qual está dentro do limite máximo de 0,6 mm.

- Deslocamento vertical máximo

Na Figura 133 está representado o resultado do deslocamento vertical máximo na estrutura, do modelo 3.0, situado na chapa frontal, com um valor máximo de 1,58 mm no sentido superior da máquina. Como referido, deve-se analisar o deslocamento da

chapa frontal e do caixão, de maneira a garantir que a soma dos dois deslocamentos não ultrapasse o máximo permitido, de 6 mm.

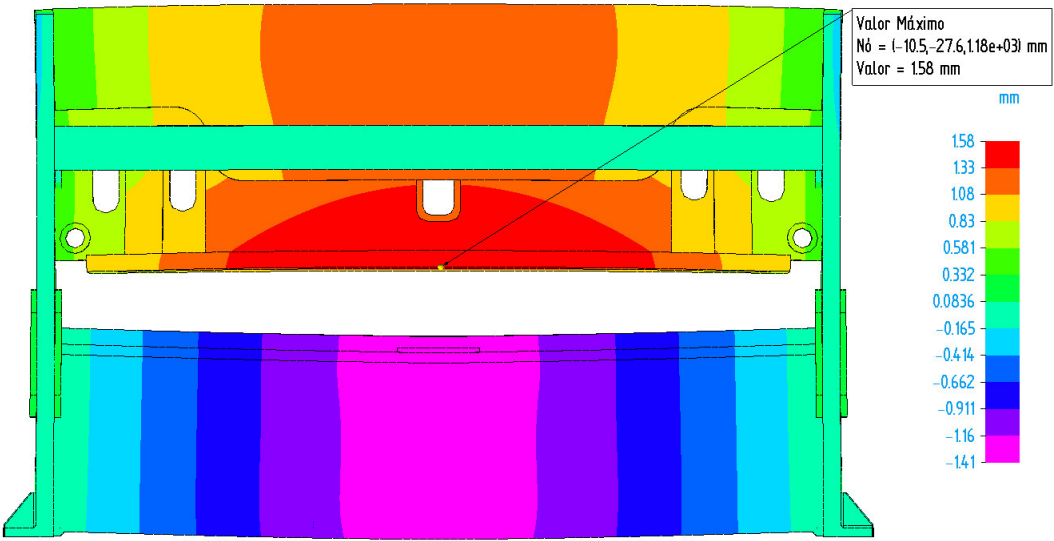


Figura 133 - Representação do deslocamento máximo vertical na vista posterior da estrutura do modelo 3.0

Somando os valores representados na Figura 134, obtém-se um deslocamento vertical combinado de **2,95 mm** no corpo da estrutura da guilhotina 3.0.

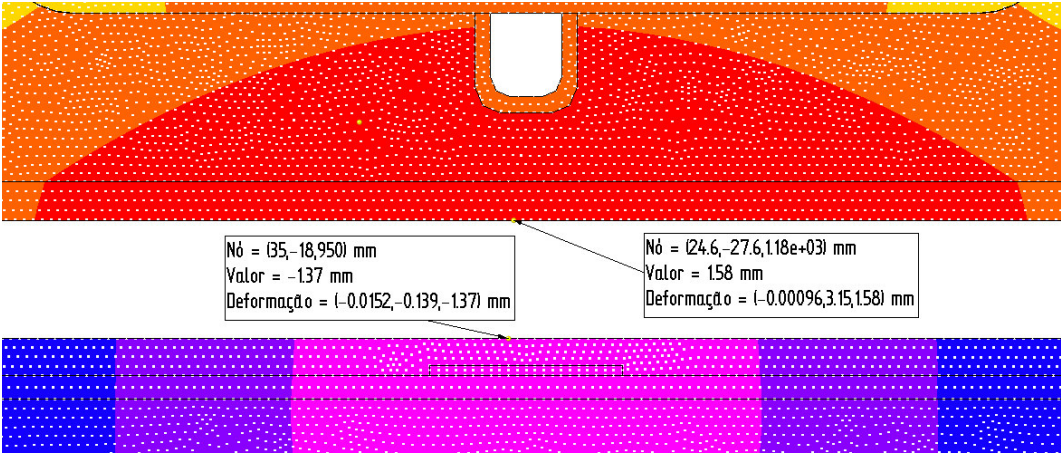


Figura 134 - Detalhe do deslocamento vertical dos nós centrais na chapa frontal e caixão da estrutura do modelo 3.0

Na Tabela 26 estão apresentados os valores do estudo de MEF da guilhotina 3.0.

Tabela 28 - Resultados obtidos do estudo por MEF dos modelos da guilhotina 3.0

	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento horizontal [mm]	Deslocamento Vertical [mm]
Corpo do porta-lâminas	214	0,243	1,10
Corpo da estrutura	170	0,139	2,95

3.7.5.2 Atuadores principais hidráulicos

Sabendo que se selecionou a opção de 4 cilindros hidráulicos para a máquina desenvolvida, é possível aplicar o objetivo inicial de diminuição do ângulo máximo. Nesse sentido, decidiu-se diminuir o ângulo máximo para 3°, dos 3,5° aplicados no modelo 2.0. Após um breve estudo de todas as gamas possíveis para este modelo máquina, desde máquinas de 3 m a 6 m, de corte até chapa de 25 mm de espessura, e uniformização das dimensões de cilindros, concluiu-se que o curso máximo nesta máquina seria de 195 mm.

Para o fabrico dos cilindros hidráulicos do modelo desenvolvido consultou-se o fabricante de matéria prima para cilindros, PROTUBSA [73]. Consultando o catálogo técnico dos tubos e barras de aço para fabrico de cilindros hidráulicos, o fabricante indica que:

- Material para o pistão e haste em barra cromada C45E (norma EN) equivalente a Ck45 (norma DIN);
- Material para o corpo do cilindro em tubo retificado sem soldadura EN 10305-1 de aço E355 (norma EN) equivalente a St 52 DIN 2391 (norma DIN).

As propriedades mecânicas dos materiais para o respetivo dimensionamento do cilindro apresentam-se na Tabela 29.

Tabela 29 - Propriedades mecânicas para fabrico dos cilindros hidráulicos segundo o fabricante PROTUBSA (adaptado de [73])

Propriedade mecânica	C45E	E355+SR	S355
Tensão de cedência [MPa]	275	420	335
Tensão de rotura [MPa]	560	580	470

O fabricante reforça que o coeficiente de segurança (CS) mínimo a utilizar para dimensionamento da camisa dos cilindros deverá estar compreendido entre 1,5 e 2, e que o diâmetro exterior do corpo deverá ser multiplicado por 1,1 para garantir sua tolerância [73].

Para o cálculo do diâmetro mínimo interno do corpo do cilindro, foram utilizados os valores de força de corte máxima (F_c), de 1148684 N, calculada no capítulo 3.7.5.1, e a pressão de serviço do sistema (P), de 25 MPa.

Como são utilizadas duas unidades de cilindro em cada montante da máquina, o diâmetro interno mínimo do cilindro ($\varnothing_{\min}$) é calculado igualando a força de corte (F_c) à força que os cilindros têm de exercer.

$$F_c = 2 \times F_{\text{cil}} \Leftrightarrow F_{\text{cil}} = F_c/2 \Leftrightarrow \varnothing_{\min} = \sqrt{\frac{4 \times F_c}{2 \times \pi \times P}}$$

$$\phi_{\min} = \sqrt{\frac{4 \times 1148684}{2 \times \pi \times 25}} = 171 \text{ mm}$$

Uma vez que um dos principais objetivos deste estudo diz respeito à uniformização dos cilindros hidráulicos entre as várias gamas deste modelo, elaborou-se uma folha de cálculo com todos os dados respetivos por gama para obtenção de um diâmetro uniforme às diferentes gamas. Isto é, através um processo iterativo que relaciona as forças de corte máximas para todas as espessuras, a relação de áreas entre os cilindros das diferentes gamas, fatores de compensação para atritos mecânicos dos guiamentos, entre outros fatores, obteve-se um diâmetro mínimo interno de **190 mm**.

Devido a ser um caso de estudo de corte puro, a verificação da resistência dos elementos do cilindro à encurvadura é desprezável.

O valor mínimo para o diâmetro da haste é verificado através do cálculo do esforço axial. Geralmente o coeficiente de segurança (CS) toma valores entre 2 e 4. Neste caso, considera-se 2,5, uma vez que o cilindro é fixo à estrutura por ligação aparafusada.

Assumindo o valor de tensão de cedência da matéria prima C45 (Tabela 29) de 275 MPa, calcula-se a tensão admissível (σ_{adm}).

$$\sigma_{\text{adm}} \geq \frac{\sigma_{\text{ced}}}{\text{CS}} \Leftrightarrow \sigma_{\text{adm}} \geq \frac{275}{2,5} = 110 \text{ MPa}$$

Sabe-se que a força de corte máxima é de 1148684 N. Como esta está aplicada em 2 cilindros, a força máxima ($F_{\text{máx}}$) aplicada em cada haste é de 574342 N.

A área mínima ($A_{\min}$) das hastes dos cilindros são,

$$\sigma_{\text{adm}} \geq \frac{F_{\text{máx}}}{A_{\min}} \Leftrightarrow A_{\min} \geq \frac{574342}{110} = 5221,3 \text{ mm}^2.$$

O diâmetro mínimo da haste deverá ser,

$$A_{\min} = \frac{\pi \cdot \phi_{\min, \text{haste}}^2}{4} \Leftrightarrow \phi_{\min, \text{haste}} = \sqrt{\frac{4 \times 5221,3}{\pi}} \geq 81,53 \text{ mm}$$

Assumindo o valor mínimo da haste de 82 mm e com recurso, novamente, à folha de cálculo elaborada, concluiu-se que o diâmetro da haste seria de **100 mm**. Deste modo, e garantindo a uniformização de componentes, a haste selecionada será aplicada em todos os cilindros hidráulicos da máquina desenvolvida.

Deste modo pode-se afirmar que, sabendo o valor do esforço de corte máximo do sistema e a carga máxima aplicada pelas duas unidades de cilindros em cada montante, tem-se um fator de segurança de cerca de 20% da força necessária para corte de chapa de 20 mm. Assumindo o diâmetro proposto, 190 mm, para o corpo do cilindro,

$$F_{\text{cil}} = P \times A_{\text{cil}} = P \times \left(\frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \right)$$

$$F_{cil} = 25 \times 28353 = 708822 \text{ N} \rightarrow F_{cil.TOTAL} = 2 \cdot F_{cil} = \mathbf{1417644 \text{ N}}.$$

$$CS = F_{cil}/F_c = 1417644/1148684 = 1,23 \checkmark.$$

O coeficiente de segurança associado ao diâmetro da haste é feito através do cálculo do esforço máximo. Assumindo o diâmetro proposto, de 100 mm, para a haste,

$$CS = \frac{A_{haste} \cdot \sigma_{ced}}{F_c/2} = \frac{\pi \times 50^2 \times 275}{1148684/2} = 3,76 \checkmark.$$

Por ser um sistema hidráulico em série, a secção da câmara inferior do cilindro esquerdo ($A_{cam.inf.esq}$) tem de ser praticamente igual ao da câmara superior do cilindro no montante direito ($A_{cam.sup.dir}$), com um erro máximo de 5%. Deste modo, garante-se que os cilindros aplicados na máquina funcionam como um só durante todo o processo de corte e que as pressões internas nas câmaras de ambos os cilindros são iguais.

Desta forma, para cálculo do diâmetro interno do cilindro direito ($\emptyset_{cil.dir}$):

$$\begin{aligned} A_{cam.inf.esq} &\leq A_{cam.sup.dir} \\ \pi \times \left[\left(\frac{190}{2} \right)^2 - \left(\frac{100}{2} \right)^2 \right] &\cong \pi \times \left(\frac{\emptyset_{cil.dir}}{2} \right)^2 \\ 161,6 \text{ mm} &\cong \emptyset_{cil.dir} \end{aligned}$$

Consultando o catálogo, optou-se pela utilização de veios cromados de **$\emptyset 160 \text{ mm}$** para o pistão e, consequentemente, igual diâmetro do cilindro interno, cumprindo com o erro máximo estipulado de 5%.

Para cálculo da espessura da camisa dos cilindros hidráulicos deve-se seguir o procedimento segundo a norma DIN 2413, caso I [74]. Como podem ocorrer picos de pressão dentro da câmara dos cilindros assumiu-se o pior caso que a bomba pode exercer, ou seja, 300 bar.

Para o cálculo da espessura mínima da camisa (s) do corpo do cilindro esquerdo, deve-se assumir o fator de segurança indicado de 1,1, aplicado à espessura mínima teórica (s_0).

$$s = 1,1 \times s_0 = 1,1 \times \frac{\emptyset_{int}}{2 \times \frac{\sigma_{ced}}{CS} - 2} = 1,1 \times \frac{190}{2 \times \frac{420}{1,11 \times 30} - 2} = 19,7 \text{ mm}$$

O diâmetro mínimo externo do corpo do cilindro ($\emptyset_{ext}$) deverá ser,

$$\emptyset_{ext} \geq \emptyset_{int} + 2 \times s = 229,4 \text{ mm}$$

Consultando o catálogo, verifica-se que o diâmetro exterior normalizado acima é 230 mm. Mesmo assim, como se optou por ligação aparafusada das tampas dos cilindros, e de maneira a garantir espessura suficiente para o efeito, selecionou-se o tubo para um diâmetro externo de **244,5 mm**.

Assumindo que o cilindro do montante direito prende por algum motivo externo de funcionamento, tem lugar a multiplicação de pressão devido à diferença de áreas dos pistões sujeitos à pressão máxima do sistema. Sabe-se que a pressão nominal é de 250 bar no cilindro esquerdo, o que gera uma força de 708822 N em cada unidade. Então o cálculo da pressão interna máxima ($P_{\text{máx}}$) gerada no cilindro de Ø160 mm,

$$P_{\text{máx}} = F_{\text{cil}} / A_{\text{cil.dir}} = 708822 / \pi \times 80^2 = 35,3 \text{ MPa} = 353 \text{ bar.}$$

O mesmo procedimento de dimensionamento da espessura mínima das camisas dos corpos, se aplica aos cilindros no montante direito.

$$s = 1,1 \times s_0 = 1,1 \times \frac{160}{2 \times \frac{420}{2}} \sqrt{\frac{1,11 \times 36}{1,11 \times 36} - 2} = 20,7 \text{ mm}$$

Pelo mesmo motivo apontado no dimensionamento dos cilindros esquerdos, garantir uma espessura coerente para fixação das tampas por parafusos, optou-se pelo diâmetro externo de **219,1 mm**.

Na Figura 135 podem-se observar as opções de diâmetros normalizados para tubos retificados que o fabricante PROTUBSA [73] disponibiliza.

Ø Int.	Tol. H8 mm.	Ø Ext. mm.	Esp. mm.	Norma	Kg/Mt.
160	- 0 / + 0,063	170**	5,0	① ②	20,35
		175	7,5	① ②	30,98
		180	10,0	① ②	41,92
		185	12,5	① ②	53,18
		190	15,0	① ②	64,74
		195	17,5	①	76,60
		200	20,0	①	88,78
		203	21,5	•	96,24
		219,1	29,6	•	138,13
190	- 0 / + 0,072	210	10,0	① ②	49,32
		215	12,5	① ②	62,42
		220	15,0	① ②	75,83
		225	17,5	①	89,55
		230	20,0	①	103,58
		244,5	27,3	•	146,00

Figura 135 - Tabela de tubos sem soldadura normalizados com retificação interior de tolerância H8 para os diâmetros de 160 e 190 mm [73]

Para o fabrico das tampas, superior e inferior, é utilizado o material S355, indicado na Figura 55 segundo norma EN 10025-2 para chapas entre 40 e 80 mm de espessura.

Segundo o procedimento de cálculo de Panzer e Beitler [75], o dimensionamento da espessura (h) da tampa superior é dado pela seguinte equação.

$$h = 0,9 \times \frac{\varnothing_{\text{ext}} + \varnothing_{\text{int}}}{4} \times \sqrt{\frac{P}{0,1 \times \sigma_{\text{rot}}}} = 0,9 \times \frac{244,5 + 190}{4} \times \sqrt{\frac{25}{0,1 \times 470}} = 71,3 \text{ mm}$$

Para dimensionamento da espessura (L_f) da tampa inferior, que proporciona o guiamento da haste, tem-se,

$$L_f = 0,8 \times \varnothing_{\text{haste}} = 0,8 \times 100 = 80 \text{ mm}$$

Optou-se pela fixação das tampas dos cilindros por ligação aparafusada, porque desta forma se evitam empenos de soldadura, e abre-se a possibilidade de optar futuramente por ligação soldada de uma das tampas sem necessitar de fazer novo dimensionamento, a não ser à espessura do cordão.

A classe do parafuso selecionado é 12.9 do tipo de cabeça cilíndrica com oco hexagonal, segundo a norma ISO 4762. Na Tabela 30 estão indicadas as propriedades mecânicas destes parafusos.

Tabela 30 - Propriedades mecânicas dos parafusos ISO 4762 de classe 12.9

Propriedade mecânica	Valor
Classe de resistência	12.9
Tensão de rotura [MPa]	1200
Tensão de cedência [MPa]	1080

Geralmente o coeficiente de segurança à fadiga para peças roscadas toma valores entre 1,5 e 2,5, e no presente trabalho considera-se o valor máximo de 2,5. Com recurso às equações indicadas na Tabela 31 calculou-se a área de secção mínima resistente ($A_{s,\text{parf.}}$) do parafuso às pressões aplicadas nos cilindros de $\varnothing 190$ e $\varnothing 160$ mm.

Tabela 31 - Equações para cálculo da área mínima de secção do parafuso

$$\sigma_{\text{adm.p}} \leq \frac{\sigma_{\text{ced}}}{CS} \quad F_{\text{paraf}} = \frac{F_{\text{cil}}}{n_p} \quad A_{s,\text{parf.}} = \frac{F_{\text{paraf}}}{\sigma_{\text{adm.p}}}$$

As iterações de dimensionamento dos parafusos, realizadas através de uma folha de cálculo, permitiram definir o diâmetro necessário dos mesmos para garantir a resistência às pressões internas dos cilindros, conforme se indica na Tabela 32.

Tabela 32 - Valores obtidos das iterações para dimensionamentos dos parafusos à tração dos atuadores hidráulicos

Cilindros hidráulicos		
Diâmetro cilindro	Ø190 mm	Ø160 mm
Pressão interna	250 bar	360 bar
Número parafusos (n_p)	12	17
Força no parafuso (F_{paraf})	59 068 N	42 578 N
Secção mínima ($A_{s,parf.}$)	137 mm ²	99 mm ²
Tamanho parafuso	M16	M14

Concluído o dimensionamento estrutural dos cilindros, na Tabela 33 apresentam-se os valores obtidos para os respetivos elementos.

Tabela 33 - Medidas dimensionadas dos cilindros hidráulicos desenvolvidos

	Cilindro esquerdo	Cilindro direito
Diâmetro do pistão	Ø190 mm	Ø160 mm
Diâmetro da haste	Ø100 mm	Ø100 mm
Diâmetro exterior do corpo	Ø244,5 mm	Ø219,1 mm
Espessura do corpo do cilindro	27,3 mm	26,55 mm
Espessura da tampa superior	72 mm	
Espessura da tampa inferior	87 mm	
Parafusos de fixação (superior)	M16	
Quantidade	12	
Parafusos de fixação (inferior)	M14	
Quantidade	17	

3.7.5.3 Circuito hidráulico principal

Pretende-se, com a máquina desenvolvida, não diminuir a cadência de corte do modelo de versão 2.0. Consultando a Figura 63, verifica-se que a cadência da máquina GV2030 da versão 2.0 tem um mínimo de 9 cortes/min e máximo de 21 cortes/min. Isto significa que, no pior caso, de corte de uma chapa de 20 mm de espessura a todo o comprimento, a máquina tem uma cadência de 9 cortes/min.

Então, para um corte, a máquina atual demora $t_1=6,67$ segundos.

$$\frac{9}{60} = \frac{1}{t_1} \Leftrightarrow t_1 = 6,67 \text{ seg.}$$

Seguiu-se o mesmo procedimento, por recurso a uma regra de três simples, para o cálculo da velocidade de avanço (v_{av}) e um curso efetivo de trabalho (L_c). Na Tabela 34 estão indicadas as variáveis para dimensionamento do caudal necessário para o novo modelo de máquina, versão 3.0.

Tabela 34 - Variáveis para cálculo do caudal mínimo para avanço dos cilindros hidráulicos

		V3.0
$A_{cil.}$	Área dos cilindros [mm ²]	56 706
L_c	Curso útil dos cilindros [mm]	195
v_{av}	Velocidade de avanço [mm/s]	29,24

O cálculo do caudal mínimo necessário é efetuado pela equação (8).

$$Q_a = v_{av} \times A_a \quad (7)$$

$$Q_{a(2040 \text{ 3.0})} = 29,24 \times 10^{-2} \times 60 \times 56706 \times 10^{-4} = 99,5 \text{ dm}^3/\text{min} = 99,5 \text{ l/min}$$

Dada a uniformização dos elementos hidráulicos entre gamas de máquina, no modelo desenvolvido a bomba e os cilindros hidráulicos da GV2030 versão 3.0, poderão ser aplicados na gama GV2040. Na Figura 78 pode-se observar um batente mecânico, de 80 mm de altura, que limita o curso dos cilindros nesta gama da máquina, razão pela qual o caudal é calculado para um curso de 195 mm. Na gama GV2040, os cilindros fazem o curso total atingindo os 275 mm, mas a cadência diminui para 7 cortes/min. Refazendo os cálculos da velocidade e do caudal mínimos obtêm-se os valores indicados na Tabela 35.

Tabela 35 - Valores da velocidade e caudal mínimo para uma GV2040 versão 3.0

		GV2040 V3.0
L_c	Curso útil dos cilindros [mm]	275
v_{av}	Velocidade de avanço [mm/s]	36,67
$Q_{a(2040 \text{ 3.0})}$	Caudal mínimo (GV2040) [l/min]	124,77

Mediante os valores encontrados para esta gama, GV2030, e para a gama GV2040, verifica-se que o mínimo caudal que a bomba tem de debitar é de **124,77 l/min**.

Consultando os documentos técnicos do fornecedor da Adira dos motores de corrente alternada, verifica-se que em média o rendimento global é de **93%**. Como inicialmente foi proposta a aplicação de uma bomba de palhetas, consultando o fornecedor PARKER [76] para bombas industriais até 320 bar, verifica-se que este tipo de bombas tem um rendimento volumétrico de **94%**.

OPERATING CHARACTERISTICS - TYPICAL [24 cSt]

Pressure port	Series	Vi Volumetric displacement	Flow q_v [l/min] & n = 1500 RPM		
			p = 0 bar	p = 140 bar	p = 300 bar
T7D T7DS	B14	44,0 ml/rev	66,0	59,4	51,9
	B17	55,0 ml/rev	82,5	75,9	68,4
	B20	66,0 ml/rev	99,0	92,4	84,9
	B22	70,3 ml/rev	105,5	98,8	91,3
	B24	81,1 ml/rev	121,7	115,0	107,5
	B28	90,0 ml/rev	135,0	128,4	120,9
	B31	99,2 ml/rev	148,8	142,2	134,7
	B35	113,4 ml/rev	170,1	163,5	156,9 ¹⁾
	B38	120,6 ml/rev	180,9	174,3	167,7 ¹⁾
	B42	137,5 ml/rev	206,3	199,6	194,0 ²⁾
	B45	145,7 ml/rev	218,6	209,2	202,6 ³⁾
	B50	158,0 ml/rev	237,0	227,7	223,0 ⁴⁾

Figura 136 - Características da bomba de palhetas Parker [76] e respetiva indicação da gama seleccionada

Pela comparação dos resultados obtidos com os valores fornecidos das bombas de palhetas da Parker, representados na Figura 136, seleccionou-se a bomba **T7D B31**, destacada a verde. Pode-se verificar que o caudal a 300 bar está logo acima do valor calculado.

O cálculo da potência do motor elétrico (P_{acc}) que faz o acionamento da bomba hidráulica é realizado pela equação seguinte:

$$P_{acc} = \frac{P \times Q_{bomba}}{600 \times \eta_{global}} \quad (8)$$

O cálculo do rendimento global (η_g) é obtido de acordo com a equação (10),

$$\eta_g = \eta_{motor} \times \eta_{bomba} \quad (9)$$

Segundo equações (9) e (10),

$$\eta_g = 0,93 \times 0,94 = 0,87 = \mathbf{87\%}.$$

Considerando a pressão do sistema (P) de 25 MPa e regulando a velocidade de rotação do motor no variador de frequência para o caudal calculado de 99,5 l/min, a potência do motor é de,

$$P_{acc} = \frac{25 \times 10^6 \times 99,5}{600 \times 87} = 47,4 \text{ kW}.$$

Dada a experiência da empresa na utilização de este tipo de motores, ou seja, motores de corrente alternada trifásicos, sabe-se que estes podem ser sujeitos a picos de sobrecarga sem comprometer o seu desempenho. Em sobrecarga, a potência pode exceder em aproximadamente 50% a potência nominal durante poucos segundos. De maneira a evitar que o sistema da máquina esteja constantemente sobredimensionado, seleccionou-se o motor trifásico de **37 kW**.

Para cálculo do volume mínimo do depósito, segundo o método interno da Adira, devem ser considerados dois critérios, optando pelo de maior valor.

Um dos critérios é um método Adira de simples aplicação para dimensionamento do volume de óleo necessário para o sistema. Este método, com cerca de 20 anos de aplicação, diz que o volume de óleo deverá rondar cerca de 4 vezes o caudal necessário do circuito hidráulico. Este critério considera que 20% do volume total interno do depósito seja de ar para arrefecimento do óleo, acessórios hidráulicos, perdas de carga devido às curvas das tubagens, entre outros fatores.

O segundo critério consiste em verificar a quantidade mínima de óleo que o sistema necessita para o correto funcionamento da guilhotina. Para este efeito foi realizado um estudo do volume necessário para encher totalmente o circuito hidráulico da máquina, desde o volume dos cilindros até ao volume das mangueiras hidráulicas.

Na Tabela 36 estão mencionados os volumes totais contabilizados, com recurso a uma folha de cálculo, para todos os elementos do circuito hidráulico da guilhotina GV2030 v3.0.

Tabela 36 - Quantidade mínima de volume de óleo para alimentar todo o circuito hidráulico da GV2030 v3.0

Elementos hidráulicos	Volume [litros]
Cilindros Ø190	15,60
Cilindros Ø160	11,06
Calcadores	2,27
Cilindros do SAT	6,00
Tubagem hidráulica	
Ø38x5	10,24
Ø30x3	
Ø28x2	
Ø25x3	
Ø12x1,5	
Ø10x1,5	
Mangueiras hidráulicas	
38S	4,90
35L	
28L	
25S	
22L	
18L	
12S/L	
10L	
6L	
TOTAL	50,07

Segundo o primeiro critério mencionado da Adira,

$$4 \times 99,5 = 398 \text{ litros.}$$

O segundo critério, como indicado na Tabela 36, indica um volume mínimo de 50 litros.

No entanto, deve ser referido que o método segundo Adira, não considera a aplicação de um permutador de calor. Como na GV2030 v3.0 se considera este equipamento, é utilizado um fator multiplicativo de apenas 3, porque este novo modelo irá ser sempre comercializado com um permutador de calor. Desta forma, o volume de óleo recomendado para esta gama, GV2030, por este critério é de **300 litros**. De referir que, para aplicar o mesmo depósito em máquinas de 4 m, devem ser refeitos os cálculos.

3.7.6 Estado *Lean Dfx* final

Neste capítulo são apresentadas as tabelas de desempenho relativas à guilhotina GV2030 v3.0, mediante os valores das variáveis apresentadas na Tabela 20, e respetiva interpretação. Dado que esta ferramenta é mais vocacionada para a análise de desenvolvimento de novos produtos, o campo da eficácia quando reprova, indica a que distância se fica de atingir o objetivo pretendido. A eficiência para esses casos concreto não é calculada, visto não fazer sentido calcular a eficiência de um caso não eficaz.

3.7.6.1 *Design for Cost*

Na Figura 137 está ilustrada a tabela de desempenho referente à análise *Lean* no domínio *Design for Cost*.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto					
Módulos Produto →		CORPO ESTRUTURA		PORTA-LÂMINAS		CILINDROS HIDRAU.	
↓ Variáveis Design							
Design for Cost		Eficácia		Eficiência			
		0%		100%		100%	
		-		88%		67%	
						efc 67%	
						eff 77%	
EFICÁCIA	efc	Custo externo [€]		98%		100%	
	Referência Melhor comparativo		33 608	Obj	10651	Obj	8 694
	Valor atual da análise		34 187	<	9229	<	7 230
	efc	Custo interno [€]		51%		100%	
	Referência Melhor comparativo		3 434	Obj	1165	Obj	24
	Valor atual da análise		6 720	<	1037	<	12
EFICIÊNCIA	eff	Custo externo [€]		-		87%	
	eff	Custo interno [€]		-		89%	

Figura 137 - Tabela de desempenho referente ao domínio *Lean Design for Cost*

Verifica-se que a análise de custo do corpo da estrutura reprova por completo na eficácia, não atingindo as metas impostas. Contudo, analisando os resultados da eficácia, consegue-se perceber a que distância se fica de atingir o objetivo. No custo

externo, com eficácia de 98%, mostra-se que os custos de conjunto soldado dos dois modelos, 2.0 e 3.0, estão muito próximos, ao contrário do custo de fabrico interno, de 51%, resultante da opção de aplicação de um caixão postigo, o que aumentou o custo interno para o dobro.

O porta-lâminas passa com um sucesso de 100% de eficácia, pelo que se pode afirmar que o objetivo inicial foi cumprido tanto ao nível dos custos de fabrico externo, corte e processo de soldadura, como de fabrico interno de maquinaria. A média da eficácia, de 88%, traduz em números a complexidade geométrica do corpo, tanto na soldadura como na maquinaria. De facto, ao comparar a quantidade de peças e de comprimento de soldadura dos dois modelos, 2.0 e 3.0, obtêm-se valores idênticos.

Nos cilindros hidráulicos o objetivo inicial imposto foi cumprido, apesar do aumento da quantidade de cilindros por máquina, o que resultou em 100% de indicativo de eficácia. Em relação à média do custo externo de 83% de eficiência pode-se dizer que o processo de fabrico dos cilindros da guilhotina 2.0 está mal dimensionado, dado ter sido possível duplicar a quantidade de cilindros com um custo abaixo do atual. A média do custo interno de 50% decorre da diferença no método de montagem dos cilindros já que, enquanto no modelo 2.0 era necessário colocar as amarras nos cilindros e só depois fixá-los à estrutura, os cilindros desenvolvidos para a guilhotina 3.0 são fixos pela tampa superior. Relativamente à análise do domínio de custo, a eficácia, com uma média de 67%, foi comprometida apenas pelo desenvolvimento da nova estrutura.

3.7.6.2 Design for Manufacturing

Na Figura 138 está ilustrada a tabela de desempenho referente à análise *Lean* no domínio *Design for Manufacturing*.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto			
Módulos (maquinação) → ↓ Variáveis Design		CORPO ESTRUTURA		PORTA-LÂMINAS	
Design for Manufacturing	Eficácia	0%		100%	efc 50%
	Eficiência	-		88%	eff 88%
EFICÁCIA	efc Tempo maquinação [min]	51%		100%	50%
	Referência Melhor comparativo	6720,0	Obj	2280,0	Obj
	Valor atual da análise	13150,0	<	2030,0	<
	efc Peso (soldadura) [kg]	95%		100%	50%
EFICÁCIA	Referência Melhor comparativo	10150,0	Obj	2880,0	Obj
	Valor atual da análise	10660,0	<	2520,0	<
EFICIÊNCIA	eff Tempo maquinação [min]	-		89%	89%
	eff Peso (soldadura) [kg]	-		88%	88%

Figura 138 - Tabela de desempenho referente ao domínio *Lean Design for Manufacturing*

O corpo estrutural volta a reprovar no estudo do domínio de fabrico. Como referenciado no capítulo 3.7.6.1, o custo interno da estrutura é comprometido pela aplicação do caixão postigo, o qual obriga à maquinação de dois corpos separados, o corpo da estrutura e o caixão. Já o peso da estrutura, com um valor de eficácia de 95%, traduz que os pesos estão equivalentes entre o modelo anterior e o desenvolvido.

O desenvolvimento do porta-lâminas da guilhotina 3.0 é aprovado a 100% tanto ao nível do tempo de maquinação como do peso. A eficiência, com média de 88%, traduz o sobredimensionamento do porta-lâminas do modelo 2.0, visto que, no modelo 3.0, se aumentou o esforço de corte e mesmo assim conseguiu-se baixar o peso.

A análise do domínio do fabrico é comprometida de novo pelo corpo estrutural, com uma média de eficácia de 50%, mas uma eficiência de 88%, assegurada pelo desenvolvimento do porta-lâminas, para as variáveis bem sucedidas.

3.7.6.3 Design for Optimization

Na Figura 139 está ilustrada a tabela de desempenho referente à análise *Lean* no domínio *Design for Optimization*.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto					
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		SAT		REGULAÇÃO DA FOLGA		CIRCUITO HIDRÁULICO	
Design for Optimization	Eficácia	100%		100%		100%	efc 100%
	Eficiência	88%		57%		74%	eff 73%
EFICÁCIA	efc Peças normalizadas [un]	100%		100%		100%	100%
	Referência Melhor comparativo	444,0	Obj	138,0	Obj	343,0	Obj
	Valor atual da análise	438,0	<	82,0	<	279,0	<
	efc Peças fabrico [un]	100%		100%		100%	100%
	Referência Melhor comparativo	148,0	Obj	37,0	Obj	56,0	Obj
	Valor atual da análise	126,0	<	18,0	<	31,0	<
EFICIÊNCIA	efc Custo de compra [€]	100%		100%		100%	100%
	Referência Melhor comparativo	9140,0	Obj	4095,0	Obj	11365,0	Obj
	Valor atual da análise	7305,0	<	2547,0	<	9865,0	<
	eff Peças normalizadas [un]	99%		59%		81%	80%
	eff Peças fabrico [un]	85%		49%		55%	63%
	eff Custo de compra [€]	80%		62%		87%	76%

Figura 139 - Tabela de desempenho referente ao domínio *Lean Design for Optimization*

Na Figura 139 pode-se observar que, comparativamente à guilhotina 2.0, os conjuntos de anti-torção, regulação da folga e do circuito hidráulico foram desenvolvidos com grande sucesso, conforme se comprova através da eficácia de 100% para todos as variáveis impostas.

Os resultados da eficiência para os conjuntos do SAT e do circuito hidráulico, de 88% e 74%, respetivamente, advêm da simplificação dos acessórios hidráulicos, visto que a maioria dos restantes componentes se manteve. Na altura em que surgiu o desenvolvimento da guilhotina 2.0, não existia tanta diversidade de componentes como agora. Por exemplo, para uma ligação de tubo de Ø20 de alta pressão, antigamente, a rosca para selecionar era apenas 3/4 gás, pelo que era necessário um acessório redutor para aperto em outros tamanhos de rosca, enquanto hoje em dia se pode optar por várias (Figura 140), o que simplifica a quantidade de acessórios.

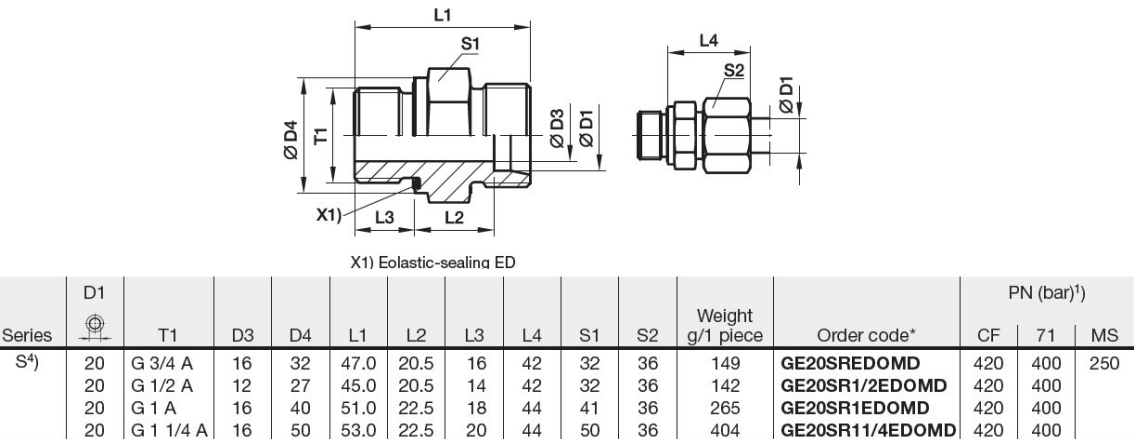


Figura 140 - Tabela de acessórios hidráulicos PARKER de acessórios macho GE para tubo de 20mm de alta pressão [77]

A eficiência de 57% no conjunto da regulação da folga mostra que, para além da eliminação de transmissão mecânica entre os montantes da estrutura, também se diminuiu a quantidade de engrenagens por máquina, principalmente com a eliminação do sector dentado de desenho Adira. Pode-se afirmar que, quando o objetivo consiste em minimizar os valores de referência, aplica-se na prática uma meta modesta que decorre da comparação com um modelo menos eficiente. Nestes casos, o resultado obtido não é penalizador, e significa que a nova solução excedeu os valores iniciais impostos.

Analisando a eficiência deste domínio, com um resultado de 73%, é visível que os conjuntos selecionados da guilhotina do modelo 2.0 possuem peças de fabrico que, hoje em dia, são facilmente substituíveis por peças normalizadas. Mesmo assim, conseguiu-se minimizar a quantidade de peças normalizadas com as melhorias aplicadas na guilhotina desenvolvida. Comparando a análise de todos os módulos entre as variáveis de quantidade de peças de fabrico com o custo unitário dos conjuntos, consegue-se perceber que a diferença do custo aumenta quando se diminui consideravelmente a quantidade das peças de fabrico.

3.7.6.4 Design for Assembly

Na Figura 141 está ilustrada a tabela de desempenho referente à análise *Lean* no domínio *Design for Assembly*.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto					
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		SAT		REGULAÇÃO DA FOLGA		AMARRAÇÃO CILINDROS	
Design for Assembly	Eficácia	100%	100%	84%		efc	95%
	Eficiência	86%	29%	64%		eff	60%
EFICÁCIA	efc	Quantidade peças [un]		100%	100%	51%	67%
	Referência Melhor comparativo	592,0	Obj	175,0	Obj	124,0	Obj
	Valor atual da análise	564,0	<	100,0	<	244,0	<
	efc	Tempo montagem [min]		100%	100%	100%	100%
	Referência Melhor comparativo	1290,0	Obj	390,0	Obj	195,0	Obj
	Valor atual da análise	1050,0	<	60,0	<	125,0	<
EFICIÊNCIA	efc	Custo de montagem [€]		100%	100%	100%	100%
	Referência Melhor comparativo	514,0	Obj	155,0	Obj	78,0	Obj
	Valor atual da análise	418,0	<	24,0	<	50,0	<
EFICIÊNCIA	eff	Quantidade peças [un]		95%	57%	-	76%
	eff	Tempo montagem [min]		81%	15%	64%	54%
	eff	Custo de montagem [€]		81%	15%	64%	54%

Figura 141 - Tabela de desempenho referente ao domínio *Lean Design for Assembly*

O objetivo principal da intervenção no sistema de anti-torção era de facto a diminuição do custo total do conjunto, o que se considera bem sucedido, como ilustrado na tabela de desempenho da Figura 139. Contudo, também se conseguiu um decréscimo no tempo de montagem de cerca de 4 horas, devido à diminuição da quantidade de furações para as abraçadeiras de tubo hidráulico a realizar durante a montagem e uniformização de alguns componentes, o que conduziu a uma eficiência de 81%.

No sistema de regulação da folga, a simplificação no conjunto de engrenamento e respetiva calibração permitiram diminuir significativamente o tempo de montagem, o que resultou numa eficiência de 15%, ou seja, como não existe a necessidade de calibrar o sector dentado nem de montar o porta-lâminas no sítio para conclusão da montagem deste conjunto, a poupança é de cerca 5,5 horas. De referir que este valor de eficiência também retrata a diferença de complexidade entre o conjunto atual e o desenvolvido, pelo que se pode afirmar que a meta a atingir era bastante modesta.

Na amarração dos cilindros, como houve a duplicação das unidades dos atuadores hidráulicos, era de esperar que a quantidade de peças também acompanhasse esta tendência. Por este facto, obteve-se a reprovação da variável de quantidade de peças com um resultado de eficácia de 51%. Analisando a variável do tempo de montagem

constata-se que, apesar do aumento da quantidade de peças, a facilidade de montagem aumentou, e obteve-se uma eficácia de 100% na variável do tempo.

Pode-se afirmar que este domínio, apesar dos valores de eficiência, foi bem sucedido com uma eficácia de 95% porque o principal objetivo era a diminuição da complexidade de montagem, objetivo que foi cumprido.

3.7.6.5 Design for Structural integrity

Na Figura 142 está ilustrada a tabela de desempenho referente à análise *Lean* no domínio *Design for Structural integrity*.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto			
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		CORPO ESTRUTURA		PORTA-LÂMINAS	
Design for Structural Integrity	Eficácia	99%		0%	efc 50%
	Eficiência	62%		-	eff 62%
EFICÁCIA	efc Tensão Admissível [MPa]	100%		97%	98%
	Referência Melhor comparativo	214,0	Obj	207,0	Obj
	Valor atual da análise	170,0	<	214,0	<
	efc Desloc. horizontal [mm]	100%		51%	76%
	Referência Melhor comparativo	0,314	Obj	0,125	Obj
	Valor atual da análise	0,139	<	0,243	<
EFICIÊNCIA	efc Desloc. vertical [mm]	97%		77%	87%
	Referência Melhor comparativo	2,870	Obj	0,844	Obj
	Valor atual da análise	2,950	<	1,100	<
	eff Tensão Admissível [MPa]	79%		-	79%
	eff Desloc. horizontal [mm]	44%		-	44%
	eff Desloc. vertical [mm]	-		-	-

Figura 142 - Tabela de desempenho referente ao domínio *Lean Design for Structural integrity*

Analisando a tabela de desempenho estrutural, à primeira vista, poder-se-ia afirmar que este domínio reprova com uma média de eficácia de 50% e uma eficiência de 62%. Contudo, analisando os resultados do corpo da estrutura, apenas comprometido pelo aumento do deslocamento vertical, considera-se que este foi desenvolvido com sucesso ao nível do comportamento estrutural com uma eficácia de 99%, ou seja, com um pouco mais de esforço de projeto, seria possível obter uma eficácia de 100%. Já o porta-lâminas reprova por completo em todas as variáveis analisadas e com uma média global de eficácia de 0%.

O pior resultado do porta-lâminas é no deslocamento horizontal, com uma eficácia de 51%. No entanto, ao analisar o valor real, consegue-se perceber que a diferença absoluta entre o modelo anterior e o desenvolvido é de aproximadamente 0,12 mm, o que na prática é desprezável. Portanto, se a análise efetuada tivesse como meta o erro máximo admitido, a variável seria bem sucedida. A tensão máxima instalada reprova na eficácia a 3% do sucesso, pelo que se pode considerar o porta-lâminas como aprovado dado que o valor não atinge a cedência do material. O mesmo acontece para o deslocamento vertical que reprova na eficácia com valor de 77%, relativamente ao modelo 2.0, mas continua dentro dos parâmetros aceitáveis.

Estes resultados acabam por ser compreensíveis, porque tanto o corpo da estrutura como do porta-lâminas foram diminuídos nas suas dimensões geométricas e o esforço de corte aumentou em cerca de 17% devido à diminuição do ângulo máximo de corte.

3.7.6.6 Design for Eco design

Na Figura 143 está ilustrada a tabela de desempenho referente à análise *Lean* no domínio *Design for Eco design*.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto	
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		PRODUTO FINAL	
Design for Eco Design	Eficácia	100%	efc 100%
	Eficiência	27%	eff 27%
EFICÁCIA	efc Quantidade óleo [litros]	100%	100%
	Referência Melhor comparativo	470,0	Obj
	Valor atual da análise	300,0	<
	efc Eficiência energética [KWh]	100%	100%
	Referência Melhor comparativo	2,5	Obj
	Valor atual da análise	0,0	<
	efc Ar comprimido [litros]	100%	100%
	Referência Melhor comparativo	10,3	Obj
	Valor atual da análise	1,9	<
EFICIÊNCIA	eff Quantidade óleo [litros]	64%	64%
	eff Eficiência energética [KWh]	0%	0%
	eff Ar comprimido [litros]	18%	18%

Figura 143 - Tabela de desempenho referente ao domínio *Lean Design for Eco design*

Analisando a tabela de desempenho no domínio ecológico da máquina, à primeira vista pode-se afirmar que o desenvolvimento da máquina neste campo foi bem sucedido,

com uma eficácia de 100%. A reprovação ao nível da eficiência, de média global de 27%, deve-se à aplicação do sistema *start & stop* e à alteração do acionamento do sistema de mesa de apoio de chapas finas de pneumático para elétrico.

O valor apresentado do modelo desenvolvido para a variável da eficiência energética, de 0%, deve-se unicamente à poupança de energia quando o utilizador não está a operar com a máquina. Como a máquina é desligada por completo quando não opera num determinado período de tempo, o valor da análise é de 0 kWh, comparativamente a 2,5 kWh que a máquina consome estando constantemente ligada sem operar.

O mesmo acontece na variável de quantidade de ar comprimido. Como o sistema de mesa de apoio de chapas finas do modelo anterior é responsável por cerca de 80% do consumo global da máquina, essa é a poupança que se ganha no sistema.

3.7.6.7 Design for Expedition

Na Figura 144 está ilustrada a tabela de desempenho referente à análise *Lean* no domínio *Design for Expedition*.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto	
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		PRODUTO FINAL	
EFICÁCIA	Design for Expedition	Eficácia	100%
		Eficiência	75%
	efc	Largura [mm]	100%
	Referência Melhor comparativo		2370,0 Obj
	Valor atual da análise		2230,0 <
	efc	Altura [mm]	100%
	Referência Melhor comparativo		2590,0 Obj
	Valor atual da análise		2495,0 <
	efc	Custo expedição [€]	100%
	Referência Melhor comparativo		8750,0 Obj
	Valor atual da análise		2950,0 <
EFICIÊNCIA	eff	Largura [mm]	94%
	eff	Altura [mm]	96%
	eff	Custo expedição [€]	34%

Figura 144 - Tabela de desempenho referente ao domínio *Lean Design for Expedition*

A análise da tabela de desempenho no domínio da expedição permite constatar que, comparativamente a todos os outros domínios analisados, esta análise é bem sucedida, praticamente em todos os campos, com um valor de eficácia de 100% e com eficiência

de 75%, devido ao valor de eficiência na variável do custo de transporte. Estes valores devem-se ao facto de que, mediante todos os objetivos impostos, era implícita a alteração substancial das respetivas variáveis analisadas.

Contudo, é de referir que, apesar da pouca alteração das dimensões finais da máquina pronta, observa-se de facto uma grande diferença na seleção do transporte das mesmas. Na Tabela 37 é apresentada uma análise comparativa de dimensões de alguns contentores de carga, segundo o fornecedor *JustLog* [78], com as dimensões dos modelos da guilhotina 2.0 e 3.0, neste caso concreto para transporte por carga marítima.

Tabela 37 - Análise comparativa entre as dimensões de contentores de carga e os modelos de guilhotina, 2.0 e 3.0

Carga marítima				
Contentor	Dimensões		Modelo de guilhotina	
	Interiores [mm]		V2.0	V3.0
<i>20' Open Top</i>	L	2 346	X	✓
	A	2 353	O	O
<i>40' Open Top</i>	L	2 347	X	✓
	A	2 379	O	O
<i>40' High Cube Dry</i>	L	2 350	X	✓
	A	2 690	✓	✓
<i>45' High Cube Dry</i>	L	2 352	✓	✓
	A	2 695	✓	✓
<i>20' Reefer</i>	L	2 294	X	✓
	A	2 237	X	X
<i>40' High Cube Reefer</i>	L	2 294	X	✓
	A	2 509	X	✓
L - Largura			Reprovado - x	
A - Altura			Aprovado com custo extra - o	
			Aprovado - ✓	

Como se verifica na Tabela 37, o modelo 2.0 não pode ser transportado por contentores do tipo *Open Top*, enquanto o modelo 3.0, com um custo extra devido à altura da máquina, possibilita esta opção.

De maneira a ter perceção do impacto financeiro para transporte deste tipo de máquinas, foi solicitado a um fornecedor da Adira de expedição de máquinas que orçamentasse o transporte dos dois modelos de guilhotina, 2.0 e 3.0, em contentores iguais, mas viagens diferentes, para a cidade de Santos no Brasil. A diferença do transporte é de 5800 € sem contabilizar inspeção ao produto a transportar, colocação de certificados, seguro de mercadoria e despesas do destino. Esta grande diferença decorre da obrigatoriedade de o modelo de guilhotina 2.0 apenas pode ser transportado em contentor do tipo *Flat Rack* (plataforma aberta), enquanto o modelo 3.0 pode ser transportado em contentor fechado do tipo *Open Top*.

3.7.6.8 Design for eXcellence global

Para poder ter uma visão global da análise dos vários domínios selecionados para cada módulo, de seguida são apresentados os resultados dos conjuntos selecionados das guilhotinas que partilham vários domínios.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto		
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		CORPO ESTRUTURA	PORTA- LÂMINAS	
Design for X 'Dimensão'	Eficácia	33%	100%	efc 67%
	Eficiência	62%	88%	eff 75%
EFICÁCIA	efc Design for Cost	0%	100%	50%
	efc Design for Manufacturing	0%	100%	50%
	efc Design for Strutural Integrity	99%	0%	50%
EFICIÊNCIA	eff Design for Cost	-	88%	88%
	eff Design for Manufacturing	-	88%	88%
	eff Design for Strutural Integrity	62%	-	62%

Figura 145 - Tabela de desempenho global referente aos domínios partilhados do corpo da estrutura e do porta-lâminas

Na Figura 145 encontram-se ilustrados os resultados obtidos nos domínios de custo, fabrico e integridade estrutural, dos corpos da estrutura e do porta-lâminas. Analisando a tabela, pode-se afirmar que a melhoria da estrutura, nestes dois elementos, foi um objetivo parcialmente não cumprido, ou seja, a aplicação de um caixão postigo prejudicou os objetivos iniciais pré-estabelecidos, de diminuição do custo de fabrico externo e interno e o peso total. Por outro lado, cumpriu-se o objetivo de manter a integridade estrutural mesmo com a diminuição do ângulo máximo de corte. Depreende-se assim desta análise que o corpo da estrutura terá de ser revisto ao nível do método de fabrico, tanto externo como interno, o que resultará na diminuição do custo próprio.

Na Figura 146 estão ilustrados os resultados obtidos nos domínios de desenvolvimento do produto e de montagem, para os conjuntos da máquina, de anti-torção e do sistema de regulação da folga.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto		
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		SAT	REGULAÇÃO FOLGA	
Design for X 'Dimensão'	Eficácia	100%	100%	efc 100%
	Eficiência	87%	43%	eff 65%
EFICÁCIA	efc Design for Optimization	100%	100%	100%
	efc Design for Assembly	100%	100%	100%
EFICIÊNCIA	eff Design for Optimization	88%	57%	72%
	eff Design for Assembly	86%	29%	58%

Figura 146 - Tabela de desempenho global referente aos domínios partilhados do SAT e do sistema de regulação da folga

Pode-se afirmar que os conjuntos do SAT e da regulação da folga foram desenvolvidos com grande sucesso, tendo sido possível cumprir todas os objetivos iniciais propostos para os mesmos. No campo da eficiência os valores são mais reduzidos porque, neste caso, pode-se afirmar que estes conjuntos não sofrem nenhuma melhoria de processo há muito tempo.

Na Figura 147 estão ilustrados os resultados obtidos nos domínios de ecologia e expedição do produto pronto.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto	
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		PRODUTO FINAL	
Design for X 'Dimensão'	Eficácia	100%	efc 100%
	Eficiência	51%	eff 51%
EFICÁCIA	efc Design for Eco Design	100%	100%
	efc Design for Expedition	100%	100%
EFICIÊNCIA	eff Design for Eco Design	27%	27%
	eff Design for Expedition	75%	75%

Figura 147 - Tabela de desempenho global referente aos domínios partilhados do produto final

Na Figura 147 pode-se ver claramente que os domínios selecionados para avaliação do produto final foram cumpridos ao nível da eficácia. Avaliando a eficiência, é possível

constatar a ineficiência da guilhotina do modelo 2.0, ou seja, pode-se afirmar que o desenvolvimento anterior não foi elaborado tendo em conta o impacto ambiental e o custo de expedição que a máquina teria.

3.7.7 Discussão de resultados e melhorias

Neste capítulo são discutidos alguns detalhes entre os modelos de guilhotina 2.0 e 3.0 que ainda não foram abordados nos capítulos anteriores.

3.7.7.1 Corpo da estrutura e do porta-lâminas

Devido aos objetivos iniciais impostos para o desenvolvimento da nova guilhotina consegue-se perceber a razão da reprovação da estrutura na análise *Lean* nos domínios de fabrico e de custo. Estes objetivos implicaram as seguintes alterações:

- Desenvolvimento da estrutura com caixão postigo;
- Diminuição das dimensões geométricas;
- Diminuição do ângulo máximo de corte.

Posto isto, sabe-se que estas modificações implicariam a alteração da resistência estrutural. Mesmo assim, conseguiu-se eliminar a elevada concentração de tensões em volta da cava, que se verificava na estrutura do modelo 2.0, garantindo o mesmo desempenho da estrutura face ao aumento substancial das cargas aplicadas à guilhotina, comparativamente com o modelo anterior.

O objetivo inicial de evitar pré-maquinação aumentou o custo de fabrico do conjunto estrutural, já que este é agora constituído por 2 elementos soldados e maquinados separadamente, estrutura e caixão, ligados por cavilhões de reforço. De maneira a contabilizar a diferença real do custo entre o modelo 2.0 e o 3.0, na Tabela 38 está indicado o custo de mão de obra interno do conjunto de ligação da estrutura com o caixão.

Tabela 38 - Custos de operações das estruturas e porta-lâminas das guilhotinas 2.0 e 3.0

Custo de operações internas					CUSTO [€]
	Custo por hora		Estrutura	Porta-lâminas	Estrutura + caixão
	Maquinação	Montagem			
	-	-	-	-	0
					1 760
Custo [€]	30,7	-	3 438	1 165	-
			6 728	1 037	
	-	23,9	-	-	0
					47,8
NOTA Valor da máquina 2.0 destacado a cor de tijolo Valor da máquina 3.0 destacado a azul					

Com os valores apresentados na Tabela 38 consegue-se calcular a diferença do custo total de fabrico interno entre os modelos dos corpos das estruturas, da versão 2.0 e 3.0. Apesar de não haver uma grande diferença de custo entre os conjuntos soldados, na maquinação o custo aumenta para cerca do dobro, além do custo extra do material para ligação do caixão à estrutura, ilustrada na Figura 76. O custo dos elementos de ligação da estrutura com o corpo é de 1 760 € e o custo de montagem é cerca de 50 €. Considerando a soma da diferença de custos de todos os processos dos dois conjuntos, a diferença total é cerca de 5 670 €.

$$\begin{aligned} \text{€}_{\text{soldadura}} + \text{€}_{\text{maquinação}} + \text{€}_{\text{elementos lig.}} + \text{€}_{\text{montagem}} &= \text{€}_{\text{diferença}} \\ 579 + 3286 + 1760 + 47,8 &\cong 5673 \text{ €} \end{aligned}$$

O fabrico do porta-lâminas desenvolvido, além da diminuição do peso e do custo de fabrico do conjunto soldado, permite diminuir também o tempo de maquinação consideravelmente devido à particularidade de se poder maquinar todo o corpo numa só posição, em vez de duas como no modelo 2.0.

3.7.7.2 Atuadores principais hidráulicos

Além da análise feita no capítulo 3.7.6.1, pode-se verificar na Tabela 39 que o desempenho dos cilindros da guilhotina 3.0 também aumentou, comparando a carga necessária para corte da chapa de aço de maior espessura com a força de corte necessária.

Tabela 39 - Análise comparativa de desempenho dos cilindros hidráulicos atual e desenvolvidos

CARGAS	$F_{\text{cil 2.0}} = 1003946 \text{ N} > F_c = 984261 \text{ N}$	✓
	$2. F_{\text{cil 3.0}} = 1417644 \text{ N} > F_c = 1148684 \text{ N}$	✓
FATOR DE SEGURANÇA	$FS_{2.0} = F_{\text{cil}}/F_c = 1,02$	$FS_{2.0} < FS_{3.0}$ ✓
	$FS_{3.0} = 1,23$	

Verifica-se que o fator de segurança (FS) é mais elevado no modelo desenvolvido comparativamente ao modelo 2.0, ou seja, existe mais margem para erro nas cargas aplicadas, tolerâncias de fabrico fora de cota ou até simplificações feitas nas equações da verificação estrutural.

A opção delineada de uniformização dos cilindros hidráulicos entre as gamas do modelo GV teve como principal objetivo obter mais margem para negociação do custo unitário. Com recurso a uma folha de cálculo estabeleceu-se o seguinte esquema de quantidades de cilindros para as várias gamas do modelo GV 3.0, como indicado na Tabela 40.

Tabela 40 - Indicação da seleção dos cilindros a aplicar nas várias gamas do modelo da guilhotina GV 3.0

[mm]		Cilindro esquerdo		Cilindro direito	
		Ø220	Ø190	Ø190	Ø160
	Pistão				
	Haste	Ø110	Ø100	Ø140	Ø100
GAMAS GV	16.30	1		1	
	16.40	1		1	
	16.60		2		2
	20.30		2		2
	20.40		2		2
	20.60	2		2	
	25.30	2		2	
	25.40	2		2	

3.7.7.3 Circuito hidráulico principal

A intervenção no circuito hidráulico teve como principal objetivo melhorar a disposição de todos os componentes hidráulicos, desde blocos de comando até aos acessórios de ligação, tendo em conta o espaço para montagem dos mesmos.

Apesar de não ter sido possível contabilizar os tempos de montagem dos conjuntos 2.0 e 3.0, é facilmente constatado que, comparando a montagem do modelo 2.0, na Figura 66, com a do 3.0, na Figura 80, no modelo 3.0 todos os componentes do circuito estão bem mais espaçados entre eles, o que dá mais liberdade ao operador para montagem dos mesmos. Além da nova disposição dos componentes hidráulicos na estrutura, diminuiu-se a quantidade de peças totais deste conjunto (Figura 141), das 244 da guilhotina anterior para 124. Por estas razões, estima-se uma diminuição considerável do tempo da montagem do conjunto do circuito hidráulico.

De referir que, além das alterações aplicadas na parte posterior da máquina, também foi eliminada a passagem de tubagem hidráulica entre a chapa frontal e o reforço posterior da estrutura (Figura 148). Na Figura 66-a pode-se observar um exemplo desta montagem na guilhotina 2.0.

De referir também que as alterações aplicadas, no que concerne à modificação do tipo de bomba, minimização da quantidade de acessórios hidráulicos e diminuição do volume do depósito, diminuíram o custo do grupo hidráulico em cerca de 1500 €.



Figura 148 - Vista isométrica da estrutura desenvolvida com detalhe de topo para chapa frontal e reforço posterior

3.7.7.4 Guiamentos principais do porta-lâminas

Uma das intervenções mais relevantes nos guiamentos do porta-lâminas consistiu na eliminação dos guiamentos laterais. Por vezes, durante o corte, o porta-lâminas perde contato com o montante da estrutura, o que faz com que estes guiamentos, na prática, sofram pouco esforço. A solução desenvolvida, já ilustrada na Figura 83, é suficientemente rígida para guiar o porta-lâminas no deslocamento transversal, devido ao incremento de mais duas unidades dos atuadores hidráulicos. De referir que o custo para os guiamentos laterais diminuiu em cerca de 50% porque o custo do conjunto do guiamento central tem o custo unitário de um lateral, pelo que o custo associado duplica.

Os guiamentos posteriores superiores no modelo 2.0 diferem na sua construção entre o guiamento superior direito e o esquerdo, para compensar o deslocamento lateral do porta-lâminas devido à inclinação do mesmo para o ângulo máximo de corte de 3,5°. No modelo desenvolvido, com a diminuição do ângulo máximo de corte para 3°, foi possível uniformizar a aplicação dos guiamentos posteriores superiores, o que por sua vez se traduz em obter mais margem de negociação do custo respetivo.

Relativamente aos guiamentos inferiores, e consultando os valores na Tabela 20 e na Tabela 38, consegue-se calcular a diferença do custo real deste conjunto.

$$\begin{aligned} \text{€}_{2.0} - \text{€}_{3.0} + \text{€}_{\text{operador.montagem}} \times (t_{\text{montagem 2.0}} - t_{\text{montagem 3.0}}) &= \text{€}_{\text{REAL}} \\ 4095 - 2547 + 23,9 \times \left[\frac{(390 - 60)}{60} \right] &\cong 1680 \text{ €} \end{aligned}$$

3.7.7.5 Conjuntos opcionais da máquina

O sistema de apoio para chapas finas foi completamente redesenhado, tendo na versão 3.0 um aspeto totalmente novo e um princípio ligeiramente diferente relativamente ao anterior. Dada a localização do sistema de MACF no modelo desenvolvido, aplicado na régua do esbarro, este possui limitações de operação. Apesar de o custo ter diminuído em cerca de 500€, o novo sistema apenas funcionará no ângulo de corte de 0,5° de maneira a garantir o alinhamento dos veios de apoio da chapa no plano horizontal. O

custo do fabrico interno não pode ser comparado porque, até à data, este novo conjunto desenvolvido não foi montado nem testado.

3.8 Processos de fabrico e materiais

O modelo de guilhotina desenvolvido partilha os mesmos processos de fabrico do modelo 2.0, tendo só a particularidade da diminuição das pré-maquinações, a maquinação individual do corpo da estrutura e do caixão, e posterior ligação dos dois elementos por cavilhas e parafusos. Os restantes conjuntos são montados por ligações aparafusadas aos respetivos componentes adjacentes.

Na Tabela 41, estão destacados os elementos estruturais, estrutura, caixão e porta-lâminas e atuadores hidráulicos da guilhotina desenvolvida, versão 3.0.

Consideram-se as matérias-primas selecionadas para cada elemento indicado e os respetivos processos de fabrico, externos e internos, a que estes elementos estão sujeitos.

Tabela 41 – Processos de fabrico e respetivas matérias-primas dos elementos estruturais e atuadores hidráulicos

GV 2030 v3.0			
	Matéria-prima	Processos de fabrico	
		Externo	Interno
Elementos estruturais			Montagem
Corpo da estrutura	Chapa planificada S275 JR	Corte por oxicorte Soldadura	Maquinação
Caixão			Montagem
Porta-lâminas			Maquinação
Atuadores hidráulicos			Montagem
Corpo do cilindro	E355+SR	Corte por serrote Maquinação	-
Pistão	C45E	Corte por serrote Maquinação	-
Haste			
Tampas	S355	Corte por oxicorte Maquinação	-

3.9 Desenhos de pormenor

Os desenhos de pormenor apresentados estão limitados pelos direitos de confidencialidade exigidos pela empresa. Assim sendo, serão apresentados o desenho de soldadura da estrutura e o de montagem do cilindro hidráulico de Ø190 mm.

Na Figura 149 está representado o conjunto de montagem do cilindro hidráulico esquerdo da guilhotina desenvolvida. Está ilustrado, em vista explodida, os componentes para montagem final do cilindro.

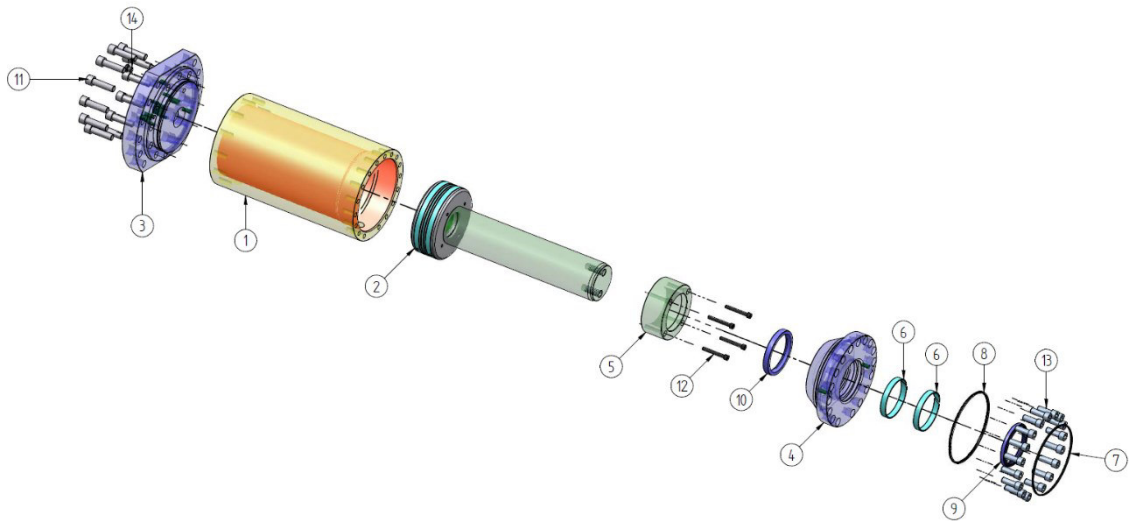


Figura 149 - Vista isométrica explodida da montagem final do cilindro hidráulico esquerdo da guilhotina 3.0

O desenho técnico do conjunto do cilindro localizado na Figura 149 encontra-se no anexo 6.1. Na Tabela 42 está indicada a lista de material do conjunto de montagem do cilindro hidráulico esquerdo, representado na Figura 149.

Tabela 42 - Lista de material do conjunto do cilindro esquerdo (Figura 149)

Item	Descrição	Quantidade
MONTAGEM CILINDRO D190		
1	CORPO DO CILINDRO D190	1
2	PISTAO/HASTE D100	1
3	TAMPA SUPERIOR CILINDRO D190	1
4	TAMPA INFERIOR CILINDRO D190	1
5	CALÇO	1
6	CINTA DO EMBOLO	2
7	VEDANTE ORING D184.5x3	1
8	VEDANTE ORING D184.2x5.7	1
9	RASPADOR d100	1
10	VEDANTE EMBOLO d100	1
11	PARAFUSO M16x55-12.9	12
12	PARAFUSO M8x65-12.9	4
13	PARAFUSO M14x40-12.9	17
14	VSTI G1/4"	1

Na Figura 150 e Figura 151 estão representadas as vistas isométricas do corpo da estrutura da guilhotina desenvolvida, versão 3.0. É representado parte do desenho de soldadura, mas o respetivo desenho técnico associado encontra-se no anexo 6.2.

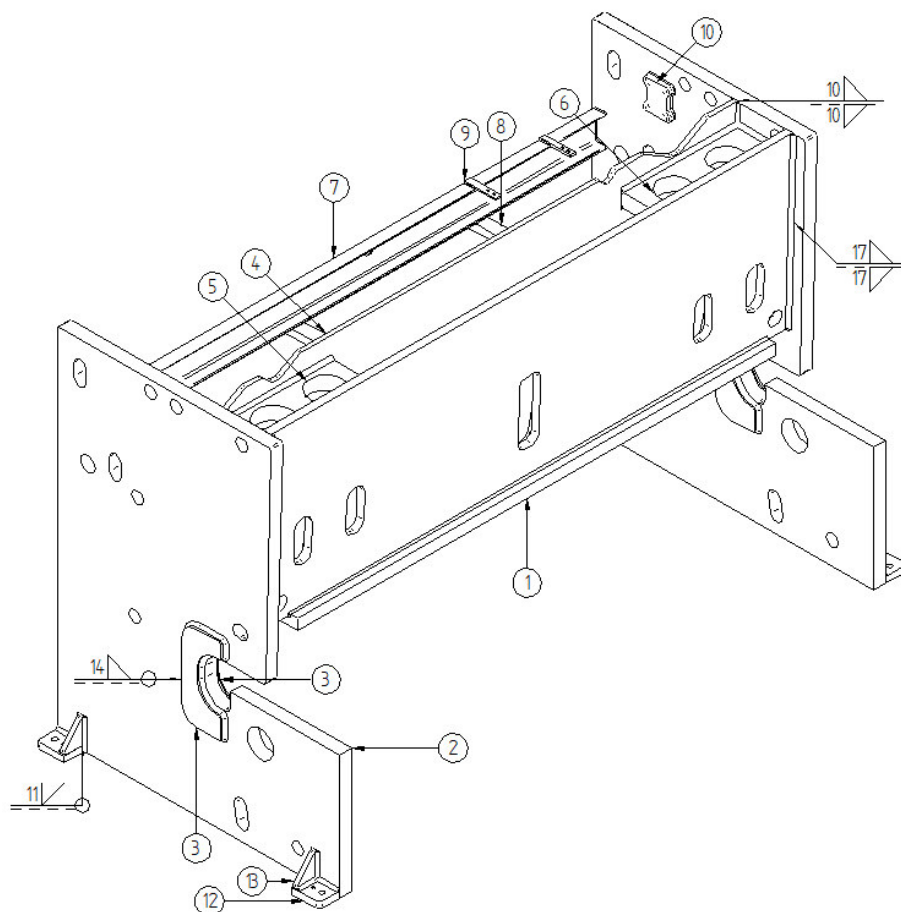


Figura 150 - Vista isométrica frontal com indicação dos constituintes do corpo da estrutura da guilhotina 3.0

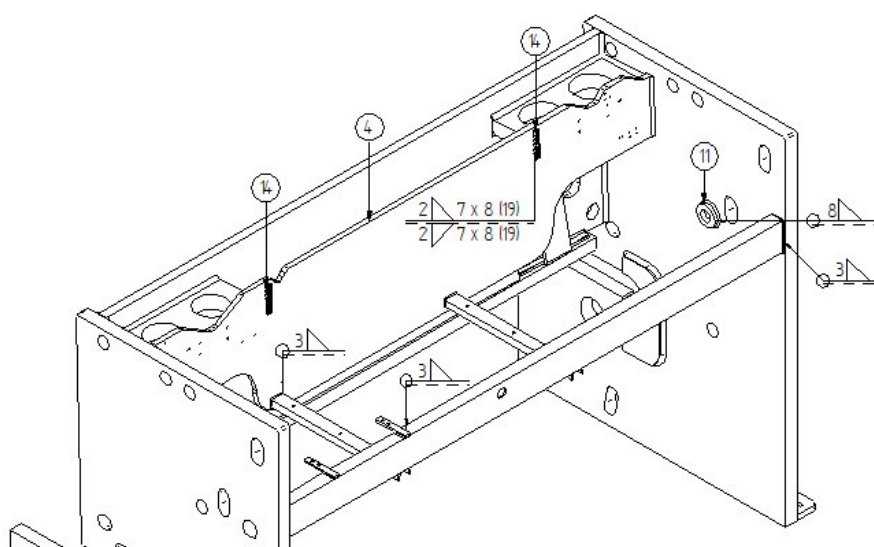


Figura 151 - Vista isométrica posterior com indicação dos constituintes do corpo da estrutura da guilhotina 3.0

Na Tabela 43 descrevem-se as peças constituintes do corpo da estrutura da guilhotina desenvolvida, apresentada nas Figura 150 e Figura 151.

Tabela 43 - Lista de material do corpo da estrutura soldado representado nas Figura 150 e Figura 151

Item	Descrição	Quantidade
CORPO EST GV2030 3.0.0		
1	CONJUNTO CHAPA FRONTAL	1
2	MONTANTE	2
3	REFORÇO DA CAVA	4
4	CHAPA REFORÇO INTERMÉDIA	1
5	CHAPA FIXIXAÇÃO CILINDRO ESQ	1
6	CHAPA FIXIXAÇÃO CILINDRO DIR	1
7	REFORÇO UPN POSTERIOR	1
8	REFORÇO UPN APOIO DEPOSITO	2
9	CHAPA FIXIXAÇÃO ARREFECEDOR	2
10	CHAPA FIXIXAÇÃO MOTOR/BOMBA	1
11	REFORÇO FURO	2
12	SAPATA	4
13	REFORÇO DA SAPATA	4
14	CALHA DESLIZANTE PARA ABRAÇADEIRA	4

3.10 Custos e retorno de investimento

Devido à nova guilhotina ainda não ter sido totalmente finalizada, o custeio total da máquina pronta não pode ser analisado. Contudo, pode-se analisar o custo total dos conjuntos principais, dos dois modelos, que foram abordados neste trabalho e que constituem a máquina.

Na Tabela 44 apresentam-se os custos solicitados para os dois modelos, incluindo elementos de compra, fabrico interno e montagem, e respetiva totalização. Consultando os valores apresentados na Tabela 38, do custo de fabrico interno e de montagem, estima-se o valor do custo para os respetivos elementos.

Tabela 44 - Tabela de custos parcial dos modelos de guilhotina atual e desenvolvido

Conjuntos das máquinas	Modelo 2.0		Modelo 3.0	
	Custo de compra [€]	Custo de fabrico [€]	Custo de compra [€]	Custo de fabrico [€]
Estrutura	33 608	3 434	34 187	6 720
Elementos de ligação (v3.0)		-	1 760	50
Porta-Lâminas	10 651	1 165	9 229	1 037
Cilindros Hidráulicos	8 694	-	7 230	-
SAT	9 140	514	7 305	418
Regulação da folga	4 095	155	2 547	24
Amarração dos cilindros	2 335	78	1 745	50
Grupo hidráulico	11 365	-	9 865	-
TOTAL [€]	85 234		82 157	

Verifica-se que o custo total dos conjuntos indicados, que de facto são os apresentados, tem mais impacto no custeio da máquina total, é idêntico entre as versões da máquina. Contudo, a guilhotina desenvolvida apresenta um custo de produção de 4% inferior ao modelo atual, de cerca de 3070 €.

De referir que, apesar de este capítulo se focar nos custos e retorno de investimento da Adira, com a diminuição do consumo energético, analisada no capítulo 3.7.6.6, o tempo de retorno do investimento por parte do cliente da Adira, desta máquina, será reduzido.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

O desenvolvimento deste modelo de guilhotina GV foi no geral muito bem concebido e com valores de acordo com os objetivos iniciais propostos.

Uma das melhorias da guilhotina desenvolvida consiste na eliminação do caixão como um elemento postigo. Consultando a Tabela 20 percebe-se que as alterações aplicadas, de maneira a evitar pré-maquinações do conjunto estrutural, incrementaram custos extra, mas não inovaram o produto em nenhum parâmetro da máquina. Por essa razão, esta alteração ao corpo estrutural desenvolvido não se irá aplicar nas futuras máquinas, ou seja, a construção em estrutura monobloco irá ser aplicada novamente.

Por outro lado, as restantes alterações, como se pode verificar na Tabela 20, tanto ao nível de custo, fabrico e montagem, trouxeram vantagens e soluções com tecnologia mais avançada comparativamente ao modelo atual.

A guilhotina desenvolvida, GV2030 de versão 3.0, cumpre os objetivos iniciais impostos, tendo reprovado apenas no desenvolvimento da estrutura. De referir que, além do aumento do custo de fabrico do corpo da estrutura, o processo de maquinação também é mais complexo. A maquinação destes dois elementos, dado os empenos provenientes da soldadura, teve de ser elaborada em 3 fases distintas:

- Fase 1.** Maquinação do corpo estrutural - maquinação das faces de encosto com o caixão, furações nos montantes e da barra dos calcadores;
- Fase 2.** Maquinação do caixão - maquinação das faces de encosto com a estrutura, maquinação da base da mesa para a lâmina e respetivas furações;
- Fase 3.** Maquinação do conjunto estrutura + caixão - maquinação das faces de apoio para os cilindros hidráulicos e respetiva furação com tolerância.

Constatou-se que, na 3ª fase, o desvio dos centros dos cilindros hidráulicos em relação à chapa frontal foi de cerca de 6 mm de afastamento. Contudo, dada a experiência da equipa de engenharia da Adira na construção deste tipo de máquinas, foi tido em conta um possível desvio desta grandeza na fase de projeto.

Os restantes conjuntos foram desenvolvidos com grande sucesso ao nível de projeto, embora careça a aplicação e teste dos mesmos para validação final. De referir que, à data de conclusão deste projeto, apenas foram montados na máquina, o porta-lâminas,

os cilindros hidráulicos e a amarração dos mesmos, os guiamentos do porta-lâminas e o sistema de anti torção.

A aplicação da metodologia *LeanDfX* num contexto de melhoria de produto, apesar de ser mais vocacionada para desenvolvimento de novos produtos, foi de grande sucesso. Esta ferramenta ajudou na análise da complexidade do design desenvolvido, comparar de forma original as versões das guilhotinas em diferentes domínios, e verificar a lógica da modularização dos elementos da máquina, de uma forma objetiva e concisa. De um modo geral, analisando os resultados apresentados no subcapítulo 3.7.6, numa vertente mais prática, consegue-se associar os domínios estudados a processos reais pela que a guilhotina será submetida, ou seja:

- ❖ Processo de fabrico
 - *Design for cost;*
 - *Design for manufacturing;*
 - *Design for structural integrity.*
- ❖ Processo de montagem
 - *Design for optimization;*
 - *Design for assembly.*
- ❖ Processo comercial
 - *Design for eco design;*
 - *Design for expedition.*

Posto isto, pode-se afirmar que, entre os processos indicados, o processo de fabrico foi o que apresentou piores resultados, devido à reprovação do desenvolvimento e fabrico do conjunto do corpo da estrutura. Já o processo de montagem foi desenvolvido com sucesso, atingindo todos os objetivos inicialmente impostos e as metas excedidas. Relativamente ao processo comercial, o *eco design* engloba a importância da pegada ambiental e a expedição da máquina, que pode ou não ser por conta do cliente. Pode-se afirmar que os comerciais da Adira, neste modelo de máquina, têm mais argumentos positivos para comercialização do produto.

A implementação deste produto no mercado será de facto uma mais valia para Adira, que permitirá continuar a comercializar uma guilhotina com grande fiabilidade, como o modelo da versão 2.0, embora com mais funcionalidades ao nível do comando numérico, sem comprometer o custo de venda. Desta forma, prevê-se que seja possível aumentar a sua margem de lucro, mantendo a competitividade face a outras empresas do mesmo ramo.

Na Figura 74 apresenta-se o modelo final da guilhotina desenvolvida GV2030 v3.0, um produto inovador, com grande destaque para a implementação de blindagens por toda a máquina, iluminação frontal através do painel colocado no topo da máquina (destacado a preto) e com logotipo adira igualmente iluminado.

Além destas melhorias ao nível do aspeto da guilhotina 3.0, também foi delineado um novo de esquemas de cores, como representado na Figura 74.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

A principal proposta de trabalho futura, que é implícita a este projeto, consiste na alteração do método de construção do corpo da estrutura, já que se concluiu que evitar a pré-maquinação dos componentes que a constituem produz um aumento de custos. A construção soldada em monobloco será novamente adotada de maneira a permitir ganhar mais margem de lucro ou colocar a máquina no mercado a um preço mais competitivo.

O sistema de apoio de chapas finas também beneficiaria de retrabalho futuro. Apesar de este ainda não ter sido testado, já se sabe que o sistema de apoio limita a cadência da máquina devido ao movimento dos veios de apoio da chapa. Estes modelos de guilhotinas, GV, não são máquinas de cadência elevada nem de utilização intensiva em corte de chapas de espessuras até 6 mm, mas muito depende da utilização por parte de cada cliente.

Outras propostas de trabalho futuras mais abrangentes seriam:

- Desenvolver novos tamanhos de cilindros, aumentando o diâmetro, mas diminuindo a quantidade por máquina e talvez abdicar parcialmente da uniformização;
- Estudar a possibilidade de o sistema de regulação da folga, em vez de ser aplicado juntamente com o guiamento posterior inferior, ser colocado nos guiamentos frontais;
- Aumentar a gama das guilhotinas de corte vertical para corte de chapas de espessura até 30 mm;
- Desenvolvimento de uma máquina totalmente automática, ou seja, com leitura de espessura e comprimento de chapa, caso em que apenas é necessário inserir a largura a cortar;
- Estudar a possibilidade de colocar um pequeno carrinho no caixão para retirar pequenas peças;
- Estudar a aplicação de um acionamento elétrico em vez de hidráulico, tornando a máquina totalmente ecológica.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

Livros

1. Golenko, A., *Fundamentals of machine design - A Coursebook for Polish Foreign Students*. 2010, Skorka, Polónia: Universidade Tecnológica de Wrocław.
7. Fialho, A.B., *Automação Hidráulica - Projetos, dimensionamento e análise de circuitos*. 5ª ed. 2007, São Paulo, Brasil: Editora Érica.
9. Netto, A. e M.F.y. Fernández, *Manual de hidráulica*. 9ª ed. 2018, São Paulo, Brasil: Blucher.
11. Nesbitt, B., *Handbook of pumps and pumping: Pumping manual international*. 2006, em *PUMPING MANUAL International*. 2006, Elsevier Science & Technology Books.
15. Ellis, G., *Control system design guide: using your computer to understand and diagnose feedback controllers*. 4ª ed. 2012, EUA: Elsevier.
16. Bars, R., L. Keviczky, J. Hetthéssy, e C. Bányász, *Control engineering*, ed. M.J. Grimble, M.A. Johnson, and L. Bushnell. 2019, Singapura: Springer.
24. Budynas, R.G. e J.K. Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*, ed. Edição. Vol. 9. 2008, Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill New York.
25. Completo, A. e F. Melo, *Introdução ao Projeto Mecânico*. 2.ª ed. 2019, Porto, Portugal: Quântica Editora.
26. Yoshimura, M., *System Design Optimization for Product Manufacturing*. 2010, Kyoto, Japão: Springer Science & Business Media.
27. Boothroyd, G., *Product design for manufacture and assembly*. 2002, Nova Iorque, EUA: Marcel Dekker, Inc. 688.
31. Anderson, D.M., *Design for manufacturability: How to use concurrent engineering to rapidly develop low-cost, high-quality products for lean production*. 2020, Nova Iorque, EUA: CRC press. 472.
46. Appelt, D., A.A. Fernandes, A.B.d. Rocha, J.F. Duarte, e J.T. Pereira, *Novas tecnologias de corte*. 1991, S. I.]: APTCP.
49. Committee, A.H., *ASM Handbook "Forming and forging"*, ed. 3. Vol. 14. 1993: ASM INTERNATIONAL. 2110.
50. Pacheco, J.B., *Utilização de Quinadoras e Guilhotinas (Quinagem e Corte)*. 1992, Porto, Portugal: APTCP.
56. Rodrigues, J. e P. Martins, *Tecnologia mecânica: Tecnologia da deformação plástica*. Vol. Vol. II Aplicações industriais. 2005, Lisboa, Portugal.
66. Campilho, R.D.S.G., *Método de Elementos Finitos - Ferramentas para Análise Estrutural*. 2012, Porto: Publindústria.
67. Azevedo, Á.F.M., *Método dos elementos finitos*. 1ª Edição ed. 2003: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

75. Panzer, P. e G. Beitler, *Manual de oleohidráulica*. 1965, Hamburgo, Alemanha: Editorial Blume.

Artigos/teses

5. Santos, A.A. e A.F.d. Silva. *Electro pneumatic control versus grafcet*. in *International Congress on Education, Innovation and Learning Technologies (ICEILT2015)*. 2015. Instituto Politécnico do Porto.
28. Gatenby, D.A. e G. Foo, *Design for X (DFX): key to competitive, profitable products*. AT&T Technical Journal, 1990. **69**(3): p. 2-13.
29. Bralla, J.G., *Design for Excellence*. Journal of Manufacturing Systems, 1996. **15**(6): p. 443.
34. Dean, E.B. e R. Unal. *Elements of designing for cost*. in *Aerospace Design Conference*. 1992. Estados Unidos da América.
35. Baptista, A., D. Peixoto, A. Ferreira, e J. Pereira, *Lean design-for-X methodology: Integrating modular design, structural optimization and ecodesign in a machine tool case study*. 2018. **69**: p. 722-727.
36. Atilano, L., A. Martinho, M. Silva, e A. Baptista, *Lean Design-for-X: Case study of a new design framework applied to an adaptive robot gripper development process*. 2019. **84**: p. 667-672.
37. Silva, J., F. Silva, R. Campilho, J. Sá, e L. Ferreira, *A model for productivity improvement on machining of components for stamping dies*. International Journal of Industrial Engineering and Management, 2021. **12**(2): p. 85-101.
38. Yutian, W., W. Dong, S. ZHANG, T. Zihan, W. Liping, e L. Yanmin, *Design and development of a five-axis machine tool with high accuracy, stiffness and efficiency for aero-engine casing manufacturing*. Chinese Journal of Aeronautics, 2021: p. 485 - 496.
39. Dias, P., F. Silva, R. Campilho, L. Ferreira, e T. Santos, *Analysis and improvement of an assembly line in the automotive industry*. Procedia Manufacturing, 2019. **38**: p. 1444-1452.
40. Correia, D., F. Silva, R. Gouveia, T. Pereira, e L.P. Ferreira, *Improving manual assembly lines devoted to complex electronic devices by applying Lean tools*. Procedia Manufacturing, 2018. **17**: p. 663-671.
41. Kim, T., S. Tae, e S. Roh, *Assessment of the CO2 emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system*. ELSEVIER, 2013. **25**: p. 729-741.
42. Yan, X.L., H. Sato, Y. Kamiji, Y. Imai, A. Terada, Y. Tachibana, e K. Kunitomi, *GTHTR300 cost reduction through design upgrade and cogeneration*. Elsevier, 2016. **306**: p. 215-220.
43. Donegan, C.F., *Dr Guillotin—reformer and humanitarian*. Journal of the Royal Society of Medicine, 1990. **83**(10): p. 637-639.
58. Gasiorek, D., P. Baranowski, J. Malachowski, L. Mazurkiewicz, e M. Wiercigroch, *Modelling of guillotine cutting of multi-layered aluminum sheets*. Jornal de Processos de Fabrico, 2018. **34**: p. 374-388.
59. Oliveira, D.L.d.S., *Otimização do corte de pontas de um aço livre de intersticiais laminado a quente usando tesoura do tipo guilhotina*. 2011, Universidade de São Paulo: São Paulo, Brasil.

65. EUROPEIA, C., *Comunicação da Comissão no âmbito da execução da Diretiva 2006/42/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa às máquinas e que altera a Diretiva 95/16/CE*. Jornal Oficial da União Europeia, 2018: p. 86.
69. Araújo, L., F. Silva, R. Campilho, e J. Matos, *A novel dynamic holding system for thin metal plate shearing machines*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017. **44**: p. 242-252.
70. Marques, L.Q., *Otimização do Comportamento Mecânico de uma Estrutura de uma Máquina-Ferramenta, Guilhotina*, em *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2015, Universidade do Minho: Minho, Portugal. p. 300.

Normas

2. *Directiva 2006/42/CE*, em *Jornal Oficial da União Europeia*, P.E.e.d. Conselho, Editor. 2006, Serviço das Publicações da União Europeia: Luxemburgo, Luxemburgo. p. 24-86.
20. *Directiva 2009/127/CE*, em *Jornal Oficial da União Europeia*, P.E.E.D. CONSELHO, Editor. 2009. p. 4.
21. *Decreto-Lei n.º 103/2008*, em *Diário da República*, 1.ª série, M.D.E.E.D. INOVAÇÃO, Editor. 2008. p. 30.
22. *Decreto-Lei n.º 75/2011*, em *Diário da República*, 1.ª série, d.l.e.d.D. Ministério da Economia, Editor. 2011. p. 4.
63. *NP EN1993 -1-1: 2010 Eurocódigo 3-Projeto de estruturas de aço; Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, I.P.d. Qualidade, Editor. 2010. p. 116.
74. *Calculation of wall thickness subjected to internal pressure, in DIN 2413*, D.I.f. Normung, Editor. 1972, D. Normen, Editor: Berlim, Alemanha.

Doumentos

57. *Guilhotinas evolutivas*. 1992, ADIRA SA: Porto, Portugal.
68. ADIRA, *Documentos de engenharia*. 2022: Arquivos ADIRA.

Paginas web

3. ASAE. *Segurança das Máquinas*. 2006 [Acedido em: 01 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://www.asae.gov.pt/newsletter2/asaenews-n-95-marco-2016/seguranca-das-maquinas.aspx>.
4. ADIRA. *ADIRA Produtos*. 2020 [Acedido em: 01 dezembro, 2021]; Disponível em: <https://adira.pt/produtos/>.
6. PROVTEC, S.I. *Soluções robotizadas*. 2021 [Acedido em: 17 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://www.provtec.com.br/robo-paletizacao>.
8. PARKER. *Tecnologia Hidráulica Industrial*. 2006 [Acedido em: 16 de dezembro, 2021]; Disponível em: https://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.f158acfa3e600a59e967be29237ad1ca/?selectCategory=all&vgnextfmt=PT&vgnextoid=4b245bca1007e210VgnVCM10000032a71dacRCD&divisionChannel=Portugal&divisionChannelDesc=688040&divisionChannelId=4bb5d1bea018f010VgnVCM10000032a71dacRCD&newSearch=1&searchbox=Tecnologia%20Hidr%C3%A1ulica%20Industrial&start=1_0.
10. Industry, D. *Bombas Hidráulicas*. 2021 [Acedido em: 12 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://guide.directindustry.com/pt/que-bomba-hidraulica-escolher/>.

12. AXFLOW. *Bombas de carretos internos Viking Serie Universal*. 2018 [Acedido em: 14 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://www.axflow.com/pt-pt/catalogo/produtos/bombas/bombas-de-engrenagens/bombas-de-carretos-internos-viking-serie-universal>.
13. PUMPS, B. *Bomba industrial de lóbulos*. 2021 [Acedido em: 18 de dezembro, 2021]; Disponível em: https://pt.bonvepumps.com/bonve-industrial-lobe-pump-for-pulp-and-paper_p24.html.
14. Santos, A.d. *Saiba o que é e como fazer um parafuso de Arquimedes*. 2021 [Acedido em: 18 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://societific.com.br/parafuso-de-arquimedes/>.
17. COMPONENTS, R. *Fotocélula compacta Telemecanique Sensors Through Beam*. 2021 [Acedido em: 30 de dezembro, 2021]; Disponível em: [https://pt.rs-online.com/web/p/fotocelulas/4443530?cm_mmc=PT-PLA-DS3A--google--PLA_PT_PT_Automatizaci%C3%B3n_y_Control_de_Procesos_Whoop--\(PT:Whoop!\)+Fotoc%C3%A9lulas--4443530&matchtype=&pla-336893032686&gclid=Cj0KCQiAi9mPBhCJARIsAHchl1yklbhhUu7FLzov6rScqrhDC5FpVppMhkM4N_rBjEBjtHV4zQPppAaAstMEALw_wcB&gclidsrc=aw.ds](https://pt.rs-online.com/web/p/fotocelulas/4443530?cm_mmc=PT-PLA-DS3A--google--PLA_PT_PT_Automatizaci%C3%B3n_y_Control_de_Procesos_Whoop--(PT:Whoop!)+Fotoc%C3%A9lulas--4443530&matchtype=&pla-336893032686&gclid=Cj0KCQiAi9mPBhCJARIsAHchl1yklbhhUu7FLzov6rScqrhDC5FpVppMhkM4N_rBjEBjtHV4zQPppAaAstMEALw_wcB&gclidsrc=aw.ds).
18. OMRON. *CP1L*. 2021 [Acedido em: 30 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://industrial.omron.pt/pt/products/cp1l>.
19. WEG. *Kit para Automação*. 2021 [Acedido em: 30 de dezembro, 2021]; Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BZ/pt/Seguran%C3%A7a-de-M%C3%A1quinas-e-Sensores-Industriais/Seguran%C3%A7a-de-M%C3%A1quinas/Kits-para-Automa%C3%A7%C3%A3o/Kit-para-Automa%C3%A7%C3%A3o/p/MKT_WDC_GLOBAL_SAFETY_LINE_AUTOMATION_KITS.
23. IAPMEI. *Marcação CE MÁQUINAS*. 2020 [Acedido em: 22 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://www.iapmei.pt/Paginas/Maquinas-Marcacao-CE.aspx>.
30. Velling, A. *Design for X (DFX) Methods*. 2021 [Acedido em: 27 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://fractory.com/design-for-x-dfx/>.
32. Manufacturing, E.W. *What is Design for Manufacturing or DFM?* 2022 [Acedido em: 04.07.2022]; Disponível em: <https://news.ewmfg.com/blog/manufacturing/dfm-design-for-manufacturing>.
33. STORE, L.T. *45/90 graus 120mm carpintaria painel posicionamento régua instalação fixação braçadeira carpintaria régua ferramenta de medição*. 2021 [Acedido em: 27 de dezembro, 2021]; Disponível em: https://pt.aliexpress.com/item/1005003217820802.html?src=google&src=google&albch=shopping&acnt=708-803-3821&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Google_7_shopping&albagn=888888&isSmbAutoCall=false&needSmbHouyi=false&albcpr=9437679086&albag=97536833404&trgt=296904914040&crea=pt1005003217820802&netw=u&device=c&albp=296904914040&albpd=pt1005003217820802&gclid=Cj0KCQiA5aWOBhDMARisAIXLlkXcdG3ZD9wEhJfDIUt3H_pwUN3QYoALHbT2PNh5srCXFJFkP8LJ5oaAiDcEALw_wcB&gclidsrc=aw.ds&aff_fcid=9c67068e23ab4f89b1957e7873f8d799-1640629593409-02041-UnaMJZVf&aff_fsk=UnaMJZVf&aff_platform=aaf&sk=UnaMJZVf&aff_trace_key=9c67068e23ab4f89b1957e7873f8d799-1640629593409-02041-UnaMJZVf&terminal_id=7aca230b0a794ad7b41323585fd4b775.
44. Wikipédia. *Joseph-Ignace Guillotin*. 2021 [Acedido em: 29 de dezembro, 2021]; Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Joseph-Ignace_Guillotin.

45. AGEFOTOSTOCK. *Stock Photo - Guillotine, 1956*. 2021 [Acedido em: 29 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://www.agefotostock.com/age/en/details-photo/guillotine-1956-the-guillotine-is-named-after-dr-joseph-ignace-guillotin-a-national-assembly-member-who-headed-the-committee-charged-with-finding-a-new-means/HEZ-2361713>.
47. Lanema, P. *Corte por Jato de Água*. 2020 [Acedido em: 30 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://www.polylanema.pt/pt/corte-por-jato-de-agua/>.
48. LGV. *Informações sobre o corte com jato de água*. 2010 [Acedido em: 30 de dezembro, 2021]; Disponível em: <http://www.cortejatoagua.com.br/>.
51. LIGA, A. *Oxicorte*. 2020 [Acedido em: 30 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://www.acoliga.com/oxicorte-2>.
52. INFOSOLDA. *Oxicorte: Estudo da Transferência de Calor e Modelamento por Redes Neurais Artificiais de Variáveis do Processo*. 2013 [Acedido em: 30 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://infosolda.com.br/artigos/processos-de-corte/328-oxicorte-estudo-da-transferencia-de-calor-e-modelamento-por-redes-neurais-artificiais-de-variaveis-do-processo>.
53. Megaplasma. *Como funciona o corte a plasma?* 2020 [Acedido em: 30 de dezembro, 2021]; Disponível em: <https://megaplasma.com.br/blog/como-funciona-o-corte-plasma/>.
54. CIMM, G. *Entenda o processo de corte de metais por plasma*. 2020 [Acedido em: 30 de dezembro, 2021]; Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/2896-entenda-o-processo-de-corte-de-metais-por-plasma.
55. TRUMPF. *As vantagens do corte a laser*. 2021 [Acedido em: 31 de dezembro, 2021]; Disponível em: https://www.trumpf.com/pt_PT/solucoes/aplicacoes/corte-a-laser/.
60. FERPINTA. *Aço laminado a quente*. 2020 [Acedido em: 30 de março, 2022]; Disponível em: <http://ferpinta.pt/index.php?cat=26>.
61. AÇOS, R. *Aços de construção ao carbono*. 2022 [Acedido em: 30 de março, 2022]; Disponível em: <https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construcao-ao-carbono/st-52.html>.
62. OVAKO. *Navegador de aços*. 2022 [Acedido em: 30 de maio, 2022]; Disponível em: <https://www.ovako.com/>.
64. IPQ. *Catálogo OnLine IPQ - Documentos normativos*. 2020 junho de 2020 [Acedido em: 01 de junho de 2022]; Disponível em: <https://catalogonormas.ipq.pt/catalogoipq/public/catalogoIPQ>.
71. ADIRA. *História da ADIRA*. 2020 [Acedido em: 30.06.2022]; Disponível em: <https://adira.pt/adira/#historia>.
72. BARBOFLEX. *Catálogos*. 2022 [Acedido em: 19 de julho de 2022]; Disponível em: <http://www.barboflex.pt/catalogos>.
73. PROTUBSA. *Hidráulica e pneumática - Tubos de precisão para fabrico de cilindros*. 2022 [Acedido em: 28 de março, 2022].
76. PARKER. *Bombas de palhetas industriais*. 2022 [Acedido em: 01 de agosto de 2022]; Disponível em: <https://ph.parker.com/pt/pt/industrial-vane-pump-series-t6-t67-t7>.

77. PARKER. *Acessórios hidráulicos DIN*. 2022 [Acedido em: 22 de setembro de 2022]; Disponível em: <https://ph.parker.com/pt/pt/hydraulic-din-fittings>.
78. JUSTLOG – AGENTES TRANSITÁRIOS, L. *Dimensões de Contentores*. 2021 [Acedido em: 16 de agosto de 2022]; Disponível em: <https://justlog.pt/tabela-de-contentores/>.

ANEXOS

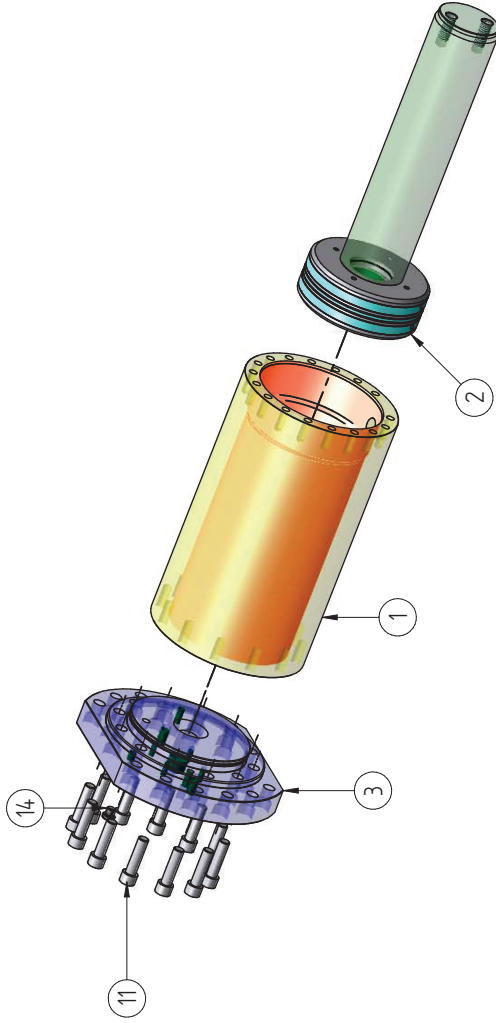
6.1 Anexo1

6.2 Anexo2

6 ANEXOS

6.1 Anexo1

De seguida, é apresentado o desenho de montagem do cilindro hidráulico esquerdo desenvolvido para aplicação na máquina desenvolvida, GV2030 versão 3.0.



Item Number	Título	Revisão	Quantity
1	CORPO DO CILINDRO	0	1
2	MONT PISTAO	0	1
3	TAMPA SUPERIOR CILINDRO	A	1
4	TAMPA INFERIOR CILINDRO	0	1
5	CALÇO	0	1
6	CINTA EMBOLO	A	2
7	VO ORING D184x3	A	1
8	VO ORING D184x5.7	A	1
9	VO RASPADOR	A	1
10	VO EMBOLO	A	1
11	PSICC PARAF. DIN912-12.9 M16x60		12
12	PSICC PARAF. DIN912-12.9 M8x65	A	4
13	PSICC PARAF. DIN912-12.9 M14x40	A	17
14	VSTI G1/4	B	1

NM1-0201-00-0458.dff

reirae

0	VERSÃO 0	Nº ARTIGO 1234 ABC	MONT CILINDRO D190 HYD CYLINDER	SIMILAR A	FOLHAS 22
	REVIZÃO	1234 ABC		SIMILAR TO	SHEET

6.2 Anexo2

Neste anexo é apresentado o desenho de fabrico do conjunto soldado do corpo da estrutura referente ao modelo de máquina desenvolvida, GV2030 v3.0.

