

Desenvolvimento de um sistema de troca automática do nozzle de corte para máquinas de corte por laser

Trabalho realizado na ADIRA S.A.

João Miguel Araújo Tinoco

Relatório de Projecto Final – MIEM

Orientadores:

FEUP: Engenheiro Joaquim Oliveira Fonseca

ADIRA: Engenheiro José Figueira



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro – 2011

Resumo

O presente relatório incide sobre o desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, que se destina a equipar os Centros de Corte Laser da ADIRA S.A. O desenvolvimento deste produto surgiu da necessidade crescente em diminuir os tempos de “setup” dos centros de corte e, por conseguinte, melhorar os rendimentos de trabalho. Actualmente, a troca de nozzle é uma operação manual que exige a entrada de um operador no interior da máquina e, conseqüentemente, a desactivação desta, pelo que o objectivo passa por desenvolver um sistema automatizado que aperte/desaperte o nozzle da cabeça de forma rápida e eficaz, por forma a diminuir o efeito desta operação sobre os tempos de “setup”.

Para resolver este problema modelaram-se duas soluções distintas. A primeira consiste num prato giratório, cujo princípio de funcionamento é semelhante ao de um sistema de troca automática de ferramenta das máquinas CNC. Este prato tem 24 orifícios, divididos por duas pistas concêntricas, onde estão armazenados os nozzles e os respectivos suportes. A rotação do prato permite o transporte do nozzle pretendido para uma zona de “Stand By” (estática), onde estão colocados dois motores de passo (um para cada pista) que transmitem a rotação ao suporte e, por conseguinte, permitem o aperto/desaperto do nozzle na cabeça. Esta solução acabou por ser abandonada ainda numa fase embrionária, pois obrigava à criação de um sistema complicado de engate entre o motor e o suporte e, ainda, à utilização de uma motorização bastante precisa para fazer rodar o prato (prato divisor).

Para resolver os dois problemas anteriores modelou-se uma nova solução, a que se deu o nome de gaveta. Este protótipo apresenta os sistemas de aperto/desaperto sempre estáticos e em contacto constante com o motor, através de uma cadeia de engrenagens de dentado recto. Como a operação de troca preconiza um elevado controlo de binário, procurou-se determinar as perdas de rendimento existentes na cadeia e, por conseguinte, calcular a diferença de binário verificada entre o primeiro e o último sistema de aperto. O resultado deste estudo conduziu à subdivisão da cadeia inicial em 3 mais pequenas, com motorização individual, tendo-se assim minimizado as perdas para um valor de apenas 10%.

Com os dois protótipos modelados decidiu-se que a segunda solução era mais simples e eficaz, pelo que em seguida se iniciou a sua implementação no centro de corte. Esta fase obrigou ao desenvolvimento de uma blindagem, de um suporte e à definição de um sistema de accionamento capaz de transportar a gaveta para o interior da área de corte, accionamento este que vai ser efectuado por um cilindro pneumático de duplo efeito.

No final efectuou-se uma análise económica às duas soluções, tendo-se concluído que a gaveta é cerca de 3 vezes mais cara que o prato, no entanto, este resultado é virtual pois a utilização do prato divisor equalizaria os custos de ambas as soluções.

Abstract

Development of an automatic nozzle changer for laser cutting machines

This report focuses on the development of an automatic cutting nozzle changer, which is intended to equip the Laser Cutting Centers of ADIRA S.A. The development of this product resulted from the increasing need to reduce the setup times of the cutting centers and, therefore, improve the efficiency of work. Currently the nozzle exchange is a manual operation that requires the entry of an operator inside the machine and, thus, its deactivation, so the goal is to develop an automated system to tighten/loosen quickly and efficiently the nozzle to the cutting head and, thus, decrease the effect of this operation on setup times.

In order to solve this problem were shaped two distinct solutions. The first one consists on a rotating plate, whose operating principle is identical to that of an automatic tool changer of the CNC machines. This dish has 24 holes, divided into two concentric tracks, which are intended to store the nozzles and their respective supports. The rotation of the dish allows the transport of the desired nozzle into a “Stand By” position, where are placed two stepper motors (one for each track) which transmit the rotation to the nozzle holder and therefore allow the tightening/loosening of the nozzle in the cutting head. This solution was eventually abandoned at an early stage of its development, because it required the creation of a complicated coupling system between the motor shaft and the nozzle holder and the use of a very accurate motor to rotate the dish (splitter plate).

To solve both of these problems it was modeled a new solution, which was called drawer. This prototype has the tightening/loosening systems always in the same position and in constant contact with the motor, through a chain of straight toothed gears. As the exchange operation calls for a high torque control, sought to determine the income losses in the chain and, therefore, calculate the torque difference between the first and the last tightening/loosening system. The results of this study led to the subdivision of the starting chain in three smaller ones, individually powered, which minimized the losses to only 10%.

With the two prototypes completely modeled, it was decided that the second one was more simple and effective having then began its implementation into the cutting center. This phase led to the development of a shield, a support and to the definition of a drive system capable of carrying the cassette into the cutting area, which will be accomplished by a double acting pneumatic cylinder.

At the end, it was made an economic analysis to both solutions, having concluded that the cassette is approximately 3 times more expensive than the rotating plate. However, this result is not accurate because the utilization of the rotating plate in the first solution would equalize the costs.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à ADIRA S.A e a todo o pessoal da secção de engenharia e de montagem pelo apoio prestado durante a execução deste trabalho.

Gostaria de agradecer em particular aos meus orientadores, Engenheiro José Figueira e Engenheiro Joaquim Fonseca, por todo o apoio, envolvimento e sugestões comigo partilhadas, que contribuíram em muito para o meu desenvolvimento profissional e conduziram a importantes melhorias no trabalho.

Gostaria de agradecer ao Emmanuel Plocke e em especial ao Pedro Ribeiro, por toda a ajuda dada ao longo do semestre e pela forma fantástica como me integraram na empresa.

Gostaria de agradecer ao Sr. José Meneses e ao Sr. Abílio Cunha pela ajuda dada na determinação dos custos de produção das duas soluções.

Gostaria de agradecer a todos os amigos e familiares que me acompanharam, apoiaram e ajudaram ao longo do curso.

Agradeço à Carina por todo o apoio que me deu nos últimos anos, e por ter estado sempre ao meu lado, mesmo nos momentos mais complicados.

Índice de conteúdos

1	Capítulo I – Introdução.....	1
1.1	Estrutura do relatório	1
1.2	Apresentação da ADIRA S.A.	1
1.3	Objectivos e motivações do projecto	3
1.4	Trabalho realizado na empresa	5
2	Capítulo II - Tecnologia de corte por laser.....	7
2.1	Origens da tecnologia	7
2.2	Funcionamento.....	9
2.2.1	Princípios físicos	9
2.2.2	Modos de operação	10
2.2.3	Tipos de laser.....	11
2.3	Máquinas de corte por laser	20
2.3.1	Estruturas Utilizadas.....	21
2.3.2	Automatização de tarefas.....	25
3	Capítulo III – Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte	26
3.1	Introdução	26
3.2	Análise de soluções existentes e respectivas patentes	28
3.2.1	Sistemas da concorrência.....	28
3.2.2	Análise de patentes	36
3.3	Especificações do projecto.....	38
3.4	Soluções modeladas	41
3.4.1	Prato rotativo	42
3.4.2	Gaveta.....	60
3.5	Implementação da gaveta no centro de corte.....	107
3.5.1	Definição do guiamento do sistema.....	107
3.5.2	Modelação do suporte.....	110
3.5.3	Definição de accionamentos.....	111
3.5.4	Modelação da blindagem.....	115
3.5.5	Implementação no centro de corte.....	116
4	Capítulo IV – Análise de custos às soluções modeladas.....	120

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte para máquinas de corte por laser

4.1	Custos de matérias-primas	120
4.2	Custos de fabrico	122
4.3	Custo de componentes de compra.....	124
4.4	Conclusão.....	126
5	Capítulo V – Conclusão e perspectivas de trabalhos futuros	128
	Bibliografia.....	131
	Anexos.....	133
	Anexo A - Especificações e curva de funcionamento dos motores utilizados na 1ª solução	133
	Anexo B – Catálogos das rodas de dentado recto.....	134
	Anexo C - Propriedades do Poliacetal (Delrin)	136
	Anexo D – Curva para determinação da tensão de flexão do dentado	136
	Anexo E - Características do cilindro pneumático	137
	Anexo F – Desenhos de conjunto elaborados	138

Índice de figuras

Figura 1.1) Instalações da ADIRA na Rua de Bessa Leite.....	1
Figura 1.2) Quinadora hidráulica ascendente QH-6025, de inícios dos anos 60.....	2
Figura 1.3) Centro de corte laser CCL 3015, associado a um sistema de carga, descarga e armazenamento de chapa.	2
Figura 1.4) Quinadora do tipo QIHF, associada a um Sheet-Feeder e a um robot de manuseamento de chapa. Esta unidade dispensa operadores, pois é totalmente automática.....	3
Figura 1.5) Cabeça de corte Precitec utilizada pela ADIRA no seu centro de corte laser.	
Figura 1.6) Representação do nozzle e do seu suporte em cerâmica.	4
Figura 2.1) Gerador Laser de estado sólido (rubí), idêntico ao inventado por Mainman.	7
Figura 2.2) Aplicações do laser na actualidade. À esquerda está representado o tratamento de hipersensibilidade dentária e à direita o corte de chapa por laser.....	8
Figura 2.3) Distribuição das receitas a nível mundial no ano de 2009, provenientes da utilização da tecnologia laser.....	8
Figura 2.4) Constituição de um laser. 1 - Meio activo ou ganho médio; 2 – Fonte de bombeamento; 3 – Espelho reflector; 4 – Espelho semitransparente; 5 – Feixe laser;	9
Figura 2.5) Representação simplificada de um átomo. Aqui os electrões quando recebem energia saltam para órbitas superiores e, ao regressarem ao estado fundamental, libertam um fóton.	9
Figura 2.6) Exemplo de cavidade opticamente instável utilizada pelo fabricante Rofin Sinar [6].	13
Figura 2.7) Representação esquemática de um gerador opticamente estável.....	13
Figura 2.8) Representação esquemática de um gerador laser de corrente contínua da PRC. [7].....	14
Figura 2.9) Representação esquemática de um laser do tipo Slab. [6].....	15
Figura 2.10) Representação esquemática de um laser formado por um varão de Nd:YAG. No caso desta figura, o varão é bombeado por uma lâmpada do tipo “flash”.	16
Figura 2.11) Representação de um laser de disco de Yb:YAG, da Rofin Sinar. [6].....	17
Figura 2.12) Configuração de uma fibra de dupla camada utilizada em lasers de fibra.	18
Figura 2.13) O gerador de Nd:YAG, à esquerda, apresenta dimensões muito superiores às do gerador de fibra, à direita na figura, tendo ainda de ser associado a um “chiller”. [6]	18
Figura 2.14) Princípio de funcionamento de um laser de díodos. [9]	19
Figura 2.15) Laser de díodos da Rofin Sinar.....	20
Figura 2.16) Estrutura de uma máquina de sistema óptico fixo da El En.	21
Figura 2.17) Máquina híbrida da Durma. A mesa desloca-se na direcção descrita pela seta vermelha, ao passo que a cabeça se move na perpendicular como exemplificado pela seta laranja.	22
Figura 2.18) Estrutura de uma máquina com cabeça de corte móvel da TRUMPF.	22
Figura 2.19) Cabeça de corte do modelo Sincrono da Prima. Neste modelo a cabeça move-se num eixo adicional em relação ao pórtico, atingindo acelerações de 6 G.	23

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte para máquinas de corte por laser

Figura 2.20) Esquema representativo do tipo de operações efectuadas por cada eixo. A laranja, estão representados os eixos locais da cabeça e, a azul, os eixos de movimento do pórtico.....	23
Figura 2.21) Máquina do tipo consola da Prima Industrie.	24
Figura 2.22) Movimento rotativo de uma cabeça de corte tridimensional.....	24
Figura 2.23) Máquina combinada da TRUMPF. Modelo TruMatic 3000, que combina punção e corte por laser.....	25
Figura 2.24) Alguns sistemas de automatização de tarefas utilizados em centros de corte laser. À esquerda está representado o sistema de troca automática de nozzle da TRUMPF e à direita, um sistema Lift-Adiramic Tower para carga, descarga e armazenamento de chapa.....	25
Figura 3.1) Fases de desenvolvimento de um produto. Este esquema é iterativo pelo que qualquer problema detectado numa das fases obriga a retornar à etapa anterior, ou em casos mais extremos ao início da cadeia.	27
Figura 3.2) Posicionamento da gaveta de troca em relação à mesa de corte e aproximação da cabeça ao nozzle pretendido.....	28
Figura 3.3) Início da operação de aperto no novo nozzle na cabeça. Note-se que o suporte do nozzle está ligeiramente mais abaixo que os restantes, o que indica a existência de um elemento elástico que o faça retornar à posição inicial.	29
Figura 3.4) Final da operação de troca de nozzle. Nesta fase a gaveta já transladou para a posição de repouso, a mesa retornou à posição de trabalho e a cabeça prepara-se para iniciar o corte. O tempo total da operação foi de 24 segundos.....	29
Figura 3.5) Início da operação de troca de nozzle. Nesta fase a cabeça está a limpar o nozzle.....	30
Figura 3.6) A cabeça de corte desloca-se para o sistema de troca, que já transladou para a posição correcta.	30
Figura 3.7) O prisma rodou de modo a posicionar o nozzle pretendido em posição. Em seguida a cabeça avançou verticalmente em relação ao nozzle e procedeu ao seu engate.	31
Figura 3.8) Sistema de troca Opt I-Pod da Mazak. À esquerda é possível verificar que a gaveta está agarrada à mesa de trabalho. À direita mostra-se os 3 nozzles suplentes existentes no interior da gaveta.	32
Figura 3.9) Torreta para troca de nozzle e cabeça de corte da Mazak. Na imagem da esquerda mostram-se as cabeças de corte suplentes e na direita é possível ver o sistema de troca de nozzle com 10 unidades.	32
Figura 3.10) Sistema de troca de nozzle incorporado na torreta. O suporte dos nozzles tem capacidade para 10 unidades e tem um sistema de trancamento, que só liberta os nozzles quando estes estão correctamente encaixados na cabeça.	33
Figura 3.11) Escova rotativa de limpeza do sistema OptI-Pod.	33
Figura 3.12) Gaveta de troca de nozzle desenvolvida pela Mitsubishi. Nesta fase a tampa que cobre os nozzles está fechada.....	34
Figura 3.13) A tampa que cobre os nozzles abriu e a cabeça posiciona-se directamente acima do nozzle pretendido.	35

Índice de figuras

Figura 3.14) Os suportes dos nozzles movimentam-se na vertical de maneira a encostar o nozzle à cabeça. Em seguida todos os suportes começam a girar e a operação de aperto/desaperto começa.....	35
Figura 3.15) Final da operação de limpeza, troca e ajuste do ponto focal que demorou cerca de 60 segundos.	36
Figura 3.16) Sistema de troca de nozzle patenteado pela TRUMPF.....	37
Figura 3.17) Sistema de troca de nozzle patenteado pela Bystronic	38
Figura 3.18) Centro de corte por laser LF 3015 da ADIRA. O sistema de troca de nozzle destina-se a equipar um centro de corte deste tipo.	38
Figura 3.19) Zona destinada a acolher o sistema de troca de nozzle, que terá de ficar posicionado entre a porta de entrada e a mesa móvel.....	39
Figura 3.20) Representação da cabeça de corte da Precitec e do nozzle e respectivo suporte cerâmico.....	40
Figura 3.21) Representação da zona de “Stand By” onde é efectuada a troca de nozzle. Esta zona contém dois motores que são responsáveis pelo aperto/desaperto dos nozzles da cabeça, estando cada um associado a uma das pistas do prato giratório.	42
Figura 3.22) Geometria do prato rotativo. Como é possível verificar este prato armazena 24 nozzles.	43
Figura 3.23) Modelo 3D do sistema de prato giratório com um corte no plano central. Este corte permite evidenciar os 23 componentes individuais do sistema.....	44
Figura 3.24) Desenho 3D da abraçadeira que se destina a prender o veio motor a veio estriado	44
Figura 3.25) Primeira fase da operação de troca de nozzle.	45
Figura 3.26) Contacto entre a cabeça e o nozzle armazenado no prato rotativo.	46
Figura 3.27) Compressão da mola que se encontra no interior do prato por acção do deslocamento da cabeça. Esta compressão tem por objectivo permitir o contacto entre as patelas 5 e 7.	46
Figura 3.28) Cursos conferidos às molas de compressão, para se efectuar a operação de aperto.	47
Figura 3.29) Cursos conferidos às molas de compressão, para se efectuar a operação de desaperto.....	48
Figura 3.30) Ambos os elementos apresentam estrias escariadas nos topos, de maneira a permitir o engate.....	49
Figura 3.31) Engate do veio estriado no cubo.	49
Figura 3.32) Rasgo circular e orifícios para engate dos posicionadores de bola na patela do veio do Porta-nozzle.....	50
Figura 3.33) Sistema de aperto de patelas com posicionadores de bola.....	50
Figura 3.34) Espaçamento vertical disponível para a colocação das molas de compressão.	52
Figura 3.35) Esquema das forças de ligação entre o Porta-nozzle e o nozzle.....	55
Figura 3.36) Esquema representativo da montagem do prato rotativo.....	57
Figura 3.37) Pormenor de prisão do rolamento e esquema representativo da montagem da placa inferior.	57
Figura 3.38) Esquema representativo da montagem dos sistemas de aperto.	58

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte para máquinas de corte por laser

Figura 3.39) Conjugação das 3 submontagens com vista a obter a montagem final do sistema	58
Figura 3.40) Representação da dimensão transversal e longitudinal do sistema e do curso de accionamento necessário.	59
Figura 3.41) Representação da cinemática do sistema de gaveta. Esta figura evidencia o posicionamento estático das rodas de acoplamento ao Porta-nozzle e ainda a cadeia de transmissão desenvolvida por forma a fazer chegar a cada Porta-nozzle a rotação do motor.....	61
Figura 3.42) Curso de accionamento necessário para fazer entrar a gaveta na área de corte.	62
Figura 3.43) Sistema de gaveta desenvolvido na sua configuração final.	62
Figura 3.44) Subdivisão da matriz principal 3x6 em 3 matrizes mais pequenas 3x2.....	63
Figura 3.45) Vista em corte do plano transversal da gaveta.....	64
Figura 3.46) Vista em corte do sistema de aperto.	64
Figura 3.47) Vista em corte do plano longitudinal da gaveta.....	65
Figura 3.48) Translação da gaveta para o interior da área de corte.....	66
Figura 3.49) Alinhamento do eixo da cabeça de corte com o do nozzle pretendido.....	66
Figura 3.50) Compressão da mola que rodeia o veio e o cubo estriado por acção do avanço vertical da cabeça.	67
Figura 3.51) Compressão recomendada para se iniciar a operação de desaperto do nozzle.....	68
Figura 3.52) Sistema de aperto desenvolvido para a solução da gaveta.....	69
Figura 3.53) Cadeia cinemática com motor central e capacidade para 24 nozzles	71
Figura 3.54) Demonstração da cadeia de transmissão mais longa do sistema.	73
Figura 3.55) Valor do momento de fricção para o rolamento escolhido.	75
Figura 3.56) Cadeia cinemática com motor lateral e capacidade para 18 nozzles.	76
Figura 3.57) Demonstração da cadeia de transmissão mais longa do sistema.	79
Figura 3.58) Valor do momento de fricção para o rolamento escolhido.	80
Figura 3.59) Cadeia cinemática com motor central e capacidade para 18 nozzles.	81
Figura 3.60) Demonstração da cadeia de transmissão mais longa do sistema.	84
Figura 3.61) Valor do momento de fricção para o rolamento escolhido.	85
Figura 3.62) Cadeia cinemática com motor central e capacidade para 24 nozzles.	86
Figura 3.63) Demonstração da cadeia de transmissão mais longa do sistema.	89
Figura 3.64) Valor do momento de fricção para o rolamento escolhido.	90
Figura 3.65) Esquema para o cálculo das reacções nos apoios do veio estriado.....	94
Figura 3.66) Inserção dos parâmetros no “software” para efectuar a estimativa da vida útil do rolamento.....	96
Figura 3.67) Estimativa da vida útil fornecida pelo “software” da Inafag.	96
Figura 3.68) Espaçamento vertical disponível para a colocação da mola de compressão.	97
Figura 3.69) Características do motor de passo da FESTO.....	100
Figura 3.70) Curva de funcionamento do motor de passo escolhido.	100
Figura 3.71) Esquema das forças de ligação entre o Porta-nozzle e o nozzle.....	101
Figura 3.72) Montagem do sistema de aperto na placa superior.	102

Índice de figuras

Figura 3.73) Montagem dos inversores e das rodas dentadas de cada Porta-nozzle....	103
Figura 3.74) Aperto da placa inferior na superior.	103
Figura 3.75) Colocação dos rolamentos e das tampas na placa inferior.....	104
Figura 3.76) Pré-montagem do motor.	104
Figura 3.77) Montagem da unidade motora na placa inferior.	105
Figura 3.78) Cadeia cinemática escolhida para a gaveta.	105
Figura 3.79) Atravancamentos do sistema.	106
Figura 3.80) Réguas de alumínio modeladas como objectivo de fazer a ligação entre a gaveta e as guias.	108
Figura 3.81) Forças e respectivos braços responsáveis pelo momento aplicado sobre os patins de esferas no eixo dos YY.....	109
Figura 3.82) Momentos flectores máximos admitidos pelo patim escolhido.....	109
Figura 3.83) Zona de apoio do suporte.....	110
Figura 3.84) Constituintes do suporte.....	110
Figura 3.85) Variação teórica da velocidade com o tempo, num cilindro pneumático.	111
Figura 3.86) Colocação dos parâmetros de funcionamento requeridos no “software” da Festo.	112
Figura 3.87) Resultados obtidos para a pressão de 6 bar.....	113
Figura 3.88) Colocação dos parâmetros de funcionamento requeridos no “software” da Festo.	113
Figura 3.89) Resultados fornecidos para a pressão de 3 Bar.....	114
Figura 3.90) Avental para ligação da gaveta ao cilindro pneumático.	114
Figura 3.91) Demonstração do batente de chapa e do avental.	115
Figura 3.92) Demonstração dos constituintes da blindagem.	115
Figura 3.93) Aspecto final da blindagem modelada.....	116
Figura 3.94) Posição dos 8 furos roscados necessários para prender o suporte e a blindagem.	116
Figura 3.95) Sequência de montagem no interior do Centro de corte.	117
Figura 3.96) Aspecto final do sistema de troca de nozzle desenvolvido.....	117
Figura 3.97) Folgas existentes entre a gaveta e a posição máxima da cabeça de corte.	118
Figura 3.98) Início da operação de troca de nozzle.	118
Figura 3.99) Fim da operação de troca de nozzle.....	119

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte para máquinas de corte por laser

Índice de Tabelas

Tabela 1) Características do sistema de troca automática de nozzle da TRUMPF.	29
Tabela 2) Características do sistema de troca automática de nozzle da Bystronic.....	31
Tabela 3) Características do sistema de troca de nozzle OptI-Pod da Amada.	33
Tabela 4) Características da torreta para troca de nozzle e cabeça de corte da Amada.	34
Tabela 5) Características do sistema de troca de nozzle da Mitsubishi.....	36
Tabela 6) Especificações para o sistema de troca de nozzle	41
Tabela 7) Características das molas de compressão escolhidas.	52
Tabela 8) Limites de funcionamento linear para cada mola.....	53
Tabela 9) Forças máximas exercidas pelas molas quando são comprimidas com vista a efectuar o aperto do nozzle.....	53
Tabela 10) Forças mínimas exercidas pelas molas quando são comprimidas com vista a efectuar o desaperto do nozzle.....	53
Tabela 11) Força axial exercida pelos componentes suportados pelo veio do motor e pela mola de compressão, para um deslocamento máximo de 10 mm.....	54
Tabela 12) Parâmetros necessários para o dimensionamento da ligação por atrito	56
Tabela 13) Características das rodas dentadas escolhidas.....	71
Tabela 14) Características do rolamento escolhido. [32]	74
Tabela 15) Características das rodas dentadas escolhidas.....	77
Tabela 16) Características do rolamento escolhido. [32]	79
Tabela 17) Características das rodas dentadas escolhidas.....	82
Tabela 18) Características do rolamento escolhido. [32]	84
Tabela 19) Características das rodas dentadas escolhidas.....	87
Tabela 20) Características do rolamento escolhido. [32]	89
Tabela 21) Relação entre a Tensão de corte admissível e o diâmetro mínimo do veio para os diferentes materiais.	93
Tabela 22) Características da mola de compressão escolhida.	97
Tabela 23) Limites de funcionamento linear da mola.	98
Tabela 24) Força máxima exercida pela mola quando é comprimida com vista a efectuar o aperto do nozzle.....	98
Tabela 25) Força mínima exercida pela mola quando é comprimida com vista a efectuar o desaperto do nozzle	98
Tabela 26) Parâmetros necessários para o dimensionamento da ligação por atrito.	101
Tabela 27) Custos de matérias-primas para o prato rotativo.	121
Tabela 28) Custos de matérias-primas para a gaveta.	121
Tabela 29) Custos de matérias-primas para o suporte.....	121
Tabela 30) Custos de fabrico para o suporte	123
Tabela 31) Custos de fabrico para o prato rotativo	123
Tabela 32) Custos de fabrico para a gaveta.....	124
Tabela 33) Custos de componentes da compra para o prato rotativo.....	125
Tabela 34) Custos de componentes da compra para a gaveta	125
Tabela 35) Custos de componentes da compra para o suporte.....	126

**Desenvolvimento de um sistema de troca de nozzle de corte para máquinas de
corte por laser**

Tabela 36) Custos totais de cada solução	126
--	-----

1 Capítulo I – Introdução

1.1 Estrutura do relatório

Este relatório está dividido em 5 capítulos. No primeiro faz-se uma breve apresentação da ADIRA S.A., aborda-se o objectivo e as principais motivações deste projecto e descreve-se um pouco do trabalho efectuado na empresa.

O segundo capítulo destina-se a abordar a história e os fundamentos da tecnologia de corte por laser, os tipos de máquinas de corte existentes e respectiva constituição e ainda os sistemas de automação associados.

No terceiro capítulo efectua-se uma abordagem muito genérica ao desenvolvimento de produto, analisam-se os sistemas da concorrência e respectivas patentes e definem-se as especificações gerais do produto. Em seguida são apresentadas as duas soluções modeladas para o problema e todos os cálculos elaborados, com vista ao correcto dimensionamento de ambas as soluções. No final efectua-se a implementação do sistema escolhido no centro de corte.

No quarto capítulo efectua-se a uma análise aos custos dos componentes de compra e de fabrico de ambas as soluções.

O último capítulo destina-se a expor as conclusões retiradas do trabalho e a abordar as perspectivas de trabalhos futuros.

1.2 Apresentação da ADIRA S.A.

O presente trabalho foi realizado nas instalações da ADIRA S.A., empresa que se dedica à concepção, fabrico e comércio de máquinas ferramenta para corte e quinagem de chapa. Produz guilhotinas, quinadoras, centros de corte por laser (sobre os quais vai incidir este relatório) e sistemas automáticos de carga, descarga e armazenamento de chapa.

As suas instalações situam-se na Rua António Bessa Leite no Porto e ocupam aproximadamente 10000 m², distribuídos por 2 pavilhões. O pavilhão que se encontra do lado esquerdo, na figura 1.1, é ocupado pela administração, serviços financeiros e pela montagem e fabrico (de algumas peças) dos centros de corte por laser. O pavilhão que se encontra do lado direito na mesma figura é ocupado pelos gabinetes técnico e comercial, e ainda pelas linhas de montagem das guilhotinas e quinadoras. A ADIRA S.A. não é uma empresa isolada mas sim um grupo empresarial, composto pela ADIRA, pela GUIFIL (adquirida em 1999), pela NORMÁQUINA e OXISOL (que se ocupa de toda a construção soldada), contando nas suas fileiras com cerca de 200 colaboradores. [1]



Figura 1.1) Instalações da ADIRA na Rua de Bessa Leite.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

A ADIRA foi fundada em 1956 por António Dias Ramos, e dedicou-se inicialmente à fabricação e melhoramento de máquinas-ferramenta existentes no mercado. Com a chegada da década de 60, a empresa lançou-se definitivamente no mercado da conformação de chapa, tendo fabricado a sua primeira guilhotina (accionamento mecânico) em 1961. Em 1964, ao criar a quinadora ascendente tipo QH, tornou-se a primeira empresa nacional a fabricar máquinas-ferramenta com accionamento hidráulico. Em 1968 iniciou a fabricação das primeiras guilhotinas hidráulicas de ângulo variável (GHV), e em 1969, das primeiras quinadoras descendentes com sincronismo electro-hidráulico (QIH). [1]



Figura 1.2) Quinadora hidráulica ascendente QH-6025, de inícios dos anos 60.

No decorrer dos anos 70 a ADIRA voltou a inovar a nível nacional, ao fabricar a primeira quinadora hidráulica com sincronismo eléctrico e comando numérico, comando esse que foi desenvolvido em parceria com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Durante os anos 80 a empresa desenvolveu e instalou nas suas quinadoras multi-eixo comandos numéricos gráficos DNC a 2 e 3 dimensões, e fabricou o primeiro centro de corte baseado na alimentação frontal de guilhotinas, com sistemas de manuseamento de chapa integrados e empilhamento posterior das tiras cortadas. [1]

Nos anos 90 a ADIRA tornou-se a primeira empresa europeia a ser certificada ISO 9000, e o primeiro fabricante mundial a ter a certificação CE em toda a sua gama de produtos. Tudo isto, aliado ao desenvolvimento de novas quinadoras extremamente flexíveis com sistemas modulares multi-eixos e troca rápida de ferramentas, ajudou a cimentar a sua posição a nível mundial.



Figura 1.3) Centro de corte laser CCL 3015, associado a um sistema de carga, descarga e armazenamento de chapa.

Capítulo I - Introdução

Com a chegada do novo milénio chegaram também novos desafios a que a empresa não virou costas. Desenvolveu e produziu o seu primeiro centro de corte por laser (C.C.L), visível na figura 1.3, desenvolveu sistemas de armazenamento e manuseamento de chapa tais como o Lift-Adiramatic Tower (figura 1.3) e mais recentemente passou a



Figura 1.4) Quinadora do tipo QIHF, associada a um Sheet-Feeder e a um robot de manuseamento de chapa. Esta unidade dispensa operadores, pois é totalmente automática.

disponibilizar aos seus clientes a possibilidade de associar às quinadoras unidades robotizadas, criando assim células de quinagem (figura 1.4) totalmente automáticas que dispensam operadores. Ao longo de 54 anos a ADIRA têm pautado a sua actividade empresarial pela inovação permanente, o que lhe conferiu a liderança no mercado português e a consolidação da sua posição no mercado mundial, exportando cerca de 86 % da sua produção.

Encontra-se representada em cerca de 50 países e na sua carteira de clientes contam-se empresas de renome, tais como a Boeing, NASA, Bombardier, OGMA, Efacec, Lockheed, Alfa-Laval, U.S. Navy, Metalgalva, Siemens, Motorola, Thyssen, TAP, Air France, Galucho, entre outras. [1]

1.3 Objectivos e motivações do projecto

O objectivo deste projecto passa por desenvolver um sistema totalmente automatizado que efectue a troca do nozzle de corte de um centro de corte por laser.

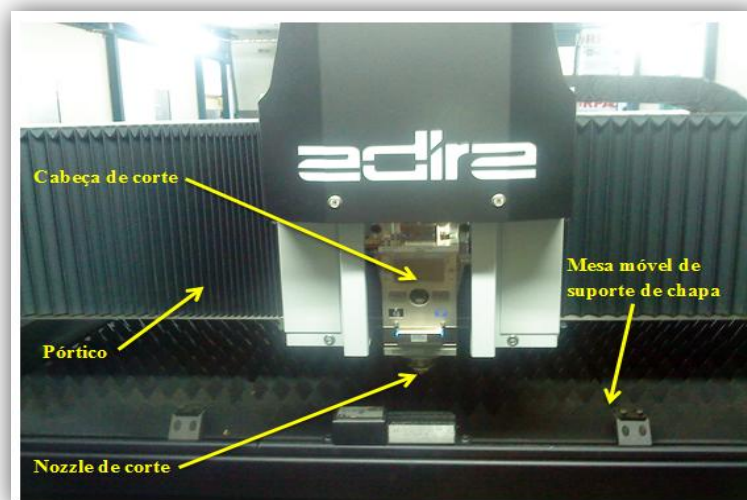


Figura 1.5) Cabeça de corte Precitec utilizada pela ADIRA no seu centro de corte laser.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Actualmente todos os fabricantes procuram diminuir os tempos de produção e de setup das suas máquinas, de modo a tornarem as suas empresas mais competitivas. No caso do corte por laser, os tempos de produção e de setup são influenciados respectivamente pela carga e descarga de chapa para a mesa de corte e pela troca e centragem do nozzle de corte. É com o intuito de diminuir os tempos de setup que surgiu este projecto, sendo o principal objectivo a criação de um sistema viável que efectue o aperto/desaperto do nozzle da cabeça de corte de forma automatizada, evitando assim paragens demoradas da produção durante esta operação.

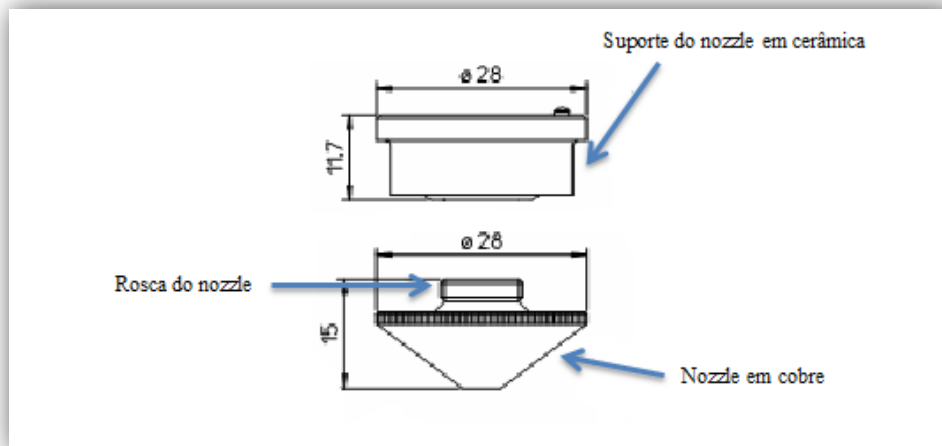


Figura 1.6) Representação do nozzle e do seu suporte em cerâmica.

Este projecto não representa uma inovação da ADIRA, mas sim uma resposta aos seus principais concorrentes como a TRUMPF, a Bystronic ou a Mazak que já disponibilizam soluções deste tipo. O desenvolvimento deste sistema obriga a ter alguma atenção aos custos, pois apesar de o preço final não influenciar de forma significativa o custo de um centro de corte laser, é imperativo que seja o menor possível dado ser um opcional proposto aos clientes.

O componente que se pretende trocar é uma peça cónica em cobre, denominada nozzle de corte, que contém um furo na face inferior por onde passam o feixe laser e o gás de assistência ao corte. Consoante a espessura e o material da chapa que se pretende cortar, é necessário variar o caudal do gás de assistência e a espessura do feixe laser. Desta forma, existem vários tipos de nozzles com dimensões exteriores equivalentes, mas com diâmetros de furo de saída diferentes, de modo a cobrir uma gama alargada de materiais e espessuras.

Os sistemas de troca de nozzle existentes dependem todos do tipo de cabeça de corte utilizada pelo fabricante. Algumas cabeças permitem o acoplamento do nozzle por engate, sendo que outras como no caso da ADIRA, exigem que este seja roscado numa peça de cerâmica. Este acoplamento por rosca obriga ao desenvolvimento de um sistema capaz de fornecer rotação e avanço a cada um dos componentes de armazenamento do nozzle. Além disto, o facto de o suporte de nozzle ser em cerâmica, que é um material bastante frágil, obriga a cuidados redobrados no que toca ao alinhamento e ao binário de rotação fornecido, sob pena de danificação dos filetes da rosca. Um dos pontos críticos deste projecto tem a ver com o posicionamento do

Capítulo I - Introdução

sistema no interior do centro de corte. O espaço não é abundante pelo que se requer um sistema compacto que permita, em caso de necessidade, a entrada de um operador na máquina.

Desta forma, o sistema idealizado é uma pequena gaveta que entra e sai da área de corte sempre que necessário, cujos sistemas de armazenamento de nozzle giram por acção de rodas dentadas acopladas a um motor, e que têm uma mola que lhes confere avanço para o aperto do nozzle na cabeça. A gaveta vai ficar colocada do lado direito da área de trabalho, imediatamente encostada à mesa móvel de suporte de chapa, de modo a ocupar o menor espaço possível.

Todo este sistema vai ser desenhado com vista a facilitar ao máximo a sua montagem e a diminuição de problemas de fiabilidade, para que possa ser industrializado sem muitos problemas. Além disto, como já foi referido, vai ser dada atenção ao custo de compra e fabricação de cada componente, com vista a fornecer uma solução competitiva e benéfica para a empresa.

1.4 Trabalho realizado na empresa

A elaboração deste projecto obrigou a uma fase inicial de ambientação para com as metodologias e ferramentas informáticas disponíveis na ADIRA. O primeiro mês na empresa destinou-se fundamentalmente a compreender o funcionamento do programa de modelação 3D e da base de dados interna.

Paralelamente desenvolveu-se um estudo detalhado acerca de centros de corte laser, em especial sobre a sua cabeça de corte, analisaram-se os sistemas de troca de nozzle da concorrência, mais concretamente da TRUMPF, Bystronic, Mazak e Mitsubishi, e foi efectuada uma pesquisa de patentes com o intuito de prevenir problemas futuros de homologação com os outros fabricantes. A análise cuidada das soluções dos concorrentes revelou-se muito importante, pois permitiu perceber com clareza o que era pretendido e forneceu indicações que ajudaram a modelar mentalmente algumas soluções possíveis.

Numa segunda fase do projecto, juntamente com o Engenheiro Figueira, definiram-se as linhas gerais a seguir e deu-se início à modelação de duas soluções para o sistema de troca de nozzle, usando para esse efeito o programa de desenho tridimensional Solid Edge. Durante este período de modelação, o trabalho constante com o Solid Edge permitiu consolidar alguns conhecimentos na área do desenho industrial. Paralelamente ao desenho do sistema foram elaborados cálculos estruturais com vista ao correcto dimensionamento da solução. Esta fase de desenho e cálculo estendeu-se durante uma grande parte da estadia na empresa.

Com o sistema de troca de nozzle completamente desenhado e calculado, iniciou-se a fase de implementação no centro de corte, que preconizou a modelação de um suporte para a gaveta e ainda a definição do tipo de accionamento com que esta deve ser equipada, para entrar e sair da área de corte. Esta fase de implementação obrigou a uma análise cuidada do centro de corte, nomeadamente às suas restrições espaciais interiores.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

No final, consultou-se o Sr. José Meneses e o Sr. Abílio Cunha com vista a determinar os custos estimados de produção dos sistemas modelados, e procurou-se determinar os custos de todos os componentes de compra utilizados.

2 Capítulo II - Tecnologia de corte por laser

2.1 Origens da tecnologia

LASER, ou **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**, é um mecanismo de emissão de radiação, normalmente visível, que resulta do processo de emissão estimulada. A radiação electromagnética produzida por um dispositivo LASER caracteriza-se por três características fundamentais: [2]

- **Monocromática**, pois possui um comprimento de onda muito bem definido;
- **Coerente**, pois todos os fotões que compõem o feixe estão em fase;
- **Colimada**, pois as ondas que compõem o feixe são praticamente todas paralelas;

Em termos históricos, para se falar sobre esta tecnologia é necessário recorrer ao início do século XVIII, pois foi aqui que se começou a estudar seriamente o fenómeno da Luz. Em 1704 Newton definiu a luz como sendo uma corrente de partículas, e um século mais tarde a descoberta da polaridade e a experiência de interferência de Young levaram a que se estabelecesse a teoria ondulatória da luz. Algum tempo depois, Maxwell desenvolveu a teoria electromagnética, explicando que a luz provinha de vibrações rápidas de um campo electromagnético resultante de partículas carregadas. A teoria de Maxwell parecia excelente, mas caiu por terra no início do século XX devido ao aparecimento do fenómeno da radiação do **Corpo Negro** (corpo com energia infinita). O fenómeno do Corpo Negro só conseguiu ser explicado por Max Planck através da teoria quântica. Em 1905 Einstein postulou que a luz é formada por pacotes discretos e bem determinados de energia, denominados de **Quantas**, tendo-se mais tarde definido que o **Quanta** da luz é o fotão. De forma mais simples, a luz é formada por partículas individuais denominadas de fotões, e cada fotão carrega em si uma quantidade discreta de energia.

As bases na qual está apoiada a tecnologia do LASER foram definidas em 1917 por Einstein, quando este, apoiando-se em coeficientes probabilísticos para a absorção, emissão espontânea e emissão estimulada de radiação, derivou as equações da radiação de Planck. Aqui, Einstein descobriu que quando se verificasse uma inversão de população entre o nível superior

e o inferior de energia, era possível realizar radiação estimulada amplificada, vulgo LASER. Em 1928 Rudolf Ladenburg confirmou o fenómeno de radiação estimulada e de absorção negativa e em 1947, Willis Lamb e R. C. Retherford, efectivaram a demonstração da existência de radiação estimulada, quando descobriram emissão estimulada no espectro do hidrogénio. [2]

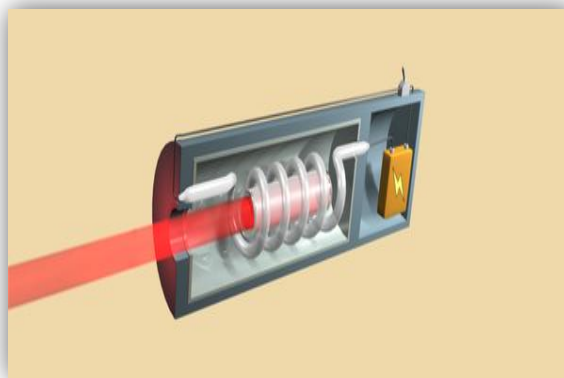


Figura 2.1) Gerador Laser de estado sólido (rubí), idêntico ao inventado por Mainman.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Finalmente, no dia 16 de Maio de 1960, Theodore Maiman apresentou ao mundo o primeiro sistema LASER. Este dispositivo era um gerador de estado sólido, mais propriamente de rubi, que produzia um feixe de cor encarnada e que só operava de forma pulsada. [2]

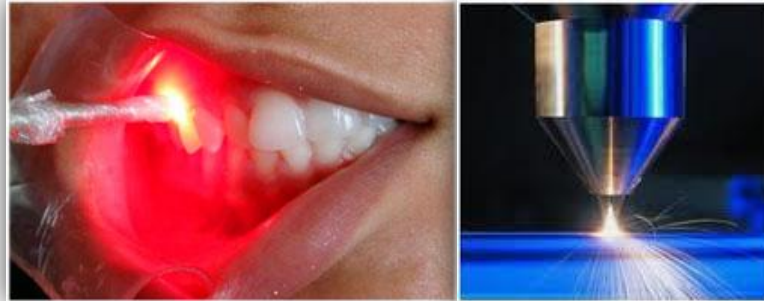


Figura 2.2) Aplicações do laser na actualidade. À esquerda está representado o tratamento de hipersensibilidade dentária e à direita o corte de chapa por laser.

Desde que Maiman apresentou o seu dispositivo, esta tecnologia tem vindo a evoluir constantemente, encontrando-se hoje no mercado não só lasers de estado sólido como também de estado gasoso e estado líquido. Os lasers são utilizados num vasto leque de aplicações tais como na indústria metalo-mecânica (corte, soldadura), medicina (tratamentos oculares, remoção de pedra nos rins, ortodontia), entretenimento (shows com iluminação laser), estética (tratamentos de pele), indústria de armamento (marcação de alvos, guiamento de mísseis), entre outras.

Segundo dados do ano de 2009, indicados na figura 2.3, as aplicações com a tecnologia laser forneceram receitas de 5.32 mil milhões de dólares, sendo que 55,2 % desse valor foi gerado pelo sector das comunicações e do armazenamento óptico. O sector do processamento dos materiais contribuiu com 25,7 % dessa fatia. [3]

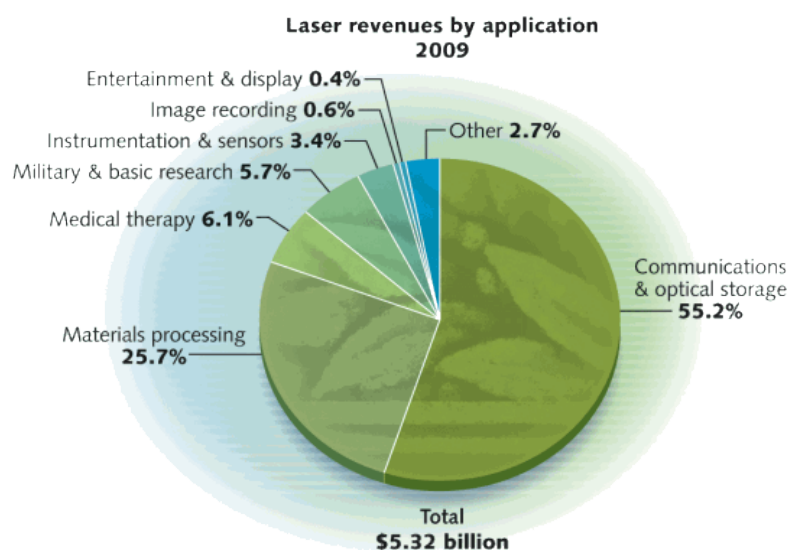


Figura 2.3) Distribuição das receitas a nível mundial no ano de 2009, provenientes da utilização da tecnologia laser.

2.2 Funcionamento

2.2.1 Princípios físicos

Um Laser é composto por 3 componentes fundamentais:

- **Meio activo / ganho médio** que pode ser sólido, líquido ou gasoso; [2]
- **Fonte de bombeamento** que pode ser uma descarga eléctrica, uma descarga luminosa ou uma emissão laser; [2]
- **Cavidade ressonante** composta por 2 espelhos (um deles semitransparente no caso de se pretender um gerador opticamente estável) e perfeitamente alinhada; [2]

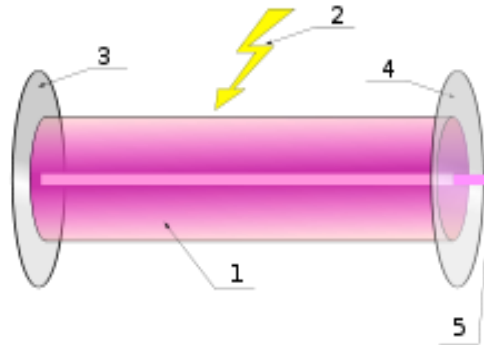


Figura 2.4) Constituição de um laser. 1 - Meio activo ou ganho médio; 2 - Fonte de bombeamento; 3 - Espelho reflector; 4 - Espelho semitransparente; 5 - Feixe laser;

Para se entender como estes três componentes formam um laser é necessário entender primeiro a física subatômica. Um átomo é constituído pelo núcleo, onde habitam prótons e neutrões, e por uma nuvem electrónica onde estão dispostos os electrões. Não é possível saber com exactidão onde está um electrão num determinado momento, mas pode-se prever a sua trajectória e a distância a que se encontra do núcleo. Sempre que se fornece energia a um átomo, os electrões mais distantes movem-se para novas posições, pelo que se imaginarmos que estes se dispõem em órbitas circulares (apesar de não ser o mais correcto), isto corresponde à passagem para uma órbita superior e, por conseguinte, com maior energia. Quando chega a esse estado de maior energia, o electrão quer voltar para o estado fundamental, e é nessa inversão que são libertados os fotões, isto é, a energia absorvida pelo electrão é descarregada sobre a forma de um fotão.

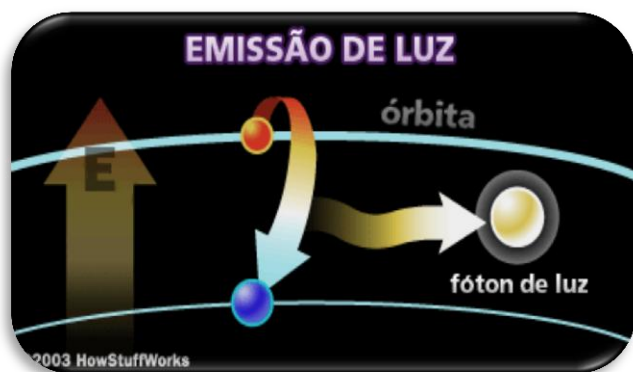


Figura 2.5) Representação simplificada de um átomo. Aqui os electrões quando recebem energia saltam para órbitas superiores e, ao regressarem ao estado fundamental, libertam um fóton.

Agora que já se explicou a física subatômica é mais fácil entender como se conjugam os três constituintes apresentados acima para formar um laser. A fonte de bombeamento

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

insere energia no meio activo que é composto por electrões, que ao receberem essa energia se excitam e por conseguinte saltam para órbitas mais elevadas. Para se formar um feixe laser estável, a energia fornecida ao sistema tem de ser suficiente para que cada átomo esteja dois ou três níveis energéticos acima do seu estado fundamental, sendo que isto promove o aumento do fenómeno de inversão de população (relação entre os átomos que se encontram num nível de energia superior e os que se encontram no estado fundamental). Assim que a fonte de bombeamento para de inserir energia, os electrões excitados começam a regressar ao estado fundamental e libertam energia sobre a forma de fotões, cujo comprimento de onda depende da energia de excitação. Quanto maior o grau de inversão de população maior é o número de fotões libertados e, por conseguinte, maior a estabilidade do laser. Quando um fóton libertado se encontra com um electrão que está num estado de energia idêntico forma-se um novo fóton, ocorrendo assim a emissão estimulada.

A cavidade ressonante é composta por dois espelhos, cuja função é fazer circular os fotões e promover assim a emissão estimulada. Um dos espelhos é semitransparente, o que significa que reflecte uma parte da luz e deixa passar a outra, sendo que a parte que passa se denomina radiação laser.

2.2.2 Modos de operação

Os laser podem funcionar segundo dois modos de operação:

- **Modo de onda contínua;**
- **Modo pulsado;**

No **modo de onda contínua** o output do laser é praticamente constante em relação ao tempo, sendo que a inversão de população necessária para manter o sistema a funcionar é obtida através da utilização de uma fonte de bombeamento constante.

No **modo pulsado** o output do laser varia em relação ao tempo, isto é, pode haver geração de laser num momento e em seguida este ser desligado, tipo on / off. Este modo de operação é utilizado quando se pretende concentrar uma grande quantidade de energia num intervalo de tempo extremamente curto, como por exemplo, quando se corta uma chapa de aço e se pretende que o material na zona de corte sublime (passe do estado sólido ao estado gasoso). O modo pulsado pode ser obtido aplicando-se qualquer uma das três técnicas seguintes:

- **Q-Switching** – Consiste em equipar a cavidade ressonante com um atenuador eléctrico (Q-Switch), que impede a formação do feixe enquanto a inversão de população aumenta. Quando se atinge o nível de energia desejado, o Q-Switch é ajustado para condições favoráveis e forma-se o feixe de luz. Esta técnica permite a obtenção de pulsos de luz com picos de potência elevadíssimos e duração temporal elevada, tendo no entanto a desvantagem de necessitar de muito tempo para atingir cada um desses picos.
- **Modelocking** – Consiste em induzir uma relação de fase fixa entre os modos da cavidade ressonante, para que o laser esteja bloqueado em fase ou modo. Quando os modos interferem um com o outro formam pulsos de luz encadeados de

Capítulo II – Tecnologia de corte por laser

duração extremamente curta (décima parte do pico-segundo), sendo cada pulso separado pelo tempo que demora a completar um ciclo (viagem entre os espelhos) dentro da cavidade ressonante. Devido ao facto de os pulsos de luz serem tão curtos, o feixe laser é composto por uma grande variedade de comprimentos de onda, o que obriga o ganho médio a ter capacidade para amplificar todos os diferentes comprimentos. Este tipo de laser consegue fornecer potências muito elevadas e é utilizado normalmente em pesquisa de processos físicos ou químicos extremamente rápidos.

➤ **Pulsed pumping** – Consiste em introduzir energia no ganho médio do laser através de uma fonte de bombeamento já ela pulsada. Consegue-se através da ligação de grandes condensadores à fonte de bombeamento, que quando requeridos libertam a energia armazenada para a fonte de bombeamento e, por conseguinte, para o ganho médio. Este modo de operação é utilizado em sistemas laser que deformam de tal maneira a cavidade ressonante durante a formação do feixe, que necessitam de parar durante curtos períodos de tempo, como por exemplo os lasers de excímeros.

2.2.3 Tipos de laser

Actualmente existem diversos tipos de laser no mercado, sendo que a opção por um determinado tipo depende única e simplesmente da aplicação final. A classificação de um laser provém do material que constitui o seu meio activo, existindo três grandes grupos: lasers de estado sólido, lasers de estado gasoso e lasers de estado líquido.

No mercado é possível encontrar os seguintes tipos de laser:

- **Lasers Gasosos** em que o ganho médio é composto por gases tais como: CO₂, He-Ne, Ar, Kr, excímeros, entre outros;
- **Lasers Químicos** onde o feixe é obtido através de reacção química de elementos como o fluoreto de hidrogénio ou o fluoreto de deutério;
- **Lasers de Corantes** onde se usam corantes como a rodamina 6G;
- **Lasers de Metal-Vapor** em que o ganho médio é composto por um metal e um gás como por exemplo o Hélio-Cádmio ou Hélio-Mercúrio, entre outros;
- **Lasers Sólidos** em que o ganho médio pode ser um rubi, safira-titânio, um varão de Nd:YAG, um disco de Yb:YAG, entre outros;
- **Lasers compostos por Semicondutores**, tais como os lasers de díodos;
- **Lasers formados por Electrões livres**;
- **Lasers de gás dinâmico**;

No que toca à indústria de processamento de material, os lasers utilizados são todos de elevada potência e tem vindo a ser alvo de evoluções significativas ao longo dos anos. Como será possível verificar a seguir, no processamento de materiais utilizam-se em maior escala os lasers de tipo sólido e gasoso, tais como:

1. Lasers Gasosos:

- **Lasers de CO₂ bombeados por descarga eléctrica**;
- **Lasers de excímeros**;

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

2. Lasers Sólidos:

- **Lasers de Nd:YAG do tipo varão**, bombeados por lasers de díodos ou lâmpadas;
- **Lasers de Yb:YAG do tipo disco**, bombeados por lasers de díodos;
- **Lasers de fibras**;
- **Lasers de díodos**, para aplicação em soldadura;

Os lasers de CO₂ são utilizados em maior escala pois conseguem fornecer potências e qualidade de feixe elevadas. No entanto, alguns fabricantes como a ADIRA já começam a enveredar pela opção dos lasers de fibra, que produzem feixes de alta potência a partir de fontes geradoras mais compactas, proporcionando assim a construção de máquinas mais pequenas. Em seguida vamos aprofundar um pouco os tipos de laser enumerados acima.

2.2.3.1 Lasers gasosos

Os lasers gasosos recebem esta designação pelo facto de o seu meio activo conter um gás, sendo divididos quanto ao tipo de gás lasante, que pode ser molecular, iónico ou de átomos neutros. O primeiro laser deste tipo era composto por uma mistura de Hélio-Néon pelo que se classificava como laser de átomos neutros. Foi criado em 1960 pelo físico iraniano Ali Javan e pelo americano William Bennet, produzindo um feixe de luz infravermelho com um comprimento de onda a rondar 1,15 micrómetros. O laser de Dióxido de Carbono (CO₂) é do tipo molecular, e foi inventado em 1964 nos laboratórios Bell por Kumar Patel, produzindo um feixe infravermelho com um comprimento de onda compreendido entre os 9,4 e os 10,6 micrómetros. Actualmente, os lasers gasosos com expressão na indústria são os de CO₂ e os de excímeros (com maior quota de mercado para os de CO₂), pelo que serão aprofundados em seguida.

➤ Laser de Dióxido de Carbono (CO₂)

O meio activo deste laser é composto por uma mistura de Dióxido de carbono, Hélio, e Azoto, combinados respectivamente nas proporções de 6, 10 e 84%. O CO₂ é responsável pela emissão da radiação, o He promove o arrefecimento da mistura e a inversão de população e o N₂ ajuda a excitar as moléculas de Dióxido de carbono. Este laser emite ondas com comprimento de cerca de 10,6 micrómetros e produz potências que podem ir desde alguns W até 25 KW, podendo-se em certos casos atingir picos de potência da ordem dos GW através da aplicação da técnica de Q-Switch. [4]

Este tipo de laser é caracterizado pelos seguintes parâmetros:

- **Caminho óptico interno;**
- **Modo de excitação;**
- **Tipo de arrefecimento;**

Capítulo II – Tecnologia de corte por laser

Quanto ao caminho óptico interno, este pode ser estável ou instável. Diz-se que o caminho é estável quando a cavidade ressonante é composta por um espelho parcialmente transparente, que permite a passagem do feixe para o exterior. Por outro lado, quando a cavidade é composta por espelhos que reflectem toda a radiação, o feixe tem de ser redireccionado para outra saída, pelo que o caminho óptico passa a designar-se de opticamente instável. Neste último caso, o feixe é redireccionado dentro da cavidade para uma saída composta por um espelho de diamante, que permite a passagem do feixe. A utilização de cavidades estáveis não é aconselhável no caso de se pretender um feixe muito condensado e de elevada potência, pois a carga térmica exercida no espelho semitransparente durante a transmissão, é de tal maneira elevada que pode distorcer a cavidade ressonante. Este problema não acontece nas cavidades instáveis, pois os espelhos não transmitem nada, além do que é extremamente fácil redireccionar o feixe para fora da cavidade, sendo que a única desvantagem se prende com o facto de esta cavidade necessitar de um alinhamento perfeito dos espelhos. [5]

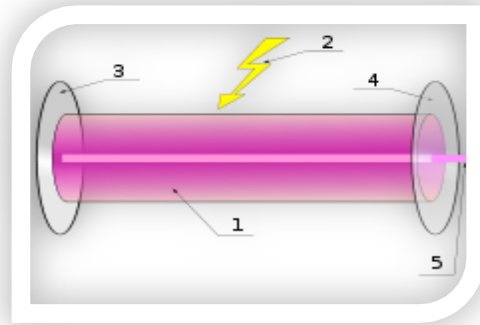


Figura 2.7) Representação esquemática de um gerador opticamente estável.

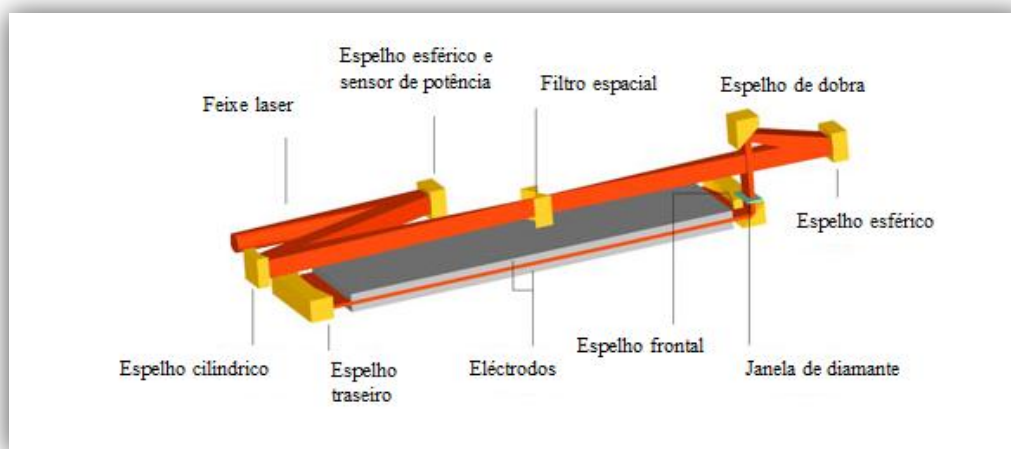


Figura 2.6) Exemplo de cavidade opticamente instável utilizada pelo fabricante Rofin Sinar [6].

Em termos de excitação, pode-se recorrer a geradores de corrente contínua ou à radiofrequência. Os geradores de corrente contínua são formados por 2 eléctrodos, que se encontram em contacto com o meio activo, e produzem uma descarga eléctrica que excita os electrões. Este tipo de gerador é bastante económico e de razoável eficiência, no entanto, obriga a manutenção frequente dos eléctrodos pois estes desgastam-se bastante quando as potências são superiores a 2 KW. Actualmente existem fabricantes de fontes laser, como a PRC, que ainda usam o sistema de corrente contínua, no entanto, cada vez mais se começa a optar pela excitação por radiofrequência, pois não é

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

necessário efectuar manutenção de eléctrodos e permite excitação em modo pulsado, que como já foi visto, oferece a possibilidade de atingir potências superiores.

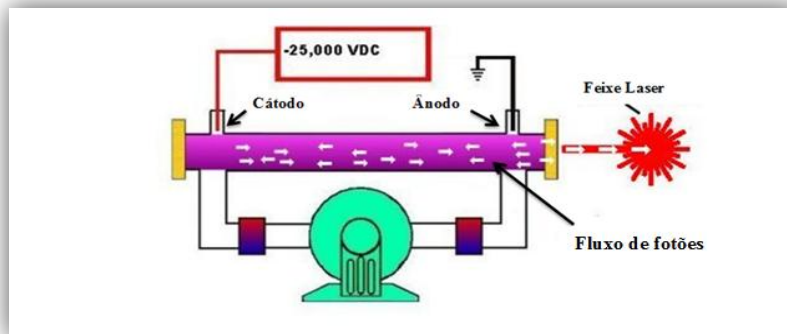


Figura 2.8) Representação esquemática de um gerador laser de corrente contínua da PRC. [7]

No que toca ao arrefecimento, os geradores laser podem ser de fluxo lento, fluxo axial rápido, fluxo transversal, e tipo Slab arrefecido por difusão. Nos geradores de fluxo lento o arrefecimento é efectuado por água, que ao percorrer as paredes da cavidade ressonante, promove a troca de calor com o exterior. Neste tipo de gerador, a velocidade do fluxo de fótons é conseguida através da imposição de uma pressão ao meio activo e as potências raramente excedem os 2 KW, porque o ganho é relativamente baixo (entre de 30 a 50 W/m). [2]

Os geradores de fluxo axial e transversal são arrefecidos por correntes de convecção, geradas pelo escoamento do gás que constitui o meio activo, no interior da cavidade ressonante. A diferença entre estes dois geradores é o facto de no de fluxo axial, o escoamento de gás ser paralelo ao eixo principal da cavidade (velocidades de escoamento compreendidas entre os 300 e os 500 m/s), enquanto no transversal é perpendicular. Os de fluxo transversal promovem um arrefecimento mais eficiente, pelo que são utilizados em unidades compactas de alta potência, no entanto, têm uma menor qualidade do feixe laser.

Por último existe o gerador do tipo Slab, que nasceu da necessidade em diminuir os consumos de gás lasante. Este gerador tem uma cavidade opticamente instável e é excitado por radiofrequência. A cavidade é estanque, pelo que não existe fluxo de gás, e o arrefecimento é feito através da passagem de água no interior dos eléctrodos. O gás lasante é substituído periodicamente, recorrendo a uma bomba de vácuo, sendo substituído em seguida por uma nova mistura de gás. O construtor Rofin Sinar produz geradores do tipo Slab com cavidade rectangular (Figura 2.9), que atingem potências máximas de 8 KW. O construtor TRUMPF também produz geradores deste tipo, mas limitados a potências de 2 KW e com cavidade cilíndrica.

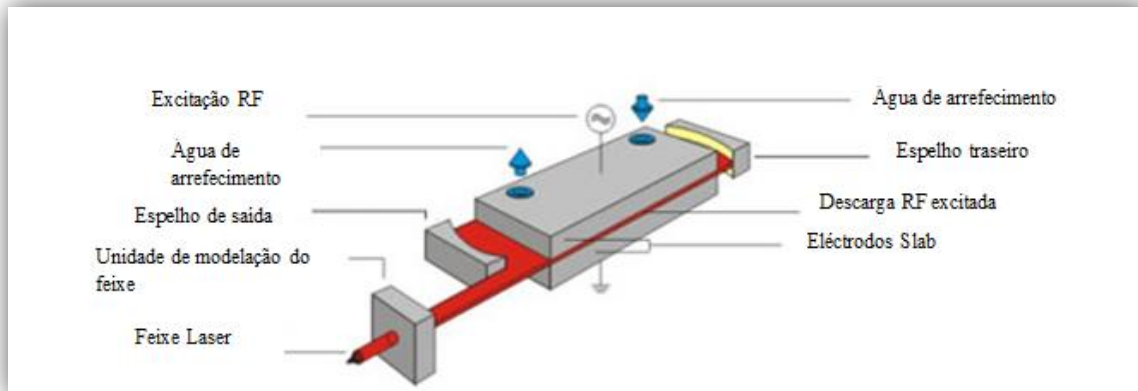


Figura 2.9) Representação esquemática de um laser do tipo Slab. [6]

➤ Laser de Excímeros

O laser de excímeros foi inventado em 1970 por Nikolai Basov, no Lebedev Physical Institute em Moscovo. [2] A palavra excímero quer dizer **excited dimer**, isto é, dímeros excitados que são moléculas diatómicas que só existem no estado excitado. O meio activo destes lasers é composto por gases raros, tais como o Kr, Xe, Ar, por um gás halogeneto e por hélio. Os gases nobres em condições normais não se associam a outros elementos, mas quando são excitados, por exemplo por descarga eléctrica ou feixe de electrões, os seus átomos ionizam-se. Estes iões quando se juntam a moléculas neutras, como o cloro ou o flúor, formam moléculas ionizadas que são os dímeros excitados, sendo que os dímeros mais típicos são o Fluoreto de Árgon, Fluoreto de Kriptón e o Fluoreto de Xénon. Esta ligação é muito forte e dura apenas nanossegundos, quebrando-se quando o gás nobre deixa de estar excitado. Quando se dá a quebra da ligação, os dímeros dissociam-se nas partículas fundamentais e libertam energia sobre a forma de fotões, cuja energia é maior quanto maior o comprimento de onda.

O laser de excímeros gera radiação ultravioleta com comprimentos de onda compreendidos entre 0,193 e 0,351 micrómetros, consoante o meio activo, e é capaz de gerar pulsos muito curtos e de elevada potência. Devido ao pequeno comprimento de onda, os fotões têm energia muito elevada e como tal os lasers de excímeros são capazes de remover material por processo fotoablativo, isto é, o material removido não muda de fase, diminuindo-se assim a zona termicamente afectada.

Estes lasers são extremamente precisos e fornecem resultados de elevada qualidade, pelo que são utilizados em microfuração, microlitografia, marcação de materiais termicamente sensíveis, micromaquinagem, tratamento de superfícies e em aplicações médicas tais como a cirurgia ocular. [5]

2.2.3.2 Lasers de estado sólido

Os lasers de estado sólido não usam gás como meio activo mas sim um material sólido cristalino. O material mais utilizado é o cristal YAG (Yttrium Aluminium Garnet) dopado com iões de Neodímio (Nd^{3+}) ou de Itérbio (Yb^{3+}), que constituem a espécie activa. Os lasers de YAG dopados com Neodímio são designados de **Nd:YAG**, e os dopados com Itérbio são chamados de **Yb:YAG**.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

➤ Lasers de Nd:YAG (Varão)

Estes lasers são constituídos por um varão de YAG dopado com íons de Neodímio (1%). O varão é montado numa cavidade óptica e é bombeado por lâmpadas de “flash”, ou mais recentemente, por lasers de díodos. A utilização de lasers de díodos para o bombeamento é mais eficiente, pois as lâmpadas emitem numa banda muito larga, grande parte da qual não pode ser utilizada no bombeamento, pelo que existe grande desperdício de energia. Já os lasers de díodos emitem numa banda mais curta, razão pela qual são mais eficientes, pois tudo o que emitem é aproveitado para o bombeamento. O varão tem tipicamente entre 2 a 8 mm de diâmetro e entre 20 a 200 mm de comprimento. [5]

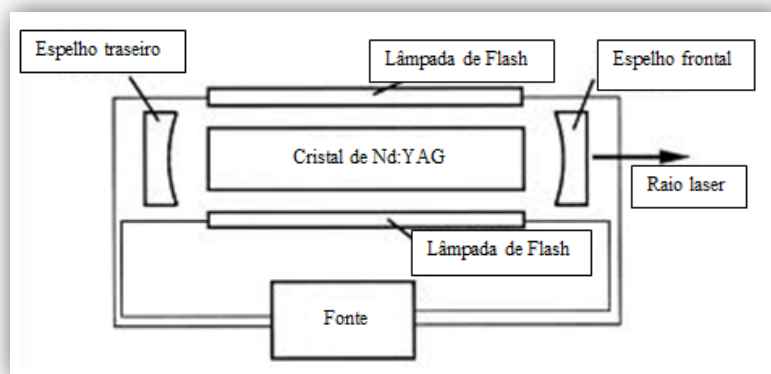


Figura 2.10) Representação esquemática de um laser formado por um varão de Nd:YAG. No caso desta figura, o varão é bombeado por uma lâmpada do tipo “flash”.

➤ Lasers de Yb:YAG (Disco)

Os lasers de disco apareceram como uma solução para os problemas típicos dos lasers de varão, nomeadamente o aquecimento e a qualidade de feixe. Os lasers de varão são arrefecidos por água, mas apenas pelo exterior, existindo assim um aquecimento excessivo no interior. Isto provoca grandes distorções térmicas e má qualidade de feixe, pois o gradiente térmico entre o interior e o exterior do varão é muito elevado. No caso dos discos, como são muito finos, a dissipação de calor é maior e o arrefecimento é mais eficiente. Os lasers de disco são bombeados por díodos, tal como os de varão, o que aumenta bastante o seu rendimento.

Nos lasers de disco o Neodímio é substituído pelo Itérbio, pois os íons deste último ocupam melhor os interstícios da malha de YAG, possibilitando assim um maior nível de dopagem. Por este motivo, é possível substituir um varão por um disco de dimensões menores, sendo que cada disco pode gerar até 750 W de potência. Na figura seguinte está esquematizado o princípio de funcionamento de um laser de disco. [6]

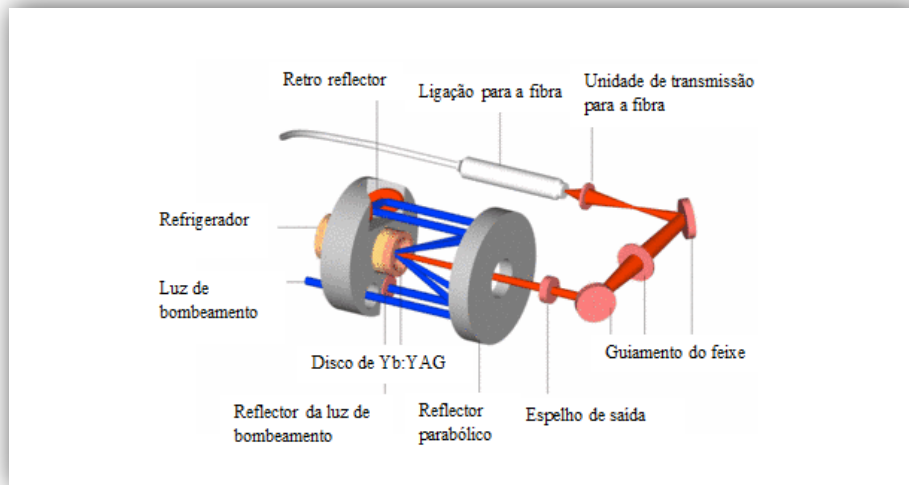


Figura 2.11) Representação de um laser de disco de Yb:YAG, da Rofin Sinar. [6]

➤ Lasers de fibra

Os lasers de fibra começam a ser muito utilizados na indústria de processamento de materiais, pois são mais compactos que os convencionais, altamente eficientes e apresentam bons parâmetros de feixe.

Estes lasers são fabricados à base de fibra óptica de dupla camada, constituída por sílica. A camada interior é dopada com íons de Itérbio (Yb^{3+}), Neodímio (Nd^{3+}), Érbio (Er^{3+}), Praseodímio (Pr^{3+}), ou Tálho (Tm^{3+}), de modo a amplificar o sinal emitido, e a camada exterior tem como função permitir a propagação da luz bombeada até que esta seja toda absorvida pelo núcleo central. Este núcleo funciona como uma cavidade ressonante, onde a luz bombeada provoca a inversão de população nos íons dopantes. Esta cavidade ressonante difere das cavidades convencionais, devido à não existência de espelhos mas sim de dois filtros, que provocam restrições ao comprimento de onda, permitindo assim estabilizar o comprimento de onda da energia fornecida, eliminar modos espectrais aberrantes e reduzir flutuações de intensidade do feixe laser. A camada externa da fibra é fabricada em vidro ou materiais poliméricos com índices de refração reduzidos, de modo a impedir a atenuação do sinal. Na figura seguinte está exemplificada uma fibra de dupla camada. [8]

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

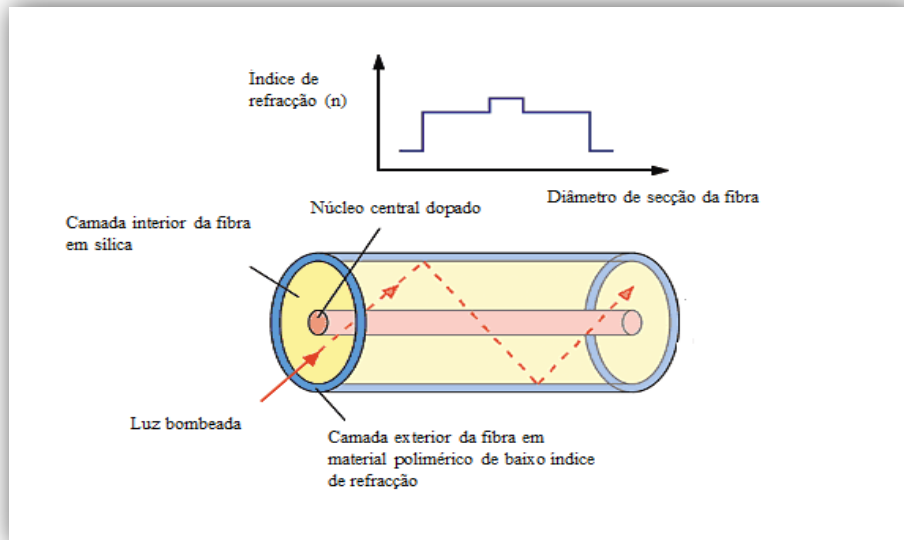


Figura 2.12) Configuração de uma fibra de dupla camada utilizada em lasers de fibra.

Os lasers de fibra são actualmente uma alternativa bastante viável e tentadora em relação aos lasers sólidos convencionais, nomeadamente no que toca ao espaço ocupado. Um gerador de fibra óptica de 4 KW ocupa 0,5 m² contra os 11 m² de um gerador sólido de Nd:YAG, bombeado por lâmpadas, além de não necessitar de um sistema autónomo de arrefecimento (“chiller”). São geradores estáveis, fáceis de integrar em qualquer unidade e requerem pouca manutenção, pois não é necessário trocar as lâmpadas ou os díodos de bombeamento. Apresentam altos rendimentos que se traduzem em menores custos operacionais e, devido à excelente qualidade de feixe, conseguem obter pontos focais menores do que outros tipos de geradores. Em termos de preços são geradores mais caros, do que por exemplo os abordados anteriormente, no entanto, devido às vantagens que apresentam em termos de rendimento, espaço e custos de manutenção são uma alternativa muito viável.



Figura 2.13) O gerador de Nd:YAG, à esquerda, apresenta dimensões muito superiores às do gerador de fibra, à direita na figura, tendo ainda de ser associado a um “chiller”. [6]

Capítulo II – Tecnologia de corte por laser

➤ Lasers de díodos

Os lasers de díodos são formados por materiais semicondutores e têm tamanhos reduzidos, o que faz com que sejam muito utilizados na indústria das comunicações, electrónica e informática. Devido ao facto de serem extremamente compactos, fáceis de integrar, simples para produzir em massa, potentes, eficientes e principalmente por serem muito utilizados como fonte de bombeamento para outros lasers, começam a aparecer cada vez em maior número em sistemas de processamento de materiais.

Como foi dito, os díodos são formados por materiais semicondutores, tipicamente através da combinação de elementos pertencentes ao grupo III e IV da tabela periódica. Devido a isto, os díodos mais frequentes são constituídos por ligas de GaAs, AlGaAs, InGaAs, InGaAsP, todas pertencentes aos grupos referidos.

O funcionamento deste gerador difere bastante do funcionamento típico dos lasers gasosos e sólidos que foram apresentados anteriormente, pois baseia-se no princípio da radiação de recombinação. Os materiais semicondutores são formados por uma banda de valência e uma banda de condução. No estado fundamental, a banda de valência encontra-se totalmente ocupada e a de condução livre, o que corresponde a um estado de energia E_g . À medida que a banda de valência é excitada, alguns electrões saltam para a banda de condução, sendo que os restantes que se encontram em zonas de maior energia da banda de valência se movem para as zonas com menor energia. Este processo define duas novas fronteiras, E_{fc} e E_{fv} , que se relacionam com E_g pela seguinte equação que traduz a condição crítica para a geração do laser: $E_{fc} - E_{fv} > E_g$. [9]

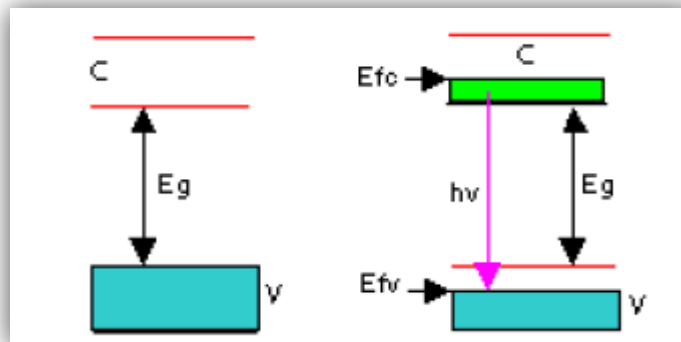


Figura 2.14) Princípio de funcionamento de um laser de díodos. [9]

Um gerador de díodos consegue obter potências da ordem dos mW utilizando uma área extremamente pequena de cerca de 1 X 1 micrómetro. Cada uma destas áreas pode ser combinada de modo a formar uma barra, que tipicamente apresenta um volume de 10000 X 1200 X 115 micrómetros. Estas barras vão compor a cavidade ressonante e são revestidas de forma a atingir as propriedades reflectoras desejadas. Quanto maior o número de barras existentes num gerador de díodos maior vai se a potência alcançada, pese embora a necessidade de estas terem de ser ligadas a um dissipador de calor. A junção de várias barras designa-se de pilha ou “stack”. Actualmente a Rofin Sinar produz geradores muito compactos com potências superiores a 3 KW, que resultam da junção de duas pilhas com potências acima de 1,5 KW cada.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

A grande desvantagem dos lasers de díodos está relacionada com o facto de só conseguirem focar a sua potência, em pontos focais de diâmetro substancialmente maior do que os geradores apresentados anteriormente. Devido a isto, torna-se complicado obter uma densidade de potência suficientemente elevada para cortar chapa, pelo que acabam por ser mais utilizados em soldadura.



Figura 2.15) Laser de díodos da Rofin Sinar.

2.3 Máquinas de corte por laser

As máquinas de corte por laser têm vindo a ser alvo de melhoramentos constantes desde que apareceram no mercado, nomeadamente no que toca às potências dos geradores e aos sistemas de movimentação e de automatização de tarefas, que hoje são cada vez mais frequentes.

As potências dos geradores evoluíram de tal forma, que hoje em dia é possível encontrar no mercado centros de corte por laser equipados com fontes de CO₂ de 6 KW, estando neste preciso momento a entrar-se em força na tecnologia da fibra óptica. No entanto, apesar dos geradores serem extremamente importantes no corte por laser, o que mais tem evoluído são os sistemas de movimentação linear que actualmente possibilitam acelerações compreendidas entre 2 e 3 G. Os primeiros centros de corte tinham cabeças de corte fixas, sendo o movimento da chapa efectuado pela mesa de trabalho. Pouco tempo depois foram criadas as máquinas híbridas, onde tanto a mesa como a cabeça se moviam em direcções perpendiculares. Hoje em dia, as máquinas mais eficientes são as de óptica móvel, cuja cabeça de corte se move sobre uma mesa fixa, possibilitando a obtenção de maiores acelerações. Actualmente já se encontram no mercado máquinas combinadas, que para além do corte, também permitem o punção de chapa, havendo inclusive construtores que oferecem duas cabeças de corte nos seus produtos.

Outro dos pontos em que a evolução destas máquinas tem sido notória prende-se com os sistemas de automação que são disponibilizados por cada fabricante. Actualmente existem centros de corte equipados com sistemas automáticos de posicionamento do ponto focal, troca automática de cabeça de corte, sistemas de monitorização em tempo real, regulação automática do ponto focal e troca e centragem automática do bico de corte. Existe fabricantes como a ADIRA ou a TRUMPF que oferecem sistemas automáticos de carga, descarga e movimentação de chapa, dispensando quase por completo a necessidade de operadores.

Capítulo II – Tecnologia de corte por laser

2.3.1 Estruturas Utilizadas

Os centros de corte por laser apresentam diversas configurações, no entanto a característica mais importante que os distingue é o facto de processarem peças a duas ou três dimensões, dependendo do número de eixos de movimento que possuem. O mais usual no mercado são as máquinas de processamento bidimensional, contudo existem indústrias como a construção naval, onde o processamento tridimensional é importante, pelo que alguns construtores já investem neste tipo de tecnologia.

2.3.1.1 Máquinas de processamento bidimensional

As máquinas de processamento bidimensional são classificadas quanto à existência ou não de movimento dos componentes ópticos.

As primeiras máquinas tinham a cabeça de corte fixa, sendo o movimento da chapa efectuado pela mesa. A grande desvantagem desta configuração assenta no facto de a mesa possuir massa bastante superior à cabeça, pelo que a velocidade de processamento se torna baixa. Estas máquinas são consideradas obsoletas e como tal fabricadas apenas por alguns construtores de menor dimensão.



Figura 2.16) Estrutura de uma máquina de sistema óptico fixo da El En.

A configuração de óptica fixa evoluiu para a configuração híbrida. As máquinas híbridas têm movimento na mesa e na cabeça, sendo a desta última perpendicular ao da primeira. Ainda existem muitos fabricantes a utilizar esta configuração, no entanto, quando se pretende cortar chapas de grande dimensão a dinâmica da máquina fica afectada, sendo difícil atingir velocidades muito elevadas. A figura 2.17 exemplifica uma máquina deste tipo.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser



Figura 2.17) Máquina híbrida da Durma. A mesa desloca-se na direcção descrita pela seta vermelha, ao passo que a cabeça se move na perpendicular como exemplificado pela seta laranja.

A evolução das duas configurações anteriores levou ao aparecimento das máquinas de óptica móvel, ou em Inglês, “Flying Optics”. Este tipo de configuração permite a obtenção de maiores velocidades de processamento e, ainda, o corte de chapa de maior dimensão. Como o elemento móvel é cabeça, cuja massa é menor que a da mesa, a dinâmica do sistema é bastante melhor permitindo assim maior aceleração e variação desta com o tempo (Jerk). Como já foi dito, é bastante natural uma estrutura de óptica móvel atingir 2 a 3 G de aceleração, sendo isso conseguido através da utilização de motores lineares nos eixos de movimento. Actualmente, os principais fabricantes mundiais utilizam motores lineares em todos os eixos, o que é uma opção cara mas que no entanto é compensada pelas elevadas velocidades de processamento, que permitem em pouco tempo recuperar o investimento. Na figura seguinte está representada uma máquina com cabeça de corte móvel, da TRUMPF.



Figura 2.18) Estrutura de uma máquina com cabeça de corte móvel da TRUMPF.

Existem outras possibilidades para melhorar o rendimento deste tipo de máquinas, como por exemplo, incorporar um ou dois eixos extra no pórtico, de modo a permitir o movimento relativo da cabeça de corte. Dado que o curso dos eixos adicionais é pequeno e a massa da cabeça reduzida, é possível atingir acelerações muito elevadas

Capítulo II – Tecnologia de corte por laser

que podem chegar até aos 6 G, como acontece no modelo Sincrono da Prima Industries. Estes eixos adicionais da cabeça são utilizados para operações pequenas, tais como furos, pequenas formas, pequenos contornos com muitas mudanças de direcção, entre outros. A figura seguinte mostra uma cabeça de corte deste tipo.



Figura 2.19) Cabeça de corte do modelo Sincrono da Prima. Neste modelo a cabeça move-se num eixo adicional em relação ao pórtico, atingindo acelerações de 6 G.

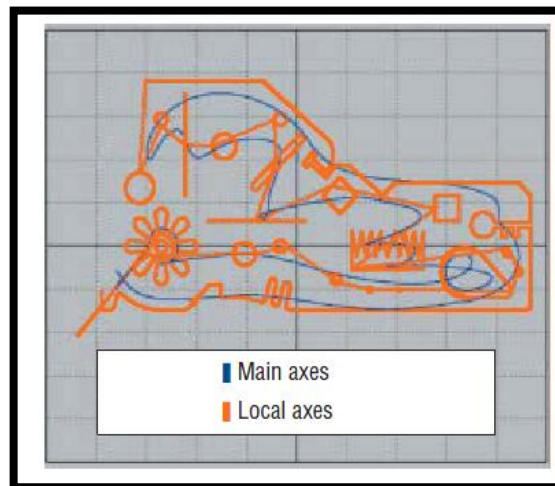


Figura 2.20) Esquema representativo do tipo de operações efectuadas por cada eixo. A laranja, estão representados os eixos locais da cabeça e, a azul, os eixos de movimento do pórtico.

2.3.1.2 Máquinas de processamento tridimensional

As máquinas de processamento tridimensional começam a entrar em cena no mercado, pois existem indústrias como a automóvel, a aeronáutica e a naval, que necessitam de máquinas com esta capacidade. Este tipo de equipamentos caracteriza-se por ter 5 ou mais eixos de movimento, que se traduzem na capacidade de rotação da cabeça tanto na

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

horizontal como na vertical. Normalmente, a sua estrutura é do tipo consola ou pórtico. Na figura seguinte está representada uma máquina do tipo consola.



Figura 2.21) Máquina do tipo consola da Prima Industrie.

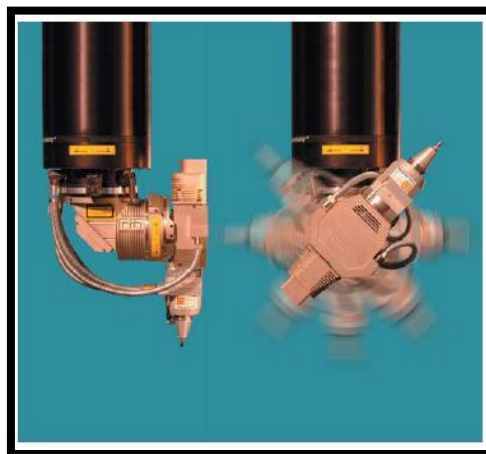


Figura 2.22) Movimento rotativo de uma cabeça de corte tridimensional.

2.3.1.3 Máquinas combinadas

As máquinas combinadas foram desenvolvidas para aplicações onde é necessária maior flexibilidade produtiva e diminuição de custos de logística e mão-de-obra. São máquinas que oferecem a possibilidade de combinação de várias tecnologias, tais como, o puncionamento, corte por laser, corte por guilhotina, furação, roscagem, entre outros. O seu preço é normalmente bastante elevado, pelo que a sua utilização só se justifica quando se fabricam peças que necessitem de várias operações até serem terminadas. Nestes casos, apesar do custo elevado da máquina, a poupança em termos de logística é elevada, justificando-se assim a aquisição desta tecnologia. A figura seguinte apresenta uma máquina combinada da TRUMPF que efectua puncionamento e corte por laser.



Figura 2.23) Máquina combinada da TRUMPF. Modelo TruMatic 3000, que combina puncionamento e corte por laser.

2.3.2 Automatização de tarefas

Como já foi referido, existem máquinas laser equipadas com diversos dispositivos de automatização de tarefas, tais como a carga, descarga e manuseamento de chapa, a troca e centragem de bico de corte, entre outros. Estes dispositivos são muito importantes, pois permitem a laboração quase contínua da máquina. Numa máquina sem qualquer auxílio na carga e descarga da chapa, estima-se que o tempo de produção seja de apenas 50%. Isto quer dizer que metade do tempo de produção se destina a esperar pela entrada e saída de material da mesa de trabalho. Para combater este problema foram desenvolvidos sistemas de troca de mesa e de carga, descarga e manuseamento de chapa, que permitem a obtenção de tempos úteis de funcionamento a rondar os 90%.

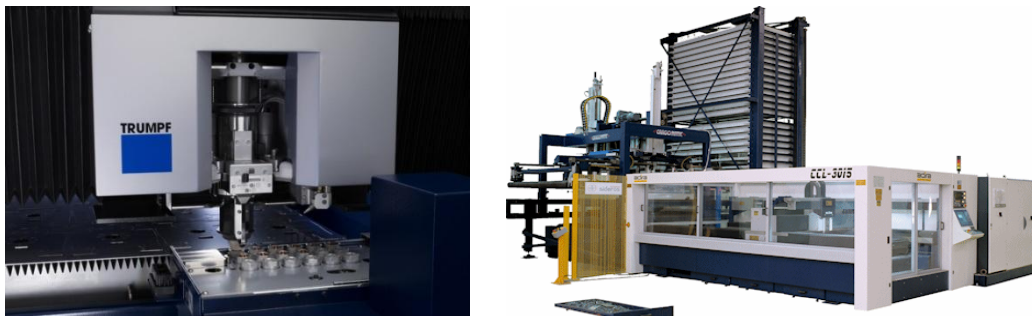


Figura 2.24) Alguns sistemas de automatização de tarefas utilizados em centros de corte laser. À esquerda está representado o sistema de troca automática de nozzle da TRUMPF e à direita, um sistema Lift-Adiramic Tower para carga, descarga e armazenamento de chapa.

Apesar de sistemas como o Lift-Adiramic Tower permitirem a obtenção de tempos de produção bastante elevados, existem fabricantes que procuram atingir a perfeição, tendo para isso focado as suas atenções nos tempos de “setup” da máquina. O tempo de “setup” de um centro de corte laser está associado à troca e centragem do bico de corte, pelo que desta forma, existem fabricantes como a Mazak, TRUMPF e Bystronic que automatizaram este processo. A ADIRA também pretende diminuir os tempos de preparação dos seus centros de corte, sendo este relatório a prova disso.

3 Capítulo III – Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

3.1 Introdução

O presente capítulo tem por finalidade apresentar as soluções desenvolvidas para o sistema de troca automática de nozzle. No decorrer do trabalho efectuado na ADIRA, foram desenvolvidos dois protótipos que foram alvo de um processo iterativo que conduziu a remodelações sucessivas.

O primeiro consiste num prato giratório, cujo princípio de funcionamento é semelhante ao de um sistema de troca automática de ferramenta das máquinas CNC. Este prato tem 24 orifícios, divididos por duas pistas concêntricas, onde estão armazenados os nozzles e os respectivos suportes. A rotação do prato permite o transporte do nozzle pretendido para uma zona de “Stand By” (estática), onde estão colocados dois motores de passo (um para cada pista) que transmitem a rotação ao suporte e, por conseguinte, permitem o aperto/desaperto do nozzle na cabeça. Como o prato superior roda e os motores de aperto estão estáticos, foi necessário explorar soluções que permitam o engate de cada um dos veios dos Porta-nozzles no respectivo veio motor. Estes engates revelaram-se algo complicados de modelar, pois é necessário que o veio do Porta-nozzle engate no veio motor independentemente da posição em que este último está. Esta solução apresenta algumas vantagens, nomeadamente o facto de permitir que apenas metade do prato rotativo tenha de entrar na área de corte, no entanto, acabou por ser abandonada ainda numa fase embrionária, pois obrigava à utilização de uma motorização bastante precisa para fazer rodar o prato (prato divisor).

Devido a isto, procurou-se modelar uma nova solução capaz de fornecer precisão e qualidade de funcionamento. Esta segunda solução consiste numa gaveta com capacidade de armazenamento para 18 nozzles, que translada para o interior da área de corte por acção de um cilindro pneumático. Este protótipo apresenta os sistemas de aperto/desaperto sempre estáticos e em contacto constante com o motor, através de uma cadeia de engrenagens de dentado recto. Desta forma, quem procura o nozzle é a cabeça, pelo que se consegue diminuir a precisão de funcionamento do sistema. O aperto/desaperto do nozzle é conseguido através da rotação de cada uma das rodas dentadas que estão acopladas a um veio estriado, que por sua vez faz rodar o Porta-nozzle.

O desenvolvimento destes dois protótipos preconizou alguns passos iniciais que são muito comuns no desenvolvimento de produto. Existem diversas técnicas para se desenvolver um produto, no entanto, são quase sempre direccionadas para empresas cujo Core Business é a venda de ideias ou soluções. Nestas empresas é frequente utilizar-se um modelo de desenvolvimento que obriga a um contacto constante com o consumidor final, de modo a que o produto esteja de acordo com as expectativas iniciais.

O esquema seguinte apresenta um dos modelos de desenvolvimento de produto utilizados por este tipo de empresas. [10]

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

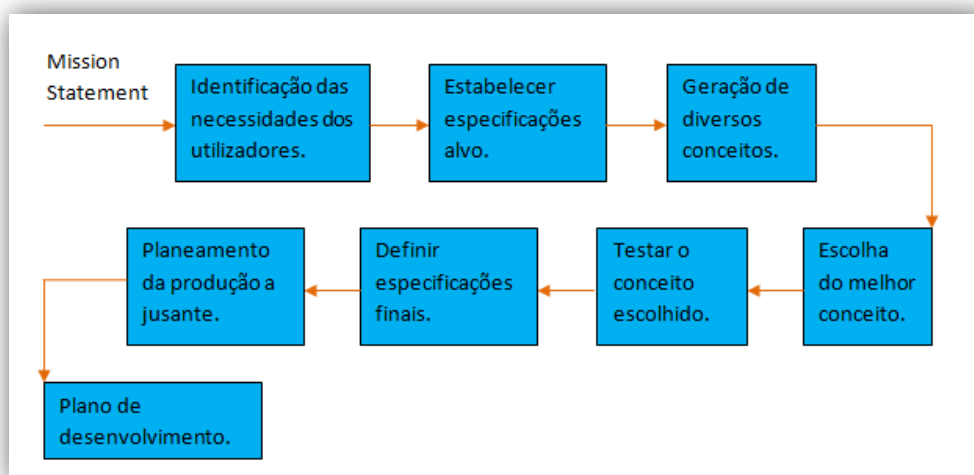


Figura 3.1) Fases de desenvolvimento de um produto. Este esquema é iterativo pelo que qualquer problema detectado numa das fases obriga a retornar à etapa anterior, ou em casos mais extremos ao início da cadeia.

O processo apresentado acima preconiza 9 etapas, todas elas iterativas. Numa fase inicial é efectuado um Mission Statement, cujo objectivo é descrever e realçar as vantagens do produto e ainda identificar mercados e utilizadores alvo. Em seguida são identificadas as necessidades dos utilizadores, através de entrevistas ou inquéritos, procedendo-se em seguida à organização dessa informação. A terceira etapa consiste em perceber o problema e definir especificações marginais. Além disto, é efectuada uma análise às soluções existentes no mercado e uma pesquisa de patentes de forma a evitar conflitos futuros. A quarta etapa tem por objectivo modelar soluções para a ideia inicial, utilizando como linha de guiamento as especificações definidas anteriormente. A quinta e sexta etapa consistem, respectivamente, na escolha da melhor solução e na elaboração de um protótipo que permita validar a sua funcionalidade. A etapa sete serve para definir as especificações da solução validada, sendo seguida das duas últimas fases que se concentram especificamente no plano de produção e desenvolvimento do produto. [10]

No caso do sistema modelado no âmbito deste relatório, algumas das etapas apresentadas foram deixadas de parte, pois não se justificavam. O Mission Statement e a identificação das necessidades do utilizador não faziam sentido para este tipo de trabalho, pois o produto não se destina a vender em massa nem está obrigado a ter características como uma boa ergonomia ou um acabamento topo de gama. Os clientes alvo da ADIRA já estão identificados, sendo as empresas que procuram soluções rápidas e fiáveis para trabalhar a chapa. No entanto, a terceira etapa já foi explorada, pois o desenvolvimento de qualquer produto obriga a estabelecer especificações que possam guiar a equipa de desenvolvimento ao longo do projecto. Além disto, a análise dos dispositivos da concorrência e a procura de patentes é uma ajuda valiosa, pois permitem retirar ideias já validadas e perceber até onde se pode ir sem entrar em conflitos. A quarta e a quinta etapa também foram utilizadas, pois o objectivo deste trabalho era explorar e modelar várias soluções para o problema proposto. As soluções modeladas foram alvo de diversas alterações de modo a que a solução final fosse

confiável e funcional. A etapa seis, que tem por objectivo testar o conceito escolhido, foi impossível de efectuar, pois a construção de um protótipo funcional requer tempo que neste caso era manifestamente pouco para esse fim. A definição das especificações finais foi efectuada durante a modelação do protótipo final, pelo que fugiu um pouco ao encadeamento apresentado na figura 3.1. As últimas duas etapas não foram concluídas, no entanto foi efectuada uma análise de custos às soluções apresentadas e houve cuidado na modelação da solução final, de modo a que seja facilmente implementada em termos produtivos.

3.2 Análise de soluções existentes e respectivas patentes

Como foi referido anteriormente, já existem sistemas de troca automática de nozzle, pelo que é extremamente importante efectuar-se a análise desses mesmos. A análise cuidada dos sistemas da concorrência permitiu entender melhor o problema e retirar ideias para o desenvolvimento do sistema da ADIRA. Em seguida, vai ser efectuada uma análise aos sistemas da TRUMPF, Bystronic, Amada e Mitsubishi, no que toca às vantagens e desvantagens de cada sistema e à existência ou não da respectiva patente.

3.2.1 Sistemas da concorrência

3.2.1.1 TRUMPF

O sistema desenvolvido pelo fabricante alemão TRUMPF consiste numa gaveta com capacidade para 18 nozzles. Esta gaveta está colocada na parte frontal da máquina, descaída sobre o lado direito, e translada transversalmente em relação à mesa. A troca de nozzle pode ser efectuada com a mesa na posição de trabalho ou durante a troca desta.

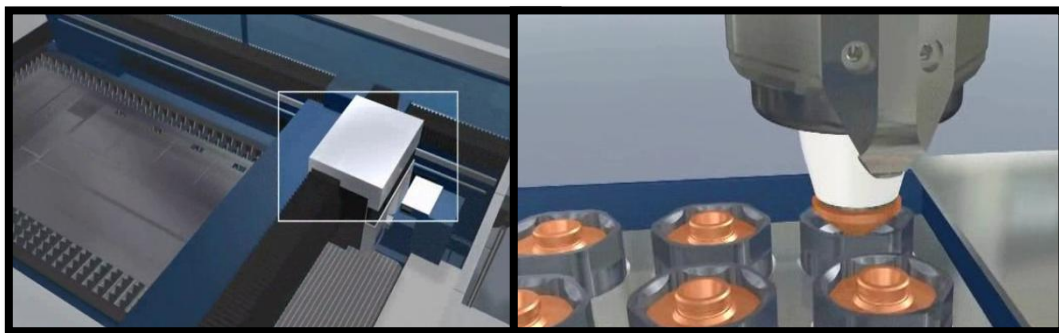


Figura 3.2) Posicionamento da gaveta de troca em relação à mesa de corte e aproximação da cabeça ao nozzle pretendido.

A cabeça de corte fabricada pela TRUMPF prende o nozzle através de uma rosca, tal como a cabeça utilizada pela ADIRA, pelo que existe um sistema de rotação que efectua o aperto/desaperto do nozzle na cabeça. Além disto, o suporte do nozzle está equipado com algum tipo de elemento elástico (por exemplo uma mola) que impulsiona o nozzle contra a cabeça e impede que exista perda de contacto entre este elemento e o suporte durante a operação. Através da análise de um vídeo, disponibilizado pelo fabricante no seu “site”, foi possível verificar que durante a operação de troca todos os suportes

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

rodam simultaneamente, o que poderá indicar a existência de um sistema de engrenagens ou polias que transmite a rotação do motor até aos nozzles. [11]

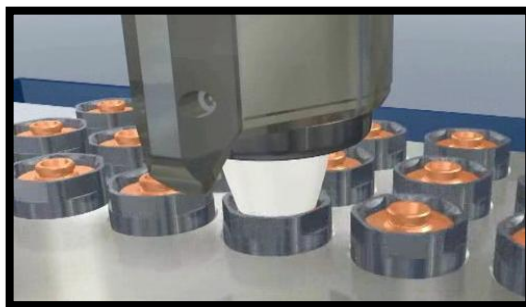


Figura 3.3) Início da operação de aperto no novo nozzle na cabeça. Note-se que o suporte do nozzle está ligeiramente mais abaixo que os restantes, o que indica a existência de um elemento elástico que o faça retornar à posição inicial.

É uma solução com geometria simples, bastante compacta e que recorre a um movimento de translação simples para entrar na área de trabalho, movimento esse, que pode ser efectuado através de um cilindro pneumático de duplo efeito. O tempo total da operação, que para além da troca de nozzle ainda inclui a sua limpeza e o ajuste do ponto focal, ronda os 24 segundos, pelo que se pode dizer que é um sistema bastante rápido.



Figura 3.4) Final da operação de troca de nozzle. Nesta fase a gaveta já transladou para a posição de repouso, a mesa retornou à posição de trabalho e a cabeça prepara-se para iniciar o corte. O tempo total da operação foi de 24 segundos.

O quadro seguinte sintetiza as características desta solução desenvolvida pela TRUMPF.

Tabela 1) Características do sistema de troca automática de nozzle da TRUMPF.

TRUMPF	
Características gerais	Gaveta que se move na transversal em relação à mesa.
	Sistema rotativo para aperto do nozzle na cabeça.
	Sistema de compressão que assegura o contacto permanente entre o nozzle e o respectivo suporte que está na gaveta.
	Geometria simples, pequeno atravancamento.
Capacidade	18 Nozzles.
Tipo de movimentos	Movimento de translação efectuado por cilindro pneumático ou fuso.
Tempo de operação	24 Segundos.

3.2.1.2 Bystronic

O sistema desenvolvido pelo fabricante suíço Bystronic é bastante diferente do modelo da TRUMPF. Consiste num prisma octogonal rotativo, com capacidade para 5 nozzles por face, perfazendo assim um total de 40 nozzles. Este dispositivo está colocado na parte frontal da máquina, sobre o lado direito, e só actua quando se procede à troca de mesas.

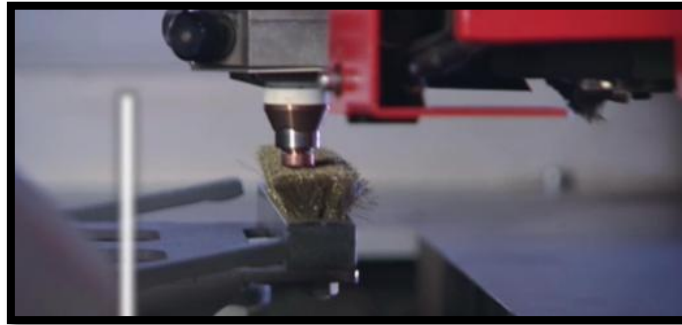


Figura 3.5) Início da operação de troca de nozzle. Nesta fase a cabeça está a limpar o nozzle.

A cabeça de corte utilizada por este fabricante prende o nozzle por engate, eliminando assim a necessidade de se desenvolver um sistema de aperto. No entanto, como o barrilete gira é necessário efectuar a prisão do nozzle para que este não caia do seu suporte, sendo que neste caso particular isso é conseguido através da utilização de um o'ring. Ao contrário do sistema da TRUMPF, onde o avanço para o aperto/desaperto é conseguido pela utilização de um elemento elástico, o engate é conseguido através do movimento de avanço vertical da cabeça sobre o prisma. [12]



Figura 3.6) A cabeça de corte desloca-se para o sistema de troca, que já transladou para a posição correcta.

Este sistema apresenta dois movimentos para efectuar a troca de nozzle. O primeiro, é uma translação horizontal efectuada por meio de um fuso e, o segundo, consiste na rotação do barrilete por forma a posicionar a face que contém o nozzle pretendido na posição de troca. Este movimento de rotação é conseguido através de um sistema de polias.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

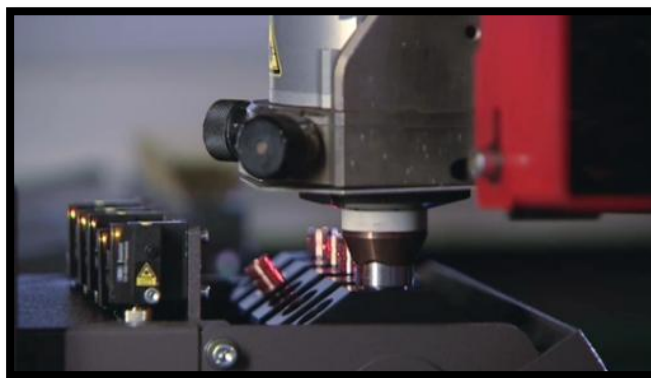


Figura 3.7) O prisma rodou de modo a posicionar o nozzle pretendido em posição. Em seguida a cabeça avançou verticalmente em relação ao nozzle e procedeu ao seu engate.

É uma solução muito compacta, com grande capacidade de armazenamento e mecanicamente bastante simples, mas com pouca utilidade para o caso da ADIRA. A sua adaptação obrigava à criação de um dispositivo de aperto, que teria de ficar dentro do prisma, provocando isso um aumento significativo das suas dimensões e uma elevada complexidade mecânica. Além disto, a rotação do prisma obrigaria à prisão de cada nozzle ao suporte, podendo isso criar uma situação de difícil resolução. O tempo total da operação de troca, limpeza e ajuste do ponto focal é de 25 segundos. O quadro seguinte sintetiza as características desta solução.

Tabela 2) Características do sistema de troca automática de nozzle da Bystronic.

Bystronic	
Características gerais	Prisma octogonal com 5 nozzles por face.
	Prisão do nozzle ao suporte através de o´ring.
	Geometria simples, pequeno atravancamento, baixa complexidade mecânica.
Capacidade	40 Nozzles.
Tipo de movimentos	Movimento de translação efectuado por fuso, e movimento de rotação para posicionamento do nozzle efectuado por polias.
Tempo de operação	25 Segundos.

3.2.1.3 Mazak

O fabricante japonês Mazak desenvolveu dois sistemas de troca de nozzle para incorporar nos seus centros de corte lazer. O sistema OptI-Pod, que está incorporado no modelo SUPER TURBO-X Mk III, consiste numa gaveta com capacidade para 3 nozzles, que se desloca solidária com a mesa de corte. A troca de nozzle é efectuada na parte traseira da máquina, pelo que a mesa tem de se deslocar para essa zona com a gaveta. [13]



Figura 3.8) Sistema de troca Opt I-Pod da Mazak. À esquerda é possível verificar que a gaveta está agarrada à mesa de trabalho. À direita mostra-se os 3 nozzles suplentes existentes no interior da gaveta.

A segunda solução desenvolvida, inserida no modelo HYPER TURBO-X, consiste numa torreta semelhante às utilizadas nos sistemas de troca automática de ferramenta das máquinas CNC. Esta torreta está dividida em duas secções, uma para a troca da cabeça de corte e outra para a troca de nozzle. A secção de troca de cabeça e a secção de troca de nozzle têm capacidade de armazenamento para 6 e 10 unidades, respectivamente. [14]



Figura 3.9) Torreta para troca de nozzle e cabeça de corte da Mazak. Na imagem da esquerda mostram-se as cabeças de corte suplentes e na direita é possível ver o sistema de troca de nozzle com 10 unidades.

Estes dois sistemas diferem, entre si, no que corresponde ao movimento e à geometria, no entanto funcionam da mesma forma quando se procede à troca de nozzle. Os nozzles utilizados pela Mazak são de encaixe, pelo que a sua substituição é efectuada através do avanço da cabeça sobre o suporte do nozzle. Quando a cabeça contacta com o nozzle efectua uma força descendente para que este último encaixe no interior da primeira. Quando o nozzle está correctamente encaixado, o sistema de armazenamento liberta-o da posição de descanso permitindo que este se desloque com a cabeça.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

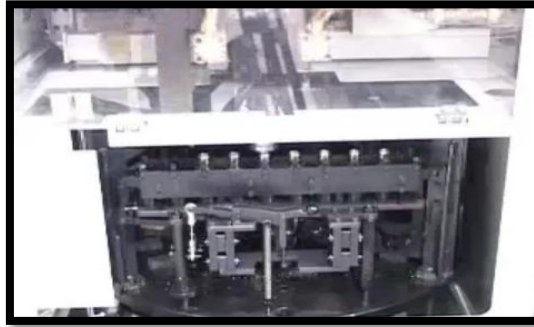


Figura 3.10) Sistema de troca de nozzle incorporado na torreta. O suporte dos nozzles tem capacidade para 10 unidades e tem um sistema de travamento, que só liberta os nozzles quando estes estão correctamente encaixados na cabeça.

Uma das características mais interessantes da solução da Mazak encontra-se no sistema OptI-Pod e tem a ver com a limpeza do nozzle. Nas soluções da TRUMPF e da Bystronic a limpeza é efectuada através do contacto do nozzle com uma escova de aço. No caso da Mazak foi desenvolvida uma escova rotativa que parece ser uma solução bastante eficaz. [15]



Figura 3.11) Escova rotativa de limpeza do sistema OptI-Pod.

O tempo total de ciclo destas duas soluções, referente à troca, limpeza e ajuste do ponto focal, ronda os 25 segundos. Caso seja efectuada a troca da cabeça, na solução da torreta, este tempo sobe ligeiramente. Em seguida sintetizam-se as principais características dos sistemas da Mazak.

Tabela 3) Características do sistema de troca de nozzle OptI-Pod da Mazak.

OptI-Pod	
Características gerais	Gaveta que se move solidária com a mesa.
	Sistema de engate do nozzle na cabeça.
	Sistema de travamento do nozzle no suporte que é desactivado assim que este está correctamente inserido na cabeça.
	Geometria simples, pequeno atravancamento.
Capacidade	3 Nozzles.
Tipo de movimentos	Movimento de translação efectuado pela mesa.
Tempo de operação	25 Segundos.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Tabela 4) Características da torreta para troca de nozzle e cabeça de corte da Mazk.

Torreta	
Características gerais	Torreta rotativa com armazenamento de cabeças de corte e nozzles.
	Sistema de engate do nozzle na cabeça.
	Sistema de trancamento do nozzle no suporte que é desactivado assim que este está correctamente inserido na cabeça.
	Geometria simples.
Capacidade	10 Nozzles e 6 cabeças.
Tipo de movimentos	Movimento de rotação na torreta.
Tempo de operação	25 Segundos sem troca de cabeça.

3.2.1.4 Mitsubishi

O sistema de troca de nozzle desenvolvido pela Mitsubishi Machinery Systems consiste numa gaveta com capacidade para armazenamento de 5 nozzles. A gaveta está presa à parte frontal da mesa de corte, pelo que o sistema não apresenta qualquer tipo de movimento, sendo a cabeça que se desloca ao encontro dos nozzles. [16]



Figura 3.12) Gaveta de troca de nozzle desenvolvida pela Mitsubishi. Nesta fase a tampa que cobre os nozzles está fechada.

No topo da gaveta existe um tampo basculante que protege os nozzles durante o funcionamento do centro de corte. Quando se pretende efectuar a troca de um nozzle, a cabeça vai ao encontro da gaveta e posiciona-se imediatamente por cima desta. Seguidamente, a tampa abre e os suportes dos nozzles transladam para o exterior desta, por forma a permitir que se inicie a operação de troca. [16]

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser



Figura 3.13) A tampa que cobre os nozzles abriu e a cabeça posiciona-se directamente acima do nozzle pretendido.

Nesta altura, a cabeça encosta no suporte pretendido e este começa a girar para apertar/desapertar o nozzle. O sistema da Mitsubishi é muito parecido com o da TRUMPF, no entanto, não parece apresentar nenhum sistema de compressão que impulse o nozzle na vertical e o ajude a manter-se em contacto com o suporte. Assim, quando o nozzle começa a apertar na cabeça vai transladando sem nenhuma ajuda, sendo apenas guiado pelas paredes laterais do suporte.



Figura 3.14) Os suportes dos nozzles movimentam-se na vertical de maneira a encostar o nozzle à cabeça. Em seguida todos os suportes começam a girar e a operação de aperto/desaperto começa.

O tempo total de ciclo, que inclui limpeza, troca e ajuste do ponto focal, ronda os 60 segundos, pelo que se pode afirmar que a solução da Mitsubishi é claramente mais morosa que as apresentadas anteriormente.



Figura 3.15) Final da operação de limpeza, troca e ajuste do ponto focal que demorou cerca de 60 segundos.

Em seguida apresenta-se um quadro síntese das características do sistema da Mitsubishi.

Tabela 5) Características do sistema de troca de nozzle da Mitsubishi.

Mitsubishi	
Características gerais	Gaveta imóvel colocada na parte frontal da área de corte.
	Sistema rotativo para aperto do nozzle na cabeça
	Ausência de sistema de compressão nos suportes. Guiamento vertical do nozzle efectuado pela parede lateral do suporte.
	Geometria simples, pequeno atravancamento.
Capacidade	5 Nozzles
Tipo de movimentos	Movimento de translação vertical dos suportes dos nozzles
Tempo de operação	60 Segundos

3.2.2 Análise de patentes

A análise de patentes é um procedimento importante, quando se pretende desenvolver um sistema já existente no mercado, pois permite perceber até onde se pode ir sem entrar em conflito com outras empresas. Desta forma, foi efectuada uma pesquisa no “site” do European Patent Office, com o objectivo de verificar se existe algum sistema de troca de nozzle que esteja protegido por patente. Foram encontrados dois sistemas patenteados, pertencentes à TRUMPF e à Bystronic. O sistema patentado pela Bystronic é exactamente igual ao apresentado no capítulo anterior, já o da TRUMPF difere bastante. Em seguida apresentam-se as duas patentes encontradas.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

3.2.2.1 TRUMPF

O sistema patenteado pela TRUMPF difere bastante do que foi apresentado no capítulo anterior. Consiste num revólver que roda em torno de um eixo vertical (11) e que contém no topo 8 “slots” (8) de armazenamento. A rotação do revólver e dos “slots” (para efectuar o aperto do nozzle na cabeça de corte) é efectuada por intermédio de um motor de posicionamento comum. No centro do revólver existe uma roda dentada que transmite a rotação do motor aos suportes dos nozzles. O posicionamento dos suportes dos nozzles é efectuado através de um veio (15). Quando se pretende efectuar a troca de nozzle o motor faz girar o revólver e os suportes dos nozzles movem-se solidariamente para a posição pretendida. Quando se pretende efectuar o aperto dos nozzles o motor transmite rotação à roda dentada central e esta retransmite esse movimento para os suportes dos nozzles. O sistema contém um colector de partículas (13) que é utilizado para recolher a sujidade acumulada nos nozzles durante o corte da chapa. [17]

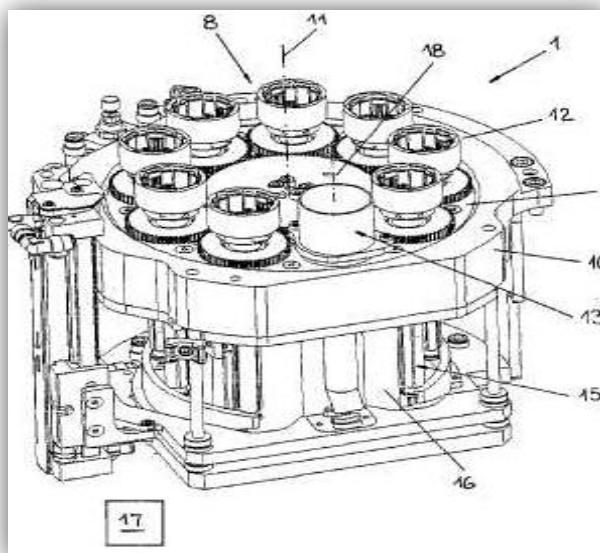


Figura 3.16) Sistema de troca de nozzle patenteado pela TRUMPF.

3.2.2.2 Bystronic

O sistema patenteado pela Bystronic é exactamente igual ao apresentado no capítulo anterior. Consiste num revólver que roda em torno de um eixo horizontal composto por 8 faces com 5 “slots” de armazenamento cada. A rotação do revólver é efectuada por intermédio de polias e a translação do sistema, de modo a promover o alinhamento entre a cabeça e o “slot” pretendido, é conseguida à custa de um fuso ligado a um motor eléctrico. Em seguida apresenta-se o esquema deste sistema. [18]

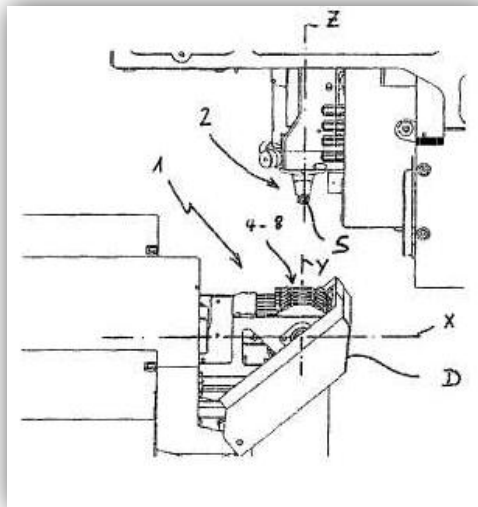


Figura 3.17) Sistema de troca de nozzle patenteado pela Bystronic

3.3 Especificações do projecto

O desenvolvimento de qualquer tipo de produto requer a definição de especificações claras e concisas que funcionem com uma linha mestra ao longo do trabalho. Desta forma, antes de se iniciar o desenvolvimento do sistema de troca de nozzle foi efectuada uma análise a todos os elementos do centro de corte que vão interagir com ele.



Figura 3.18) Centro de corte por laser LF 3015 da ADIRA. O sistema de troca de nozzle destina-se a equipar um centro de corte deste tipo.

Como já foi referido, este sistema vai ser incorporado nos centros de corte por lazer da ADIRA, pelo que é fundamental definir o seu posicionamento no interior da máquina. Esta análise de posicionamento vai permitir perceber qual o atravancamento máximo que o sistema de troca de nozzle pode ter, de modo a não interferir com a mesa móvel, com o pórtico que suporta a cabeça, com as portas de entrada do centro de corte e com o

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

sistema de corte de tubo (caso este seja incorporado na máquina pois é um opcional). Posto isto, definiu-se que o sistema deverá posicionar-se na parte frontal da máquina, numa posição compreendida entre a porta de entrada e a mesa móvel e, descaído sobre o lado direito, já que o lado esquerdo se destina a acomodar o sistema de corte de tubo. A figura seguinte, mostra a zona que se destina a acolher o sistema de troca de nozzle e os elementos do centro de corte, que limitam o espaço disponível para a sua acomodação. As cotas indicadas na figura são meramente auxiliares, uma vez que nada obriga a que o sistema tenha dimensões iguais a esses valores. É possível projectar um sistema com um comprimento longitudinal maior do que 400 mm, desde que este não impeça a abertura das portas. A cota transversal de 600 mm representa a largura máxima que o sistema de troca de nozzle pode ter, pois um valor superior a esse conduzirá a uma interferência com o sistema de corte de tubo. Este valor de 600 mm é bastante elevado e, como tal, pretende-se projectar algo mais compacto de modo a que exista algum espaçamento livre entre os dois sistemas, caso ambos sejam incluídos no centro de corte.

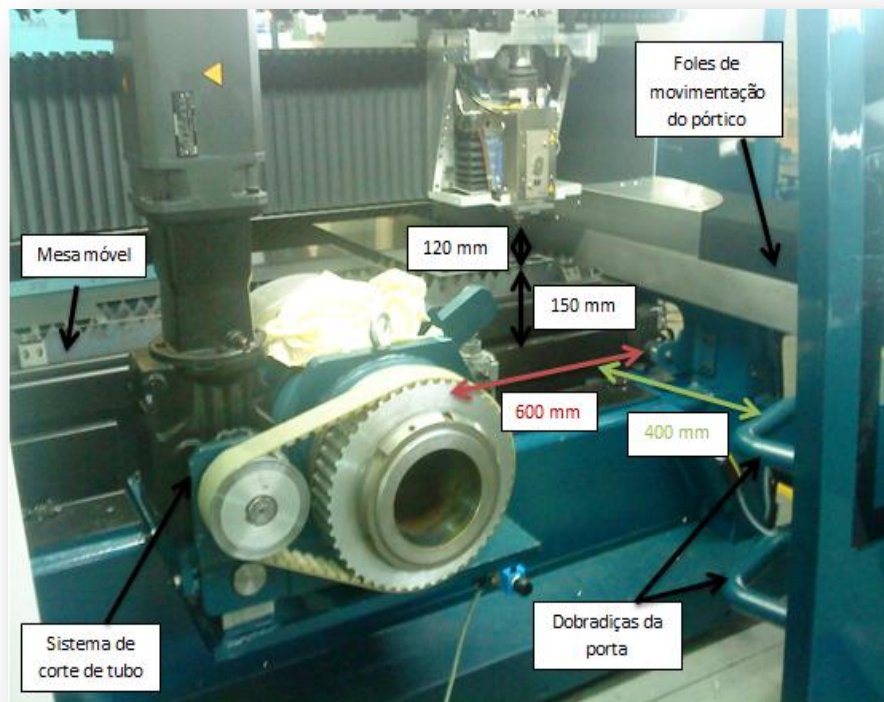


Figura 3.19) Zona destinada a acolher o sistema de troca de nozzle, que terá de ficar posicionado entre a porta de entrada e a mesa móvel.

As cotas de 150 mm e 120 mm representam respectivamente o atravancamento vertical da mesa móvel e o curso da cabeça de corte. Estas duas cotas são extremamente importantes, pois dão indicação sobre qual o atravancamento vertical máximo disponível para o sistema de troca de nozzle. Como já foi referido anteriormente, a troca de nozzle só é efectuada quando se varia a espessura ou o material da chapa que se pretende cortar pelo que, desta forma, como a mesa móvel se desloca à traseira da máquina para carregar chapa, a operação de troca de nozzle pode ser efectuada com esta fora da posição de trabalho. Assim sendo, o sistema a desenvolver pode medir cerca de 270 mm de altura.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Agora que já se definiu o posicionamento e o atravancamento máximo do sistema, é necessário analisar a cabeça de corte e o modo como é feita a prisão do nozzle. A ADIRA utiliza cabeças de corte fabricadas pela Precitec. O modelo em questão prende o nozzle por aperto numa peça cerâmica, que contém um furo roscado interior. Desta forma, o sistema de troca tem de fornecer rotação ao nozzle de modo a que este aperte/desaperte da peça cerâmica. Esta peça cerâmica é extremamente frágil, pelo que o binário de aperto tem de ser muito bem controlado. Assim sendo pensa-se que para apertar/desapertar o nozzle sem danificar a peça cerâmica seja necessário fornecer aproximadamente **0,1 Nm de binário**. Além disto, existe outro ponto crítico que deve ser acautelado e que tem a ver com a correcta nivelção do nozzle. Quando se aproxima o nozzle da peça cerâmica é essencial que o primeiro esteja totalmente nivelado no plano horizontal em relação ao segundo, pois caso contrário é bastante fácil danificar os filetes da rosca da peça cerâmica. Para a velocidade de rotação do sistema de aperto/desaperto definiu-se um valor de **50 Rpm ou 0,83 Rps**. Este valor é extremamente baixo, no entanto, como a operação de aperto/desaperto é muito crítica, um valor superior poderá contribuir para a diminuição de fiabilidade e em último caso, para a destruição da rosca cerâmica.

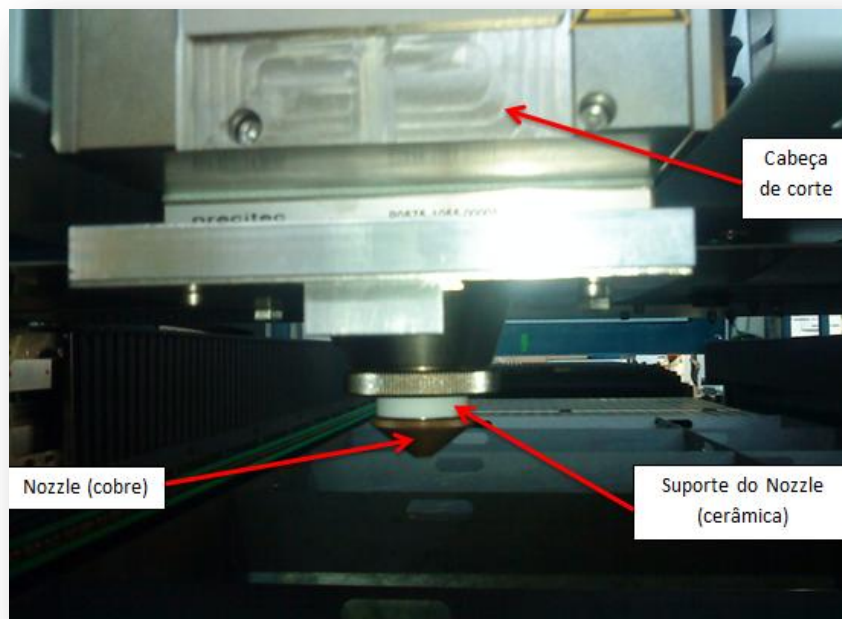


Figura 3.20) Representação da cabeça de corte da Precitec e do nozzle e respectivo suporte cerâmico.

A capacidade de armazenamento do sistema foi definida tendo em conta os nozzles fornecidos pela ADIRA aos clientes que adquirem o centro de corte. Os nozzles fornecidos apresentam todos as mesmas medidas exteriores variando apenas o diâmetro do furo de saída. Existem 9 furos diferentes, pelo que desta forma se definiu que o sistema deverá conter capacidade para armazenar **18 nozzles**, correspondentes ao armazenamento de 2 nozzles por cada diâmetro de furo. Este valor é utilizado na solução final, no entanto, nas soluções intermédias definiu-se um valor superior com o objectivo de tentar explorar outras opções de arrumação.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Quanto aos accionamentos definiu-se que o sistema deverá ter movimentos simples e se possível com accionamento pneumático, de modo a aproveitar o sistema pneumático já existente no centro de corte. Assim, ficou definido que o sistema vai efectuar apenas um movimento de avanço em direcção à zona de corte, que pode ser efectuado por meio de um cilindro pneumático de duplo efeito ou, através de um motor de passo pneumático, que transmitirá a potência a um sistema de roda dentada e cremalheira, sendo esta última responsável pela translação do sistema.

Os tempos da operação de troca, limpeza e ajuste de ponto focal são bastantes importantes. O ideal é que estas três etapas sejam efectuadas durante o tempo de troca de mesa que ronda os **30 a 40 segundos**, pelo que a escolha do tipo de accionamento e do motor para o aperto dos nozzles vai ter em conta este parâmetro. O tempo total da operação pode exceder este valor, mas isso implica alterar o tempo de troca de mesas e por conseguinte influir na produtividade do centro de corte, sendo isso indesejável.

Por fim é necessário definir o tipo de ligação existente entre o suporte de armazenamento e o nozzle, pois a operação de aperto/desaperto implica a transmissão de rotação entre estes dois componentes. Tendo em conta que o binário de aperto é bastante baixo pensa-se que uma **ligação por atrito** seja suficiente.

Na tabela seguinte sintetiza-se as especificações definidas para o sistema de troca de nozzle.

Tabela 6) Especificações para o sistema de troca de nozzle

Especificações do sistema de troca de nozzle		
Atravancamentos [mm]	Longitudinal	400
	Transversal	<600
	Vertical	<270
Binário de aperto requerido [Nm]		<=0,10
Capacidade de armazenamento		>=18
Velocidade de rotação para aperto/desaperto [Rpm]		50
Tempo de operação [s]		<30
Transmissão de movimento entre o nozzle e o suporte		Atrito

3.4 Soluções modeladas

Após a análise das soluções da concorrência e da definição das especificações de projecto, estão reunidas as condições para se dar início à modelação das ideias para o sistema de troca automática de nozzle. Como já foi referido anteriormente, foram modeladas duas soluções distintas, que foram alvo de remodelação constante consoante o aparecimento de problemas. A apresentação das soluções vai seguir uma determinada metodologia, por forma a facilitar a compreensão, pelo que desta forma numa primeira fase serão apresentadas as motivações de cada solução, partindo-se em seguida para a apresentação dos elementos constituintes e explicação do princípio de funcionamento. O sistema de aperto/desaperto dos nozzles também será alvo de uma análise cuidada, uma

vez que é um dos elementos mais críticos do sistema de troca. Numa fase final serão apresentados os cálculos relativos ao modelo, será abordada a sequência genérica de montagem e será efectuada uma breve conclusão com vista a focar os aspectos positivos e negativos da solução.

3.4.1 Prato rotativo

3.4.1.1 Motivações

A solução do prato rotativo foi desenvolvida tendo em conta os seguintes objectivos:

- **Diminuir o curso de translação necessário para a entrada do sistema na área de corte;**
- **Minimizar o número de movimentos da cabeça de corte;**
- **Maximizar o número de nozzles armazenáveis;**

O prato giratório roda em torno de um eixo vertical, que passa directamente pelo seu centro, pelo que desta forma se pode definir uma zona específica para efectuar a operação de troca. Esta zona, denominada de posição de “Stand By”, contém os motores responsáveis pela operação de aperto/desaperto, sendo o prato responsável por posicionar o nozzle pretendido directamente por cima do respectivo accionamento. Desta forma, o curso de translação mínimo para fazer o sistema entrar na área de corte diminui, pois apenas a zona de “Stand By” tem de se posicionar na referida área. A figura seguinte mostra o prato giratório e os respectivos “slots” de armazenamento para os nozzles. A zona de “Stand By”, a vermelho, é uma posição imaginária estática para onde os “slots” de armazenamento se deslocam devido à rotação do prato. Como o prato translada segundo o eixo de movimentação da mesa, a negro, apenas a zona de “Stand By” tem de entrar na área de corte ficando o resto do prato de fora.

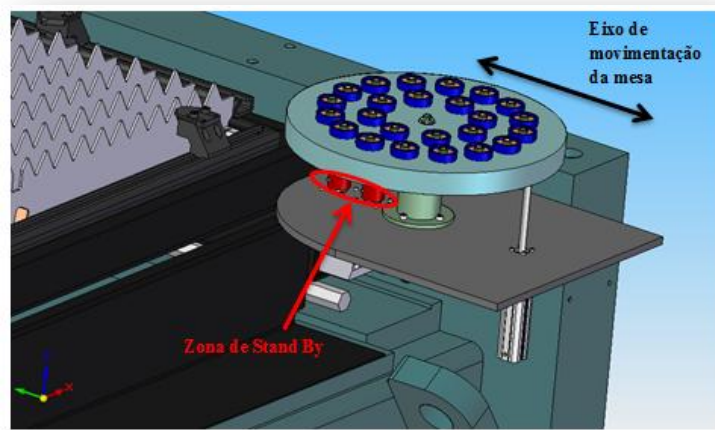


Figura 3.21) Representação da zona de “Stand By” onde é efectuada a troca de nozzle. Esta zona contém dois motores que são responsáveis pelo aperto/desaperto dos nozzles da cabeça, estando cada um associado a uma das pistas do prato giratório.

A outra razão para o desenvolvimento desta solução tem por objectivo, como já foi referido acima, diminuir os movimentos da cabeça de corte. Mais uma vez, a rotação do prato permite que a cabeça só tenha de se posicionar na zona de “Stand By” eliminando desta forma a necessidade de se deslocar sobre a totalidade do prato em busca do nozzle

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

pretendido. Desta forma, quando a cabeça está sobre a zona de “Stand By” só tem de alinhar o seu eixo vertical com o eixo do “slot” da pista interior/exterior e em seguida efectuar um pequeno avanço vertical para efectuar a operação de troca.

Em termos de armazenamento, esta solução é extremamente modular devido à configuração em duas pistas concêntricas. Este disco, com 350 mm de diâmetro, acomoda sem dificuldades 24 nozzles, sendo que o único parâmetro a acautelar é a distância entre as duas pistas, de modo a que exista espaço suficiente para colocar os sistemas de aperto e os respectivos motores.

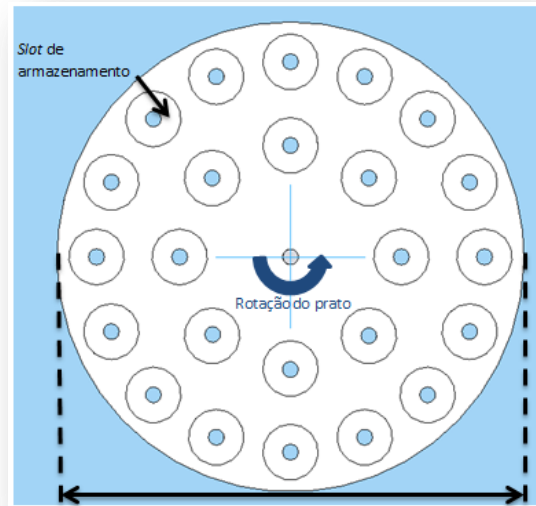


Figura 3.22) Geometria do prato rotativo. Como é possível verificar este prato armazena 24 nozzles.

3.4.1.2 Constituintes do sistema

Em termos cinemáticos, a solução do prato rotativo apresenta um princípio de funcionamento em tudo idêntico ao de um sistema de troca automática de ferramenta, de uma máquina CNC. Consiste numa placa circular de alumínio, que gira em torno de um eixo vertical para uma posição pré-definida, denominada de zona de “Stand By”, onde é efectuada a operação de aperto/desaperto do nozzle da cabeça. Este sistema é composto por 23 componentes individualizados que estão indicados na figura 3.23.

O constituinte principal do sistema é o prato giratório (1), que contém 24 orifícios de armazenamento. Em cada orifício existe um Porta-nozzle (3) e uma mola de compressão (6), cujo principal objectivo é o de manter o componente 3 na posição representada na figura, quando o sistema não se encontra accionado. Na ponta do veio de cada Porta-nozzle (3) existe uma patela circular de alumínio (5), que contém na face inferior 12 furos maquinados e um pequeno rasgo circular, que se destinam a posicionar e oferecer guiamento às esferas dos 4 posicionadores de bola (8), que estão roscados na patela 7. A prisão entre o Porta-nozzle e a patela 5 é conseguida através da utilização de uma cavilha cilíndrica (19).

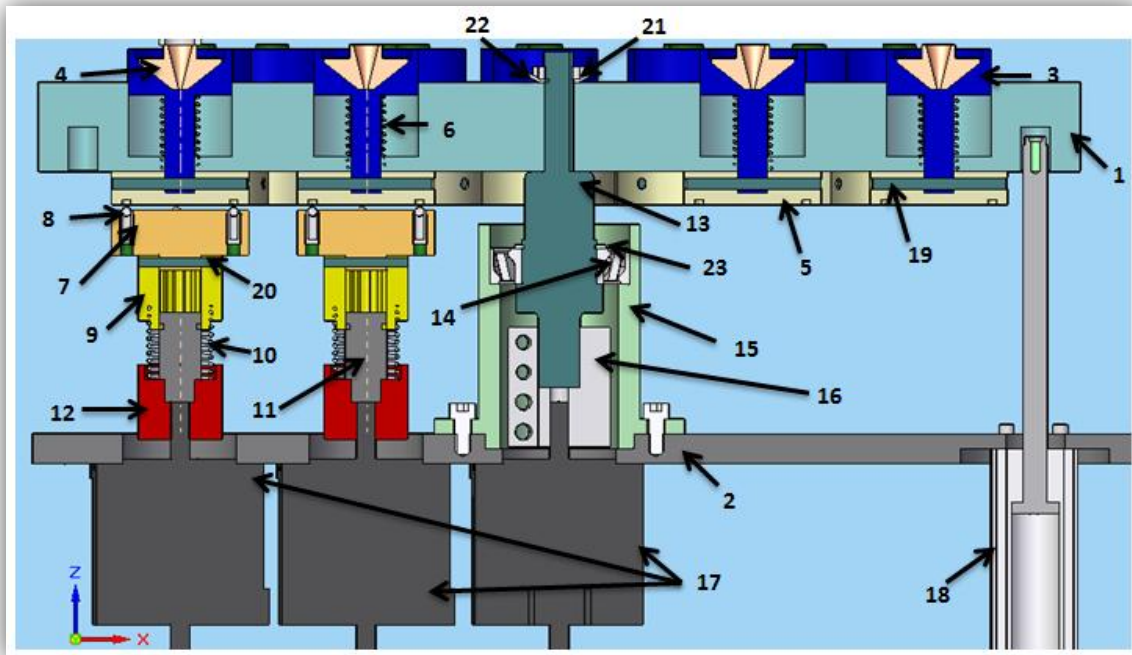


Figura 3.23) Modelo 3D do sistema de prato giratório com um corte no plano central. Este corte permite evidenciar os 23 componentes individuais do sistema

Os posicionadores de bola (8) servem para transmitir a rotação proveniente dos motores ao Porta-nozzle, de modo a que o nozzle aperte ou desaperte da cabeça de corte. Para se conseguir transmitir a rotação, as esferas do posicionador têm de entrar nos orifícios existentes na patela 5.

A patela que contém os posicionadores de bola está presa por meio de uma cavilha cilíndrica (20) a um cubo estriado (9), que translada na vertical em relação a um veio também estriado (11). A mola de compressão (10) destina-se a manter o cubo na posição representada na figura, quando o sistema não está accionado, e aumentar o atrito entre o Porta-nozzle (3) e o nozzle (4) quando se procede à operação de troca, através da força que exerce na vertical. A ligação entre o veio do motor de passo (17) e o veio estriado é conseguida por meio da utilização de uma abraçadeira (12), que está representada na figura seguinte. A abraçadeira tem um pequeno rebaixo maquinado que se destina a posicionar a mola de compressão, de modo a que esta não saia da sua posição.

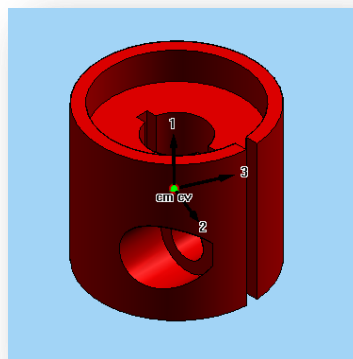


Figura 3.24) Desenho 3D da abraçadeira que se destina a prender o veio motor a veio estriado

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

O prato rotativo (1) recebe a rotação do motor de passo central (17) através de um veio (13). Este veio encontra-se posicionado através de um rolamento de esferas (14) que, por sua vez, obtém o seu posicionamento a partir de um tubo guia em alumínio (15) que está embutido na placa inferior (2). O rolamento mantém-se na sua posição através da utilização de um freio exterior (23), colocado no veio central, e de um rebaixo maquinado no tubo guia. Para transmitir a rotação do motor de passo (17) ao veio de suporte da placa rotativa (13) utilizou-se um acoplamento rígido (16). A placa inferior (2) tem por função suportar o sistema e oferecer guiamento aos motores, ao tubo guia e ao cilindro pneumático (18), através de 4 furos maquinados e rectificados. O cilindro pneumático destina-se a efectuar o encravamento da placa giratória (1), quando esta termina o transporte do nozzle escolhido para a zona de “Stand By”. A placa giratória (1) está presa ao veio central através de uma anilha (22) e de uma fêmea de segurança (21).

3.4.1.3 Princípio de funcionamento

Agora que foram apresentados os 23 componentes que compõem o sistema torna-se mais fácil explicar e compreender o funcionamento deste modelo.

A substituição de um nozzle comporta duas operações distintas que são o aperto e o desaperto. Estas duas operações são extremamente parecidas excepto no que toca ao pré-curso inicial infligido às molas de compressão que no caso do aperto é maior. Durante o aperto a mola vai esticando e por conseguinte diminuído a sua deformação, passando-se exactamente o oposto no desaperto. De seguida vai ser explicada a operação de aperto fazendo-se, no entanto referência, à operação contrária sempre que exista alguma diferença importante.

Admitindo que a cabeça de corte se encontra sem o nozzle, a operação de aperto inicia-se com o accionamento do motor de passo central (17) e, por conseguinte, com a rotação do prato rotativo (1), que desta forma transporta o nozzle escolhido para a zona de “Stand By”. Assim que o nozzle se encontra na posição determinada, o motor é desactivado e o cilindro pneumático (18) insere o seu êmbolo nos orifícios de posicionamento do prato. Esta operação destina-se a encravar o prato e aumentar a precisão de posicionamento entre o nozzle e a cabeça, uma vez que o motor de passo tem associado um erro de posicionamento sempre que roda um determinado ângulo.

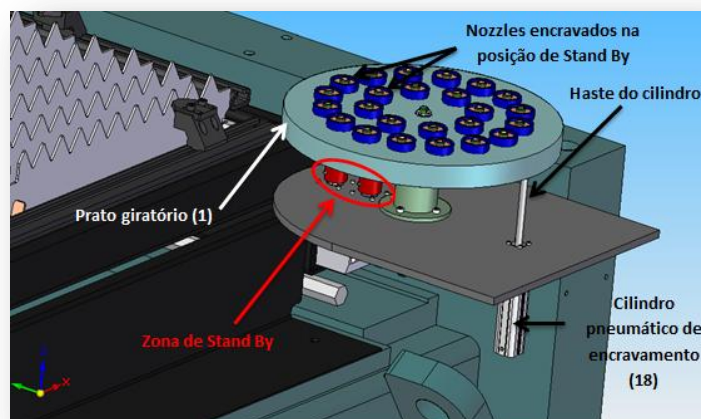


Figura 3.25) Primeira fase da operação de troca de nozzle.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Quando a operação de posicionamento do prato está concluída, a cabeça de corte avança na vertical até que a peça cerâmica entre em contacto com o nozzle escolhido, que se encontra armazenado no respectivo Porta-nozzle. A figura seguinte exemplifica esta operação.

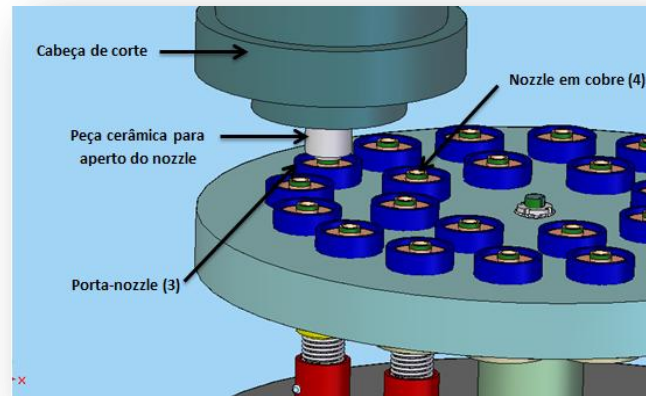


Figura 3.26) Contacto entre a cabeça e o nozzle armazenado no prato rotativo.

Assim que a cabeça contacta com o nozzle, volta a efectuar um avanço vertical de 2 mm com o intuito de comprimir a mola, que está no interior do prato, e por conseguinte promover o contacto entre as patelas 5 e 7.

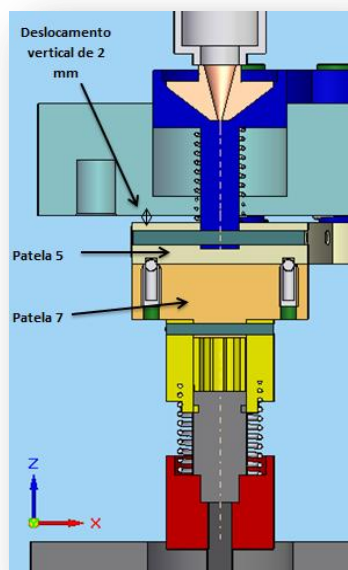


Figura 3.27) Compressão da mola que se encontra no interior do prato por acção do deslocamento da cabeça. Esta compressão tem por objectivo permitir o contacto entre as patelas 5 e 7.

Como é possível verificar na figura 3.27, o avanço da cabeça comprime a mola e obriga a que as patelas 5 e 7 entrem em contacto, no entanto, existe algo nesta figura que não representa a realidade. Quando as duas patelas entram em contacto a probabilidade de as esferas do posicionador entrarem directamente nos orifícios da patela 5 é extremamente diminuta. Desta forma, o que acontece na realidade é que o contacto entre as duas

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

patelas empurra as esferas para dentro do corpo do posicionador, sendo que o engate exibido na figura só aparece quando o motor de aperto fornece rotação ao sistema, e os eixos dos posicionadores se alinham com os eixos dos orifícios existentes na patela 5.

Assim que as duas patelas estão em contacto, a cabeça volta a efectuar um avanço vertical de 5 mm com o intuito de comprimir a mola que se encontra em torno do veio estriado. Os principais objectivos da compressão desta mola são os seguintes:

- **Aumentar a força de ligação entre o nozzle (4) e o Porta-nozzle (3), de modo a aumentar a força de atrito entre estes dois componentes;**
- **Garantir que existe contacto constante entre o Porta-nozzle e o nozzle durante o aperto/desaperto;**
- **Melhorar a ligação entre as patelas 5 e 7, de modo a que a transmissão de rotação entre as duas peças seja a melhor possível.**

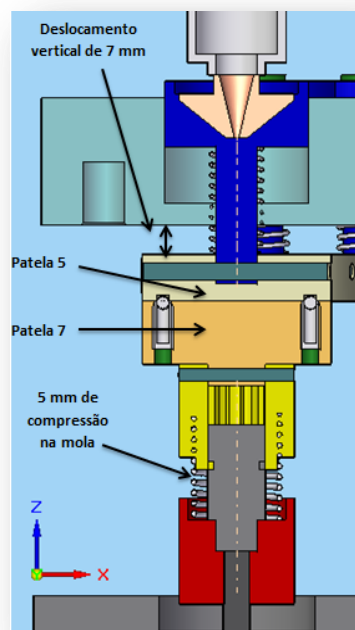


Figura 3.28) Cursos conferidos às molas de compressão, para se efectuar a operação de aperto.

Agora que se efectuaram todos os avanços necessários, que as molas estão comprimidas e que existe contacto entre as patelas 5 e 7 é possível efectuar a operação de aperto. Para isto, o motor de aperto começa a funcionar e faz rodar o veio estriado que por sua vez leva consigo o cubo e a patela 7. Assim que as esferas dos posicionadores entram nos orifícios da patela 5, o porta nozzle começa a rodar e por conseguinte promove o aperto do nozzle na peça cerâmica da cabeça, sendo a transmissão de movimento entre estes dois componentes efectuada por atrito. O engrenamento entre os filetes da rosca do nozzle e da peça cerâmica faz com que o primeiro se mova na vertical, permitindo assim que as molas iniciem a descompressão e por conseguinte retornem ao comprimento inicial.

Quando o nozzle está correctamente apertado na cabeça, o motor de aperto cessa a sua função, a cabeça de corte retira a pressão sobre as molas e o sistema retorna à posição

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

inicial. Em seguida o cilindro pneumático de encravamento recolhe a haste e o sistema está preparado para voltar a funcionar quando for requerido.

A operação de desaperto é exactamente igual ao aperto excepto no que toca aos cursos de compressão. Quando a cabeça se aproxima do Porta-nozzle coloca o nozzle no seu interior e volta a efectuar um avanço de 2 mm com vista a permitir o contacto entre as patelas 5 e 7, no entanto, em seguida só comprime a mola do veio estriado 1 mm pois esta tem de apresentar curso suficiente para absorver a operação de desaperto. Desta forma, quando o nozzle se encontra totalmente desapertado, a mola do veio estriado apresenta uma compressão de 4 a 5 mm. Na figura seguinte é possível verificar que a cabeça efectuou um avanço de 3 mm, correspondente a 2 mm para contacto entre as patelas e 1 mm de compressão para a mola do veio estriado.

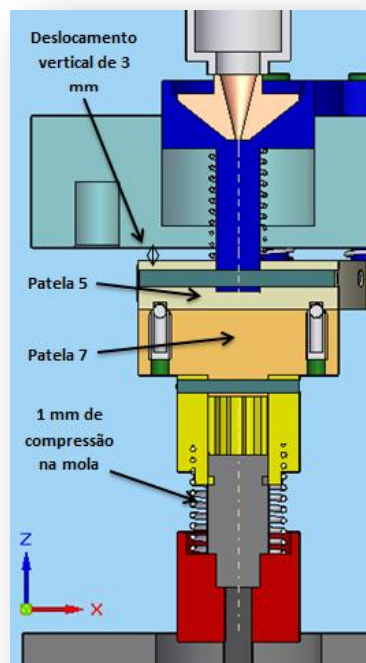


Figura 3.29) Cursos conferidos às molas de compressão, para se efectuar a operação de desaperto.

3.4.1.4 Sistemas de aperto modelados

O sistema de aperto/desaperto do nozzle na cabeça é um dos elementos mais complexos do sistema de troca de nozzle, pelo que desta forma foram exploradas soluções que permitam efectuar esta operação de forma simples e eficaz. O maior problema deste modelo de troca de nozzle, assenta no facto de necessitar de uma solução que permita o engate do veio do Porta-nozzle no veio do motor, independentemente da posição em que este último se encontra. Tendo em conta esta premissa, foram desenvolvidos dois sistemas de aperto que são explicados em seguida:

- **Veio de porta nozzle com estrias escariadas no topo;**
- **Patelas com posicionadores de bola;**

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

A primeira solução consiste no engate do veio do Porta-nozzle num cubo que está directamente acoplado ao veio motor. Como é evidente a transmissão de rotação entre o cubo e o veio só é conseguida através da existência de estrias em ambos os elementos, no entanto, como o veio do porta nozzle tem de estar separado do cubo, de modo a que o prato superior possa rodar, quando se inicia a operação de aperto é necessário engatar ambos os elementos sendo isso impossível através da utilização de um estriado com topo direito. Desta forma efectuou-se um escariamento nas estrias do veio e do cubo com o intuito de facilitar esse engate. A figura seguinte mostra estes dois componentes.

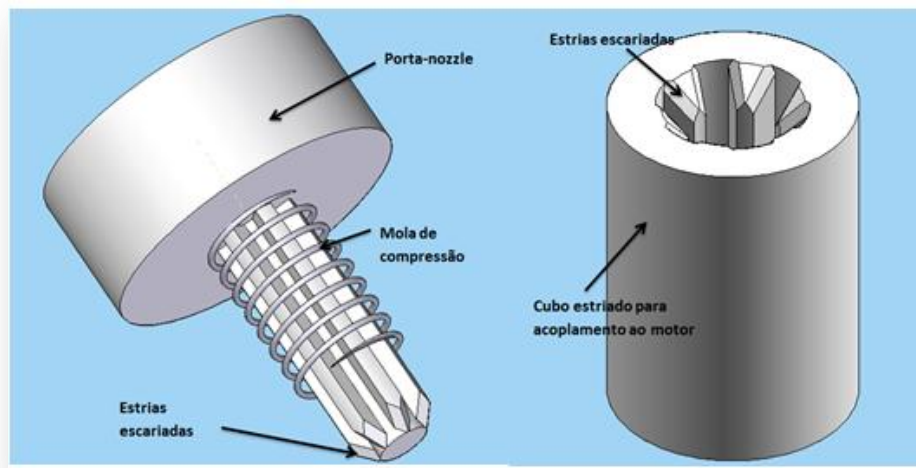


Figura 3.30) Ambos os elementos apresentam estrias escariadas nos topos, de maneira a permitir o engate.

Durante o funcionamento o veio do Porta-nozzle está inserido na placa giratória juntamente com a sua mola. Quando se pretende efectuar o aperto, a cabeça empurra o Porta-nozzle e o seu veio entra em contacto com o cubo que está acoplado ao motor. Devido ao escariamento das estrias do veio e do cubo, quando os dois elementos entram em contacto o segundo tem tendência a rodar (devido à forma angular das estrias) e a procurar a posição que lhe permita acomodar as estrias do primeiro. Assim que ambos os elementos estão em posição, a cabeça continua a empurrar o Porta-nozzle até que o topo do veio embata no fundo do cubo. Quando isto acontece é possível iniciar a operação de aperto, sendo o princípio análogo ao que já foi demonstrado anteriormente.

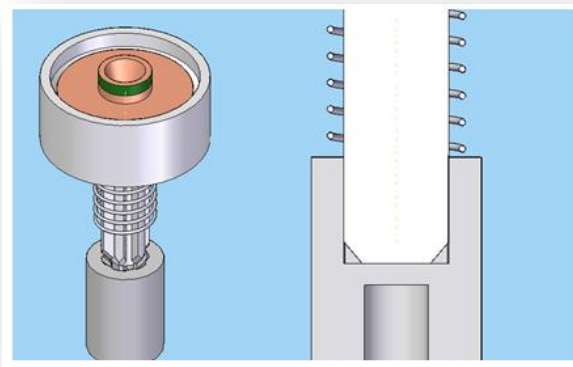


Figura 3.31) Engate do veio estriado no cubo.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

A segunda solução modelada para o sistema de aperto, foi a solução das patelas com posicionadores de bola. Esta solução é mais complexa em termos de componentes do que a anterior, no entanto, parece oferecer mais fiabilidade e facilidade de funcionamento. Neste caso o engate entre o veio do Porta-nozzle e o veio motor é conseguido através do uso de duas patelas em alumínio. A patela que se encontra ligada ao veio do Porta-nozzle contém um rasgo circular e 12 furos que se destinam respectivamente a oferecer guiamento e capacidade de engate à bola de cada posicionador que está roscado na patela inferior.

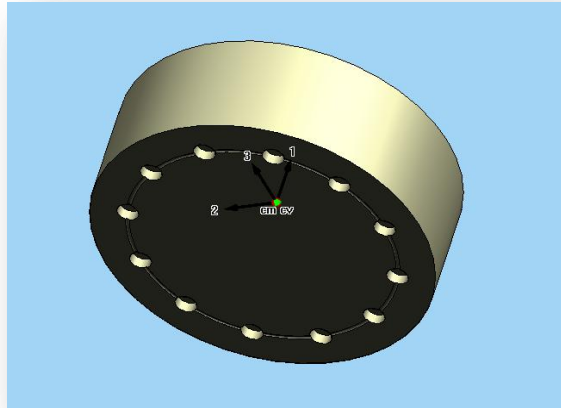


Figura 3.32) Rasgo circular e orifícios para engate dos posicionadores de bola na patela do veio do Porta-nozzle.

Quando a cabeça encosta e empurra o Porta-nozzle para baixo, a patela que contém os rasgos encosta na que está ligada ao cubo estriado e comprime as esferas para o interior do corpo do posicionador. Assim que o motor inicia o funcionamento, o cubo estriado e a patela que contém os posicionadores começam a rodar, até que as esferas encontrem os orifícios de posicionamento na patela do Porta-nozzle. Quando se dá este encontro, as esferas saem do corpo do posicionador e alojam-se nos orifícios, permitindo assim que o Porta-nozzle também rode e, por conseguinte, consiga apertar o nozzle na cabeça.

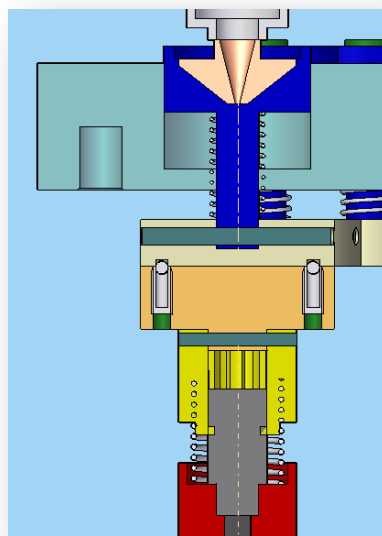


Figura 3.33) Sistema de aperto de patelas com posicionadores de bola.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Como já deu para perceber, através do subcapítulo 3.4.1.3, a solução das patelas acabou por ser a escolhida para equipar o prato giratório porque apesar de ser composta por um maior número de componentes se apresenta como uma solução mais eficaz.

A solução dos veios escariados comporta menos componentes, mas levanta mais dúvidas em termos de funcionamento, pois obriga a que o contacto entre o veio e o cubo seja suficientemente forte para fazer rodar o veio motor para a posição correcta. No caso da solução das patelas é a própria rotação do motor, durante o funcionamento, que se encarrega de engatar as esferas nos orifícios da patela do Porta-nozzle, permitindo assim a transmissão de rotação. Outra das razões para se considerar esta solução mais aceitável, prende-se com o facto de se poder utilizar os posicionadores como limitadores de binário, isto é, pode-se seleccionar um determinado posicionador de modo a que este retraia as esferas para o interior do seu corpo assim que é atingido um determinado valor de binário. Desta forma é possível desengatar o veio motor do veio Porta-nozzle quando o nozzle já está totalmente roscado na cabeça, diminuindo-se assim, a preponderância da ligação por atrito entre o nozzle e o respectivo Porta-nozzle.

3.4.1.5 Dimensionamento do sistema

A solução do prato rotativo não foi devidamente explorada em termos de cálculo pois, o seu projecto foi abandonado numa fase muito inicial do desenvolvimento, no entanto, foram efectuados alguns cálculos com vista a dimensionar as molas de compressão, o motor de accionamento do sistema de aperto e ainda a ligação por atrito entre o nozzle e o Porta-nozzle. Estes três parâmetros são extremamente importantes para o correcto funcionamento do sistema pelo que se tentou obter uma resposta para cada um. Contudo, dada a condicionante referida acima, é natural que os valores obtidos possam não ser os mais indicados, no entanto, servem como base de referência caso alguém tente implementar esta solução mais tarde.

3.4.1.5.1 Dimensionamento das molas de compressão

O sistema do prato rotativo preconiza, como já foi explicado, a utilização de duas molas de compressão. A mola do Porta-nozzle destina-se única e simplesmente a manter este componente na posição de descanso, enquanto a do veio estriado serve para aumentar o atrito entre o nozzle e o Porta-nozzle e melhorar a ligação entre as duas patelas cilíndricas. Tendo em conta que o bom funcionamento do sistema de aperto depende destas duas molas procurou-se dimensioná-las, tendo em conta os seguintes três parâmetros:

- **O espaço disponível para a instalação;**
- **A necessidade de a mola ser instalada com pré-compressão de modo a que ao ser actuada já se encontre na fase linear de funcionamento;**
- **Escolha de uma mola com um baixo coeficiente de elasticidade, de modo a que força efectuada não seja demasiadamente elevada e, por conseguinte, não danifique o suporte cerâmico da cabeça;**

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Após o desenho do sistema o espaço disponível para a colocação das molas é o evidenciado na figura seguinte.

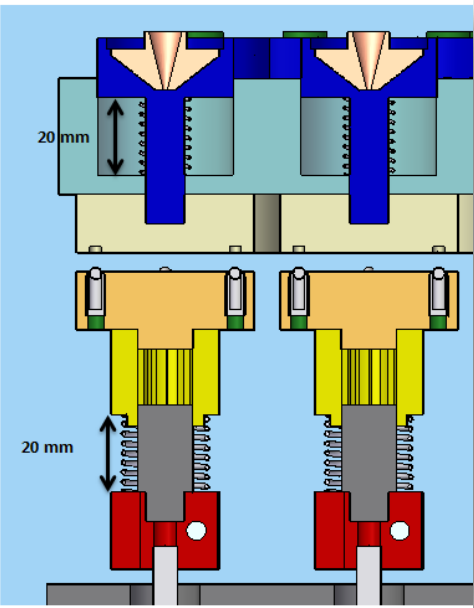


Figura 3.34) Espaçamento vertical disponível para a colocação das molas de compressão.

Segundo o livro “Machine Design”, uma mola de secção circular funciona de forma linear quando é comprimida entre 15% e 85% da sua deformação máxima [19]

Tendo em conta esta informação e sabendo o diâmetro do veio do Porta-nozzle (12 mm) e do veio estriado (20 mm), escolheram-se as seguintes molas da MIZUMI:

- **Mola para o Porta-nozzle: MIZUMI WR 13 – com 25 mm de comprimento**
- **Mola para o veio estriado: MIZUMI WR 22 – com 25 mm de comprimento**

A tabela seguinte apresenta as características principais destas molas.

Tabela 7) Características das molas de compressão escolhidas.

Fabricante	Modelo	Comp. [mm]	K [N/mm]	Ø [mm]	Ø secção [mm]	Deformação máxima [mm]	F. máx. (N)
MIZUMI	WR 22 - L25	25	0,5	22	1,2	15	0,5*15=7,5
	WR 13 - L25	25	0,3	13	0,8	15	0,3*15=4,5

Com base nestas especificações e nas informações recolhidas no livro “Machine Design”, calculou-se a pré-deformação mínima que cada mola deve ter, para que ao ser comprimida pela cabeça já se encontre na fase linear de funcionamento.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Tabela 8) Limites de funcionamento linear para cada mola.

Características	Modelo	
	WR 22	WR 13
Deformação máxima [mm]	15	15
Limite inferior de funcionamento [mm]	0,15*15=2,25	0,15*15=2,25
Limite superior de funcionamento [mm]	0,85*15=12,75	0,85*15=12,75

A análise da tabela anterior permite concluir que ambas as molas devem ser instaladas com uma pré-compressão mínima de 2,25 mm e que não podem ser deformadas acima dos 12,75 mm. A primeira condição está assegurada, uma vez que as molas apresentam um comprimento sem deformação de 25 mm e estão instaladas num espaçamento de 20 mm, isto é, apresentam uma pré-compressão de 5 mm. A segunda condição indica que a cabeça de corte não pode comprimir as molas acima dos 12,75 mm. Esta condição também é respeitada, pois as molas do Porta-nozzle e do veio estriado são comprimidos 12 mm (7 mm para avanço mais 5 mm de pré-compressão) e 10 mm (5 mm de avanço mais 5 mm de pré-compressão), respectivamente.

Tendo-se determinado a deformação máxima admissível e conhecendo os valores do coeficiente de elasticidade, é possível calcular as forças máximas e mínimas exercidas por cada mola, respectivamente antes de se iniciar o aperto e o desaperto, através da seguinte equação:

$$F = K * \Delta l$$

Tabela 9) Forças máximas exercidas pelas molas quando são comprimidas com vista a efectuar o aperto do nozzle.

Fabricante	Modelo	Deformação máxima [mm]	K [N/mm]	F. máx. [N]
MIZUMI	WR 22 - L25	10	0,5	5
	WR 13 - L25	12	0,3	3,6

Tabela 10) Forças mínimas exercidas pelas molas quando são comprimidas com vista a efectuar o desaperto do nozzle.

Fabricante	Modelo	Deformação mínima [mm]	K [N/mm]	F. mín. [N]
MIZUMI	WR 22 - L25	6	0,5	3
	WR 13 - L25	8	0,3	2,4

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

As tabelas anteriores permitem concluir que a mola mais preponderante para o sistema é a do veio estriado, pois apresenta forças superiores às da mola do Porta-nozzle. A força mínima exercida por esta mola é particularmente importante, pois vai ser utilizada mais à frente no dimensionamento da ligação por atrito entre o nozzle e o Porta-nozzle.

3.4.1.5.2 Dimensionamento dos motores de aperto

A escolha dos motores de aperto foi efectuada tendo em conta 3 parâmetros:

- **Binário máximo de aperto/desaperto;**
- **Velocidade de rotação para o aperto/desaperto;**
- **Força axial exercida pelos componentes do sistema de aperto sobre o veio motor;**

O binário e a velocidade de rotação do sistema de aperto/desaperto já foram definidos nas especificações de produto, sendo respectivamente 0,1 Nm e 50 Rpm. Tendo em conta este valor de binário, o motor escolhido será sobredimensionado no mínimo três vezes de maneira a absorver as perdas decorrentes da rotação dos diversos componentes.

A força axial exercida sobre o veio motor é obtida através da soma dos pesos dos componentes do sistema de aperto (abraçadeira, veio, cubo e patela dos posicionadores) e da força exercida pela mola que rodeia o veio estriado, que como já foi visto é superior à força da mola do porta-nozzle (a mola do Porta-nozzle apresenta um valor de K inferior, pelo que a força que exerce é inferior à da mola do veio estriado). Em seguida vai ser calculada a força axial máxima exercida sobre o veio motor.

Tabela 11) Força axial exercida pelos componentes suportados pelo veio do motor e pela mola de compressão, para um deslocamento máximo de 10 mm.

Componente	Material	Peso [Kg]	Força [N]
Porta-nozzle (3)	Alumínio	0,033	$0,033 \cdot 9,8 = 0,32$
Patela Posicionadora (7)	Alumínio	0,067	$0,067 \cdot 9,8 = 0,66$
Cubo estriado (9)	Aço Ck 45	0,088	$0,088 \cdot 9,8 = 0,86$
Veio estriado (11)	Aço Ck 45	0,026	$0,026 \cdot 9,8 = 0,25$
Abraçadeira (12)	Alumínio	0,03	$0,03 \cdot 9,8 = 0,29$
Mola do veio estriado (10)	Aço	$5/9,8 = 0,5$	5
Total			7,39

A força máxima exercida pela mola de compressão do veio estriado é obtida para um deslocamento de 10 mm.

Tendo em conta o valor de força axial obtido, a velocidade de rotação e o binário de aperto escolheu-se o seguinte motor de passo da NANOTEC:

- **ST5918M1008**

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Este motor apresenta as seguintes características:

- **Binário máximo:** 1,074 Nm
- **Força axial admissível:** 10 N
- **Banda de rotação de funcionamento:** 10 a 1000 Rpm

O binário máximo produzido por este motor é cerca de 10 vezes superior ao necessário, no entanto, como a gama inferior de motores deste fabricante só suporta 7 N de força axial sobre o veio, optou-se por este modelo por forma a respeitar os cálculos. Em anexo (Anexo A) são fornecidas as especificações de motor e as suas curvas de funcionamento. [20]

3.4.1.5.3 Dimensionamento da ligação por atrito entre o nozzle e o Porta-nozzle

Um dos aspectos mais importantes deste sistema está relacionado com a ligação entre o nozzle e o Porta-nozzle. Uma vez que a transmissão de rotação entre estes dois componentes é efectuada por atrito, é necessário escolher bem o material do Porta-nozzle e garantir que a força aplicada neste componente é suficiente para fazer rodar o nozzle sem escorregamento.

Desta forma, definiu-se que o Porta-nozzle será construído em alumínio, pois este material é extremamente macio e apresenta um coeficiente de atrito de aproximadamente 0,57 [21], quando em contacto com o cobre. Este valor foi estimado efectuando a média entre o coeficiente de atrito do cobre/aço e o do Alumínio/aço, que são respectivamente 0,53 e 0,61. [22] Uma vez que a força exercida pela mola já é conhecida e que o binário de aperto também já foi definido, é possível dimensionar a ligação entre os dois componentes.

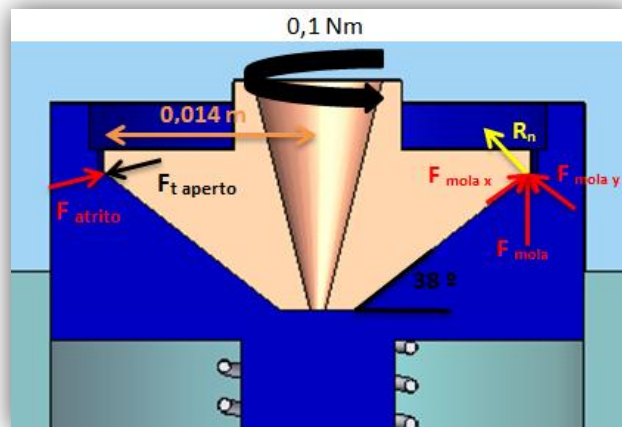


Figura 3.35) Esquema das forças de ligação entre o Porta-nozzle e o nozzle.

Através da figura 3.35 é possível verificar que existe uma relação directa entre a força de atrito (tangencial) e a força tangencial de aperto. Desta forma, para que o nozzle rode de forma solidária com o Porta-nozzle é necessário que a força de atrito seja sempre superior à força tangencial de aperto/desaperto durante toda a operação. Em termos de

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

atrito, a fase mais adversa é quando se inicia a operação de desaperto, pois a deformação inserida na mola é mínima e o binário de aperto requerido é máximo. Desta forma, a ligação por atrito vai ser dimensionada para este caso, pois é a situação mais desfavorável que pode existir durante a troca do nozzle. A tabela seguinte apresenta os parâmetros necessários para se efectuar o dimensionamento desta ligação.

Tabela 12) Parâmetros necessários para o dimensionamento da ligação por atrito

Binário de aperto [Nm]	Coefficiente de atrito (μ)	Força mínima exercida pela mola [N]	Braço da força tangencial (b) [mm]
0,1	0,57	3	14

Desta forma tem-se o seguinte:

$$F_{\text{tangencial aperto}} = \frac{M}{b} \Leftrightarrow F_{\text{tangencial aperto}} = \frac{0,1}{0,014} \Leftrightarrow F_{\text{tangencial aperto}} = 7,14 \text{ N}$$

$$F_a = \mu * R_n \Leftrightarrow F_a = 0,57 * F_{\text{mola}} * \cos 38 \Leftrightarrow F_a = 0,57 * 3 * \cos 38 \Leftrightarrow F_a = 1,35 \text{ N}$$

Através deste cálculo, verifica-se que a força exercida pela mola é insuficiente para fazer rodar o nozzle e o Porta-nozzle de forma solidária. Para resolver esta situação pode-se utilizar uma mola com um coeficiente de elasticidade superior ou então revestir o Porta-nozzle com uma tinta aderente de borracha. A segunda solução parece mais interessante, pois a utilização de uma mola com maior coeficiente de elasticidade pode induzir uma força muito elevada no suporte cerâmico da cabeça e, por conseguinte, danificá-lo.

De qualquer forma, este problema pode nem ser muito importante, pois o valor do binário de aperto/desaperto é estimado, pelo que se na realidade o seu valor for inferior a força tangencial também o vai ser, havendo assim uma aproximação maior entre a força de atrito e a componente tangencial do aperto. Esta é uma daquelas situações que só poderá ser resolvida de forma correcta através da construção de um protótipo.

3.4.1.6 Sequência de montagem

O desenvolvimento de um sistema mecânico implica atenção a diversos pormenores, entre os quais a sequência de montagem. Não importa o quão bom é um sistema se não existir uma sequência lógica e funcional que permita efectuar a sua montagem e desmontagem de forma correcta. O desenvolvimento desta solução foi efectuada tendo em conta esta necessidade, pelo que em seguida é apresentada a sequência de montagem geral, que por sua vez está dividida em 3 submontagens a ser abordadas separadamente.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

➤ Montagem do prato rotativo

Para se efectuar a montagem do prato rotativo é necessário colocar cada Porta-nozzle e a respectiva mola num “slot” de armazenamento. Para isto, deve-se inserir primeiro a mola no veio e em seguida colocar os dois componentes no interior dos “slots”, efectuando-se uma ligeira pressão com vista a fazer passar a ponta do veio pelo orifício existente no fundo. Em seguida, aproxima-se a patela cilíndrica pela parte inferior do prato e efectua-se o encaixe desta no veio do Porta-nozzle. Finalmente, coloca-se a cavilha cilíndrica para efectuar a prisão da patela ao Porta-nozzle.

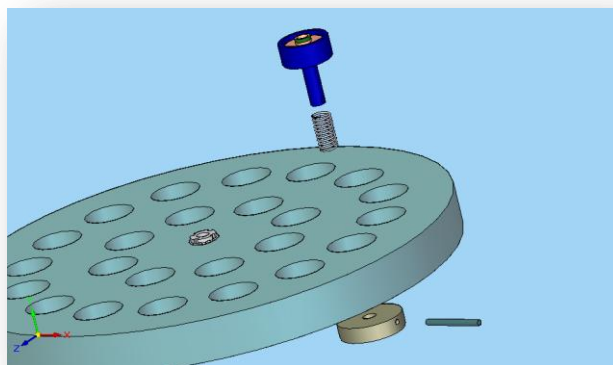


Figura 3.36) Esquema representativo da montagem do prato rotativo.

➤ Montagem da placa inferior

Esta submontagem inicia-se com o aperto dos 3 motores e do cilindro de encravamento à parte inferior da placa. Assim que os motores estão em posição, é possível efectuar a montagem do veio de transmissão central que se destina a fazer rodar o prato giratório. Para isto, prende-se o veio de transmissão ao veio motor, através do acoplamento rígido, e em seguida aperta-se o tubo guia na placa. Quando estes dois componentes estão na posição correcta insere-se o rolamento no veio, até que este encontre o seu batente no interior do tubo guia, e por fim coloca-se o freio exterior com vista a imobilizar o rolamento.

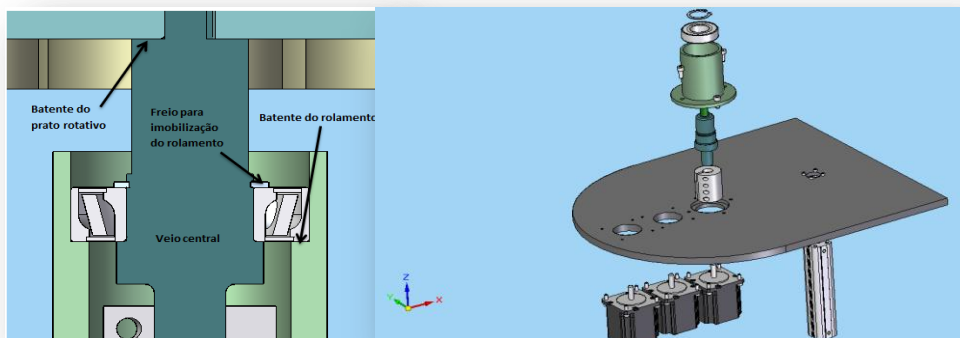


Figura 3.37) Pormenor de prisão do rolamento e esquema representativo da montagem da placa inferior.

➤ Montagem dos sistemas de aperto

A primeira operação a efectuar para a montagem dos sistemas de aperto consiste em inserir o veio estriado no interior do cubo, pela parte superior deste último, uma vez que tanto o cubo como o veio contêm um batente cada, que impede que o primeiro salte para fora do segundo. Seguidamente insere-se a patela de alumínio, já com os posicionadores de bola apertados, no interior do cubo e efectua-se a prisão dos dois componentes por intermédio de uma cavilha cilíndrica. Por fim coloca-se a mola em torno do veio e insere-se a parte não estriada deste componente na abraçadeira.

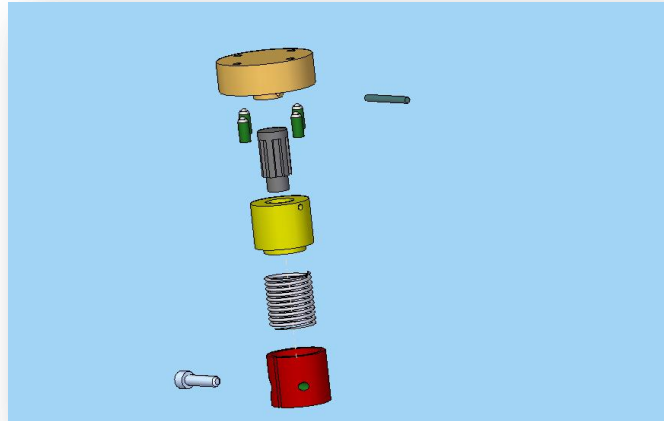


Figura 3.38) Esquema representativo da montagem dos sistemas de aperto.

Quando as 3 submontagens estão concluídas é necessário efectuar a montagem final. Para isto basta inserir a abraçadeira de cada sistema de aperto no respectivo veio motor e apertar o parafuso, de modo a que todo o sistema de aperto rode de forma solidária com o motor. Em seguida insere-se o prato rotativo no veio de transmissão central e efectua-se a prisão dos dois componentes recorrendo para esse efeito à anilha e fêmea de segurança.

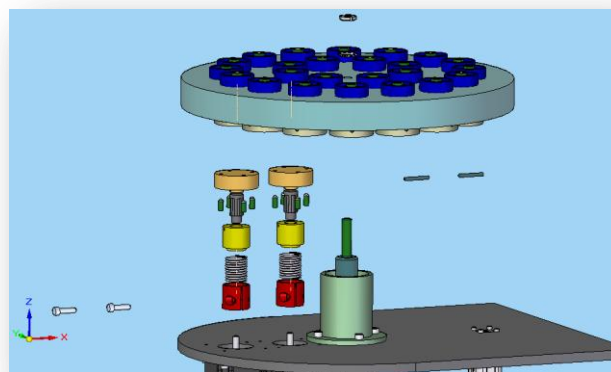


Figura 3.39) Conjugação das 3 submontagens com vista a obter a montagem final do sistema

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

3.4.1.7 Conclusão relativa à solução

Após o desenvolvimento desta solução é possível afirmar que os objectivos mínimos foram atingidos. Inicialmente foi definido que o sistema deveria apresentar dimensões transversais, longitudinais e verticais de 600 mm, 400 mm e 270 mm, respectivamente. Na figura abaixo é possível verificar que a cota transversal foi amplamente respeitada, no entanto, a cota longitudinal ultrapassou o valor de referência por 20 mm. Este resultado não é problemático, pois basta subir ligeiramente todo o sistema por forma a evitar que a placa inferior embata nas dobradiças da porta. Em termos verticais o sistema desenhado apresenta 208 mm de altura, valor bastante abaixo dos 270 mm de referência. Deve-se referir que esta cota vertical foi medida desde o fundo do motor até ao topo do nozzle, excluindo-se desta forma o valor do cilindro de encravamento. A razão para a exclusão tem a ver com o facto de o cilindro nunca chegar a entrar na área de corte, pelo que não faz qualquer sentido utilizar as suas dimensões para obter o avançamento vertical do sistema.

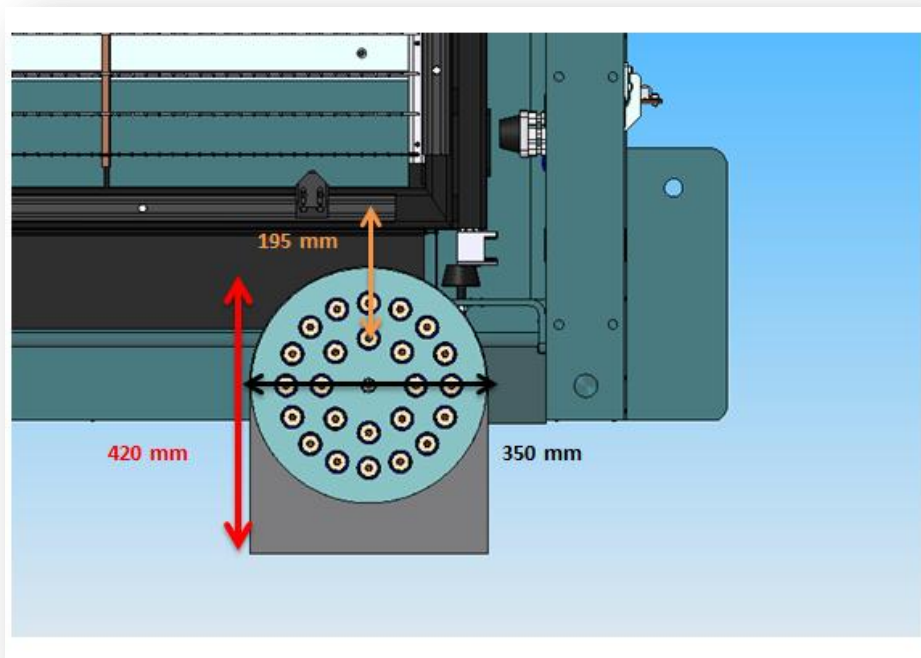


Figura 3.40) Representação da dimensão transversal e longitudinal do sistema e do curso de accionamento necessário.

Os 195 mm de curso de accionamento, evidenciados na figura anterior, também respeitam o objectivo deste sistema. Como é sabido, quanto maior o valor de curso de translação necessário para fazer entrar o sistema na área de corte, maior terão de ser as guias e o cilindro de accionamento, pelo que desta forma interessa minimizar este parâmetro de modo a diminuir as dimensões do sistema.

Os avançamentos são bastante importantes, no entanto, esta solução apresenta outras vantagens mais interessantes. O facto de o sistema apresentar uma cinemática rotativa permite diminuir os movimentos da cabeça de corte e aumentar a capacidade de armazenamento, uma vez que a rotação do prato é suficiente para fazer chegar à zona de “Stand By” todos os nozzles. Este prato, com 350 mm de diâmetro e configuração em

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

duas pistas concêntricas, consegue armazenar 24 nozzles, o que é um valor muito acima dos 18 nozzles definidos nas especificações.

Apesar de todas as vantagens referidas este sistema padece de dois problemas que acabaram por levar ao seu abandono. O primeiro tem a ver com o sistema de engate dos veios, que apesar de parecer funcional no papel, pode levar a uma diminuição de fiabilidade da solução. O engate entre os veios do Porta-nozzle e do motor exige o correcto alinhamento de todos os componentes e, a definição de valores extremamente exactos para a velocidade e binário de aperto. Tendo em conta que o binário e a velocidade apresentam valores estimados, é muito fácil errar no dimensionamento dos posicionadores de bola e, como tal, inserir um erro elevado no sistema, que em última análise pode provocar um funcionamento deficiente.

O segundo problema tem a ver com a precisão de funcionamento do prato rotativo. A rotação do prato rotativo é conseguida através do uso de um motor de passo que, como já foi referido, apresenta sempre um erro de repetibilidade de posição, isto é, sempre que o prato roda um determinado ângulo, a posição final vem afectada de um pequeno desvio em relação ao valor esperado, pelo que quanto maior o ângulo de rotação maior o erro de posicionamento entre o nozzle e a cabeça. Como o alinhamento entre o nozzle e a cabeça tem de ser perfeito, o uso de um motor de passo por si só não é suficiente, pelo que desta forma se recorreu a um cilindro pneumático de duplo efeito para encravar o prato na posição exacta. Esta solução resolve o problema, no entanto, é possível que o embate constante entre a haste do cilindro e o prato possa provocar danos, nomeadamente o empeno do veio central. Assim, decidiu-se que a única forma de colocar este sistema a funcionar passa por substituir o motor central por um prato divisor, no entanto, esta solução tem custos avultadíssimos que acabaram por levar ao abandono do modelo do prato rotativo.

Tendo em conta que estes dois problemas apresentam uma elevada preponderância para o correcto funcionamento do sistema de troca de nozzle, decidiu-se modelar uma nova solução com o intuito de os eliminar.

3.4.2 Gaveta

3.4.2.1 Motivações

A solução da gaveta nasceu com o objectivo de eliminar os problemas verificados na solução do prato rotativo. Desta forma idealizou-se um sistema assente nas duas seguintes premissas:

- **Existência de contacto constante entre o veio motor e o Porta-nozzle;**
- **Definição de uma posição estática para cada Porta-nozzle;**

Por forma a eliminar o problema do engate entre os veios desenvolveu-se um sistema que permite o contacto constante entre o motor e cada Porta-nozzle. Sendo a gaveta composta por vários Porta-nozzle, o contacto constante só poderia acontecer utilizando um sistema de engrenagens ou de polias. Neste caso particular optou-se pelo sistema de engrenagens, pois é mais fácil fazer rodar todos os Porta-nozzle no mesmo sentido, bastando para isso colocar uma roda intermédia entre cada um. A solução das polias

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

obrigava à criação de uma cadeia cinemática bastante intrincada, pelo que foi abandonada.

O problema de posicionamento resolveu-se da forma mais simples possível, isto é, eliminou-se o movimento de cada Porta-nozzle definindo-se uma posição estática e constante para cada um. Desta forma, como cada Porta-nozzle tem coordenadas de posicionamento extremamente bem definidas elimina-se o problema da precisão, pois a cabeça sabe o posicionamento exacto de cada nozzle no interior da gaveta, tendo apenas de movimentar o seu eixo para as coordenadas pré-definidas de cada um.

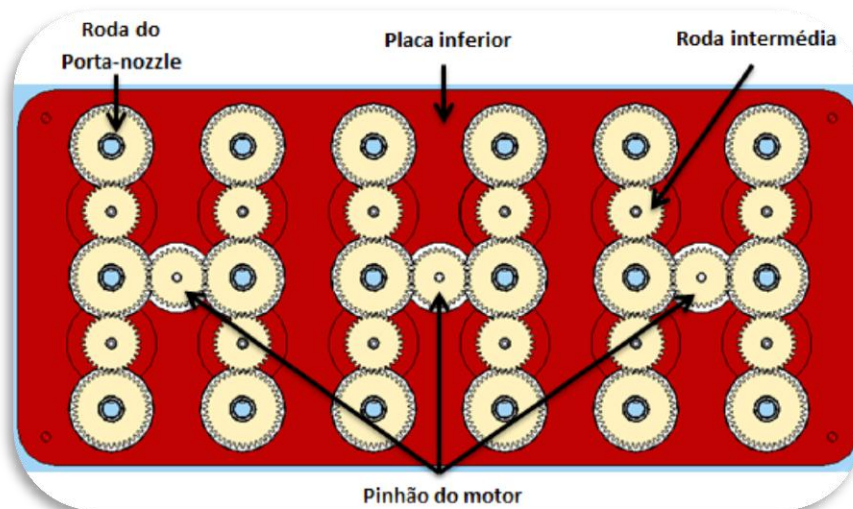


Figura 3.41) Representação da cinemática do sistema de gaveta. Esta figura evidencia o posicionamento estático das rodas de acoplamento ao Porta-nozzle e ainda a cadeia de transmissão desenvolvida por forma a fazer chegar a cada Porta-nozzle a rotação do motor.

Estando estes dois problemas resolvidos procurou-se aproveitar algumas das premissas utilizadas para o desenvolvimento da solução do prato rotativo, nomeadamente a maximização de capacidade e a diminuição do curso de accionamento, tendo-se desprezado a minimização dos movimentos da cabeça. Esta última premissa é impossível de obter com esta configuração, porque o posicionamento estático de cada Porta-nozzle obriga sempre a cabeça a deslocar-se sobre a gaveta em busca do nozzle pretendido. No entanto, este problema não é grave, pois os centros de corte laser da ADIRA utilizam motores lineares nos três eixos, conseguindo assim movimentar-se no interior da área de corte de forma rápida e extremamente precisa.

A maximização da capacidade de armazenamento para este caso concreto depende do valor de entre-eixo definido para cada engrenagem. Desta forma, durante o desenvolvimento da cadeia cinemática foram testados vários tipos de engrenagens com o intuito de otimizar o valor do entre-eixo e, por conseguinte, obter um sistema final com boa capacidade e baixo atravancamento. A solução final tem capacidade para 18 nozzles, tal como definido nas especificações, no entanto numa fase inicial foi desenvolvido um sistema com capacidade para 24, com o intuito de efectuar uma comparação directa em termos de atravancamento com o sistema do prato rotativo.

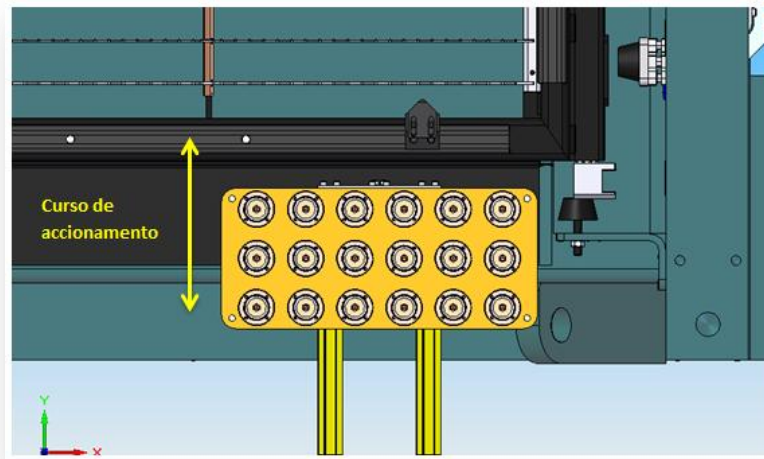


Figura 3.42) Curso de accionamento necessário para fazer entrar a gaveta na área de corte.

A diminuição de curso de accionamento está relacionada com a disposição dos nozzles na gaveta e ainda com o valor do entre-eixo das diversas engrenagens. Desta forma, procurou-se desenhar o sistema de maneira a aproveitar o excesso de espaço transversal, diminuindo assim o atravancamento longitudinal e por conseguinte o valor do curso de accionamento. A solução final, exemplificada na figura 3.42, consiste numa gaveta rectangular com os nozzles dispostos numa matriz 3x6. Comparando esta disposição com a possível utilização de uma matriz 6x3, que também foi equacionada por forma a aumentar o espaçamento em relação ao corte de tubo, verifica-se que o curso de accionamento necessário diminuiu para metade, pelo que se pode considerar como uma boa solução.

3.4.2.2 Constituintes do sistema

O sistema de gaveta apresenta uma cinemática bastante simples composta por uma cadeia de engrenagens de dentado recto, fabricadas em Poliacetal (Delrin), que transmite a rotação do motor a cada Porta-nozzle. Estruturalmente o sistema é composto por duas placas rectangulares de alumínio que têm as seguintes funções:

- **Placa inferior:** Suportar os motores de aperto, acomodar as engrenagens e as tampas de posicionamento dos rolamentos;
- **Placa superior:** Acomodar o conjunto superior de rolamentos e os sistemas de aperto;

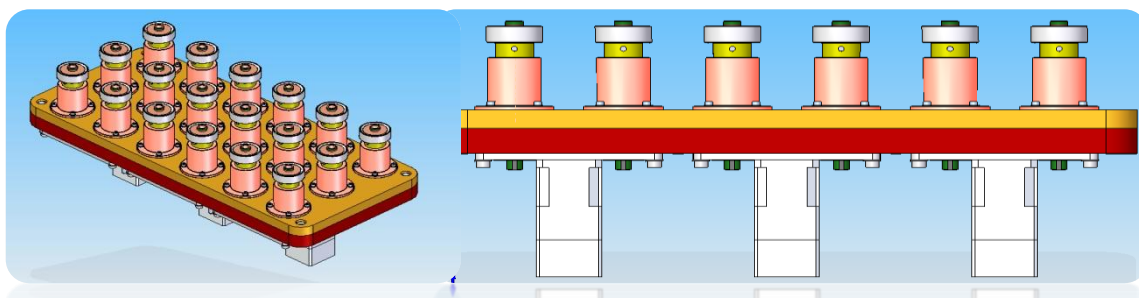


Figura 3.43) Sistema de gaveta desenvolvido na sua configuração final.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Em termos de motorização, o sistema final é composto por 3 motores de passo que alimentam respectivamente uma matriz 3x2. O sistema total é formado por uma matriz 3x6, no entanto, por forma a melhorar o rendimento do sistema dividiu-se a matriz principal em 3 matrizes mais pequenas, sendo cada uma alimentada por um motor. Esta divisão está implícita na figura seguinte.

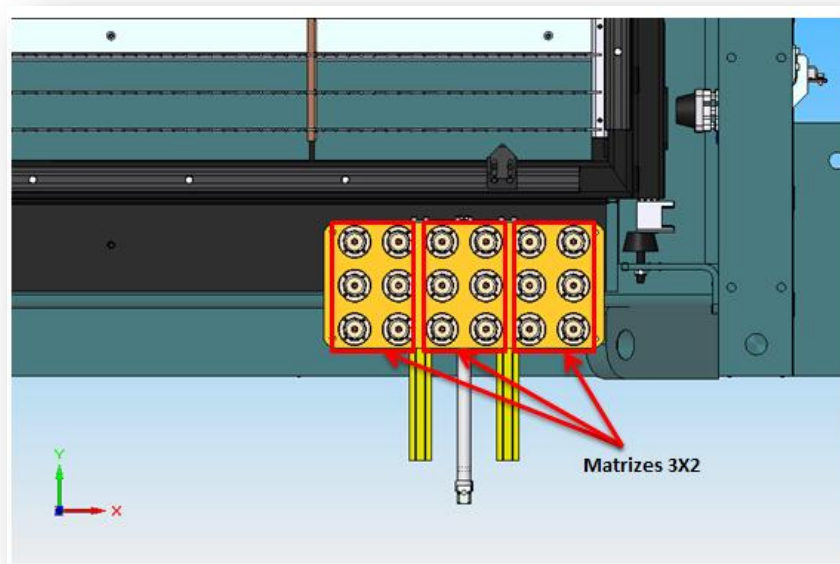


Figura 3.44) Subdivisão da matriz principal 3x6 em 3 matrizes mais pequenas 3x2.

O sistema de gaveta é composto por 23 componentes individuais que estão evidenciados nas figuras 3.45, 3.46 e 3.47. Os constituintes principais são as placas de alumínio superior (1) e inferior (2) que se destinam, como já foi referido, a acomodar os rolamentos e as engrenagens. Cada uma destas placas contém 18 orifícios passantes que servem para acomodar os sistemas de aperto, que por sua vez são compostos por 15 componentes individuais. O elemento principal deste sistema é o Porta-nozzle (4), cuja forma cônica se destina a acomodar e fornecer área de contacto ao nozzle (3). Este componente vai ser inserido no interior de um cubo estriado (6), sendo a prisão entre estes dois componentes conseguida por intermédio de uma cavilha cilíndrica (5). O cubo estriado translada na vertical em relação a um veio estriado (7), sendo mantido na posição indicada na figura por acção de um tubo exterior em alumínio (16), que se encontra embutido na placa superior, e por uma mola de compressão (9). Esta mola, para além da função já referida é também responsável por maximizar o contacto entre o nozzle e o Porta-nozzle, através da força vertical que exerce quando é comprimida durante a operação de troca. A mola está apoiada numa anilha torneada (9) que é composta por 3 rebaixos. O rebaixo superior destina-se a manter a mola em posição e impedir que esta se desloque ao ser comprimida, o intermédio serve para acomodar o veio estriado e o da face inferior tem por objectivo impedir o contacto da anilha com a pista fixa do rolamento. Desta forma, quando o sistema inicia a rotação todos os componentes apresentados até aqui giram de forma solidária, evitando-se assim a existência de atritos desnecessários.

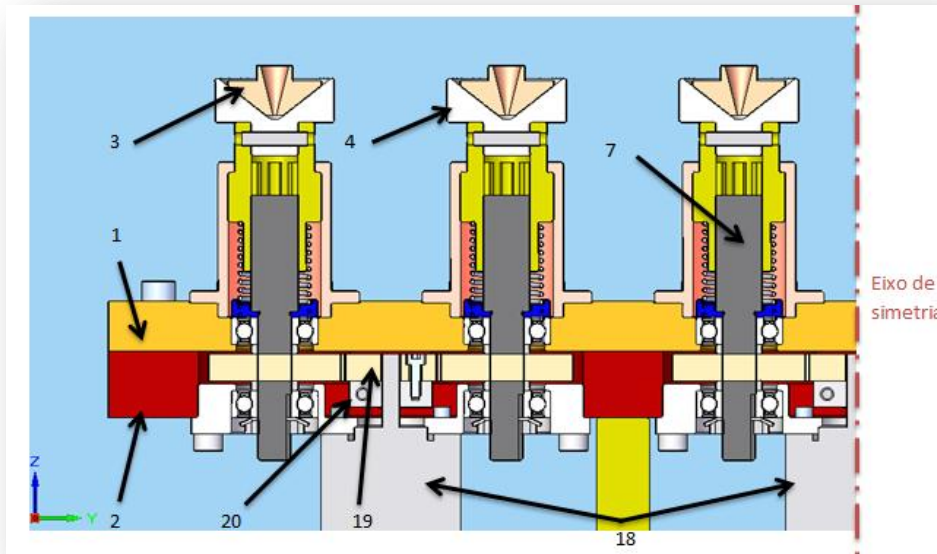


Figura 3.45) Vista em corte do plano transversal da gaveta.

O posicionamento do sistema de aperto é conseguido através dos rolamentos 10 e 12. O rolamento 10 está embutido na placa superior (1) enquanto o rolamento 12 se encontra inserido numa tampa de alumínio (17), que por sua vez está presa à placa inferior por intermédio de 4 parafusos. Estas tampas (17) foram criadas com o objectivo de facilitar a substituição das engrenagens, dos rolamentos e do motor, eliminando-se assim a necessidade de desmontar todo o sistema em caso de avaria de algum destes componentes.

A imobilização dos rolamentos é conseguida através da utilização de uma anilha (14) e de uma fêmea de segurança (13), que ao ser apertada no veio estriado comprime o rolamento 12 contra a tampa de alumínio e obriga o veio estriado a deslocar-se para baixo. Este movimento do veio empurra a anilha torneada (9) contra o rolamento 10, que por sua vez fica apertado contra um batente existente na placa superior (1). Para imobilizar axialmente a roda dentada (15) do veio estriado foram adicionadas duas anilhas exactamente iguais (11), que vão ficar comprimidas entre os rolamentos e este componente.

Com já foi referido na, secção introdutória, este sistema contém três motores de passo (18) que alimentam, de forma independente ou consertada, cada uma das matrizes 2x3 criadas. Cada um destes motores tem um pinhão (19) em Poliacetal na ponta do veio, que se destina a transmitir a rotação para as rodas do veio estriado, sendo a prisão entre estes dois componentes conseguida através de uma

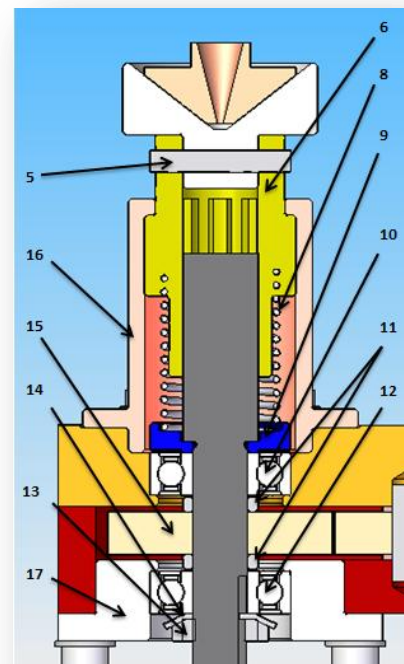


Figura 3.46) Vista em corte do sistema de aperto.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

abraceadeira (20). Esta abraçadeira contém num dos topos 3 furos roscados que servem para prender o pinhão.

Para se conseguir que todos os sistemas de aperto girem no mesmo sentido foram colocados rodas intermédias entre eles (21). Estas rodas giram em torno de cavilhas cilíndricas (22), que para além desta função servem ainda para garantir o posicionamento relativo entre as placas superior e inferior. Para garantir a imobilização axial das rodas intermédias adicionaram-se duas anilhas de chapa (cortadas a laser) entre este componente e as duas placas.

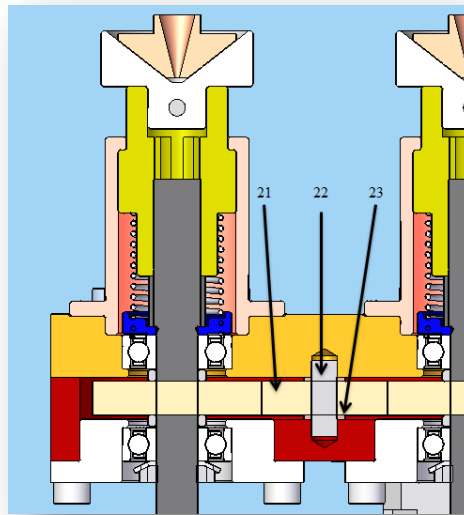


Figura 3.47) Vista em corte do plano longitudinal da gaveta.

3.4.2.3 Princípio de funcionamento

Agora que foram apresentados os 23 componentes que constituem o sistema torna-se mais fácil explicar e compreender o funcionamento deste modelo.

A substituição de um nozzle comporta duas operações distintas que são o aperto e o desaperto. Estas duas operações são extremamente parecidas excepto no que toca ao pré-curso inicial infligido à mola, que no caso do aperto é maior. Durante o aperto a mola vai esticando e, por conseguinte, diminuindo a sua deformação passando-se exactamente o oposto no desaperto. De seguida vai ser explicada a operação de aperto fazendo-se no entanto referência à operação contrária sempre que exista alguma diferença importante.

Admitindo que a cabeça se encontra sem o nozzle, a operação de aperto tem início com a translação da gaveta para o interior da área de corte, tal como exemplifica a figura seguinte.

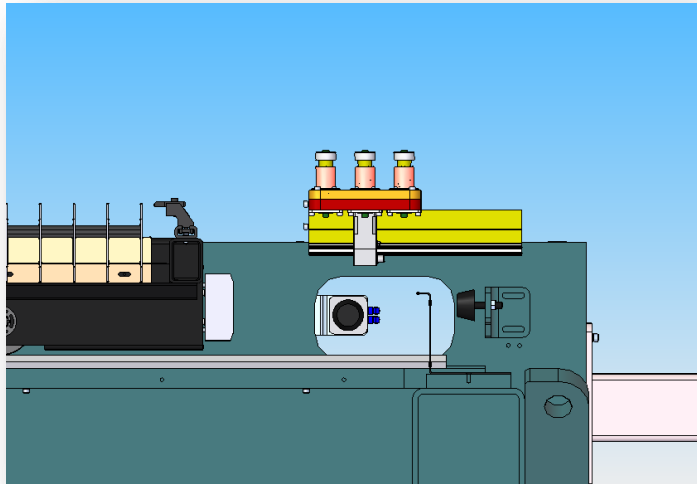


Figura 3.48) Translação da gaveta para o interior da área de corte.

Assim que a gaveta está devidamente posicionada, a cabeça de corte dirige-se para cima desta e alinha o seu eixo com o do nozzle pretendido. Quando o alinhamento entre a cabeça e o nozzle é perfeito, a primeira avança na vertical sobre o segundo até que o suporte cerâmico entre em contacto com o nozzle. Esta operação está exemplificada na figura 3.49.

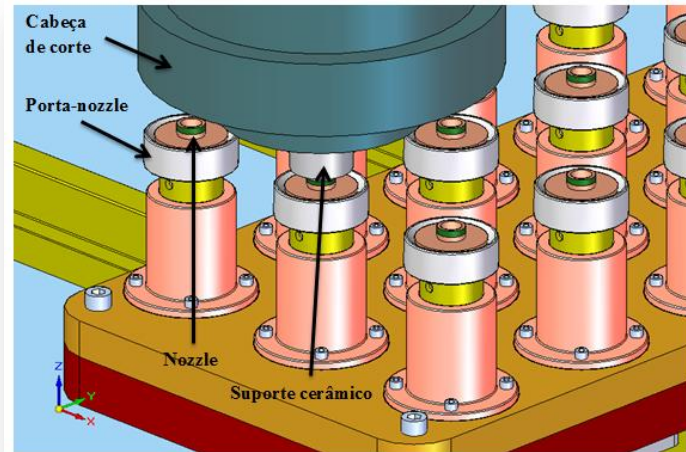


Figura 3.49) Alinhamento do eixo da cabeça de corte com o do nozzle pretendido.

Após o primeiro contacto entre o suporte cerâmico e o nozzle, a cabeça volta a efectuar um avanço vertical de 10 mm com o intuito de comprimir a mola que rodeia o cubo e o veio estriado. Os objectivos da compressão desta mola são os seguintes:

- **Aumentar a força de ligação entre o nozzle (3) e o Porta-nozzle (4), de forma a aumentar o atrito entre estes dois componentes;**
- **Garantir que existe contacto constante entre o Porta-nozzle e o nozzle durante o aperto/desaperto.**

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

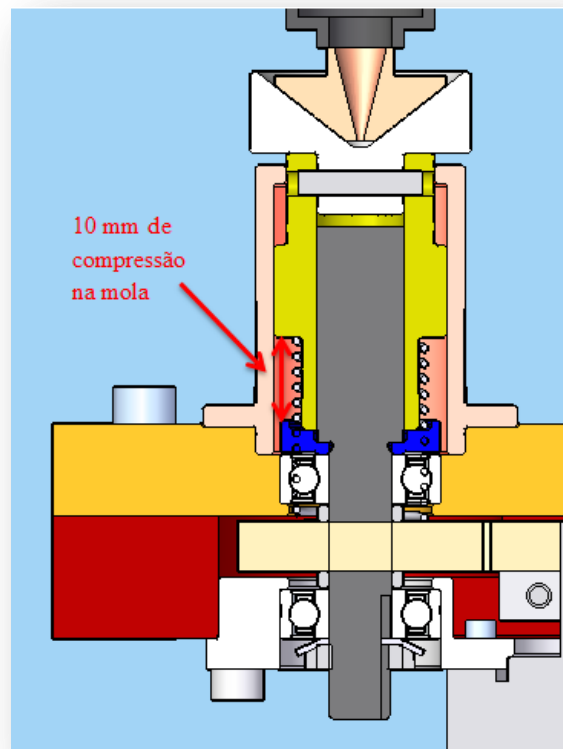


Figura 3.50) Compressão da mola que rodeia o veio e o cubo estriado por acção do avanço vertical da cabeça.

Como é possível verificar na figura 3.50, a compressão exercida pela cabeça provoca a translação do cubo em relação ao veio. Por forma a evitar que o curso máximo da mola seja excedido (10,3 mm) foi colocado um batente no cubo, que embate na anilha torneada (9) assim que se atingem os 10 mm de compressão.

Quando o batente do cubo embate na anilha (9), o sistema está preparado para iniciar a operação de aperto do nozzle na cabeça. Para isso, o motor de aperto começa a funcionar e transmite rotação à cadeia de engrenagens, fazendo girar o veio estriado de cada Porta-nozzle. Como foi referido anteriormente existem 3 motores de aperto, uma para cada matriz 3x2 de nozzles, pelo que é possível colocar a funcionar apenas o motor referente à matriz onde está armazenado o nozzle seleccionado. No entanto, existe a opção de utilizar os 3 motores em simultâneo, cabendo à empresa efectuar esta escolha com base nas facilidades/dificuldades de programação associadas. Como existe uma ligação estriada entre o veio e o cubo, a rotação do primeiro provoca um movimento igual no segundo, que por sua vez obriga à rotação do Porta-nozzle. Assim que o Porta-nozzle começa a girar, transmite o movimento (por atrito) para o nozzle que por sua vez inicia o aperto na peça cerâmica. O engrenamento entre os filetes da rosca do nozzle e da peça cerâmica faz com que o primeiro se mova na vertical, permitindo assim que a mola vá descomprimindo lentamente.

Quando o nozzle está correctamente apertado na cabeça, esta última retira a pressão exercida sobre o sistema e a mola empurra o cubo até que este embata nos batentes do tubo guia (16). Por fim a cabeça retira-se de cima da gaveta e esta última translada para fora da área de corte, estando finalizada a operação de aperto.

A operação de desaperto é exactamente igual à de aperto, excepto no que toca aos cursos de compressão da mola. Assim que a gaveta está posicionada na área de corte, a cabeça movimenta-se em direcção ao suporte de nozzle que se encontra vazio e alinha o seu eixo com o deste último. Quando os eixos estão alinhados, a cabeça aproxima o nozzle do Porta-nozzle e encosta o primeiro no cone do segundo. Em seguida, em vez de se efectuar uma compressão de 10 mm tal como no aperto, efectua-se apenas um avanço de 1 mm que se destina apenas a desencostar o cubo do tubo guia. Caso este avanço seja desprezado a operação de desaperto pode decorrer da mesma forma, no entanto, a rotação do cubo em relação ao batente do tubo guia provoca a existência de uma força de atrito, que em última análise vai aumentar a carga exercida sobre o motor, pelo que se aconselha a efectuar o referido avanço.

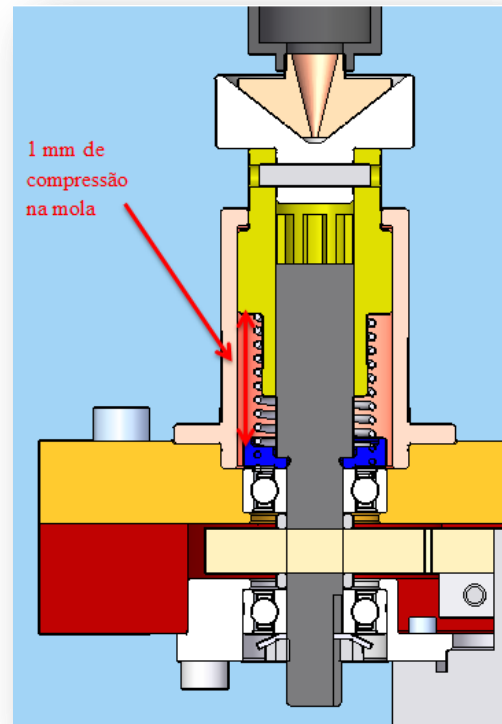


Figura 3.51) Compressão recomendada para se iniciar a operação de desaperto do nozzle.

Assim que o cubo desencosta do tubo guia, o motor de aperto começa a funcionar e o nozzle vai desapertando lentamente da peça cerâmica. O desaperto do nozzle provoca a translação vertical do cubo em relação ao veio e, por conseguinte, a compressão da mola, sendo que no final da operação esta deverá apresentar uma compressão de aproximadamente 4 ou 5 mm. Quando o nozzle está totalmente desapertado, a cabeça retira lentamente a pressão sobre o sistema e o cubo retorna à posição de descanso, por acção da força da mola. Em seguida a cabeça retira-se da gaveta e esta última translada para fora da área de corte. A figura 3.51 demonstra a compressão inicial recomendada (1mm) para efectuar o desaperto do nozzle.

3.4.2.4 Sistema de aperto

No caso do modelo da gaveta foi desenvolvida apenas uma solução para o sistema de aperto. O sistema desenvolvido derivou em grande parte do utilizado na solução do prato rotativo, tendo-se efectuado apenas alguns ajustes por forma a adaptá-lo às diferentes condicionantes deste sistema.

Como já foi referido, uma das motivações do sistema da gaveta passa por eliminar a necessidade do engate entre o veio motor e o Porta-nozzle, pelo que desta forma o sistema de aperto é relativamente mais simples, sendo composto tal como na solução do prato rotativo por um veio, um cubo e uma mola de compressão. As funções da mola são exactamente as mesmas, isto é, aumentar o atrito entre o nozzle e o Porta-nozzle e garantir contacto entre estes dois componentes ao longo de toda a operação. Como neste caso não é necessário efectuar o engate entre os veios, o Porta-nozzle é embutido directamente no cubo estriado, eliminando-se assim as patelas circulares e o sistema de

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

posicionadores de bola. Assim sendo, este sistema apresenta-se como algo bastante mais simples e fiável, cujo processo de funcionamento se baseia unicamente na translação do cubo e do Porta-nozzle em relação ao veio estriado. O sistema de aperto modelado está demonstrado na figura 3.52. Uma vez que o funcionamento desta solução já foi abordado no ponto 3.4.2.3 é desnecessário efectuar uma nova referência ao processo.

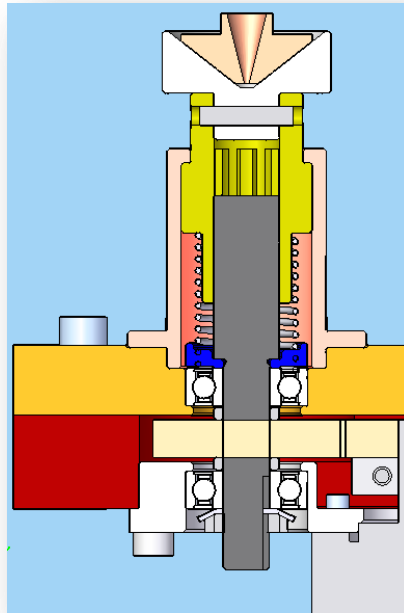


Figura 3.52) Sistema de aperto desenvolvido para a solução da gaveta.

3.4.2.5 Dimensionamento da solução

A solução da gaveta foi desenvolvida com o intuito de resolver os problemas verificados na solução do prato rotativo, pelo que desta forma é de esperar que seja a solução escolhida para implementar no centro de corte. Assim sendo, procurou-se efectuar uma análise profunda a todos os parâmetros que podem influir no correcto funcionamento do sistema. Os parâmetros analisados neste capítulo são os seguintes:

- **Cálculo do rendimento das diversas cadeias cinemáticas desenvolvidas;**
- **Dimensionamento dos componentes de transmissão de potência da cadeia escolhida;**
- **Dimensionamento da mola de compressão;**
- **Dimensionamento dos motores de aperto;**
- **Dimensionamento da ligação por atrito entre o nozzle e o Porta-nozzle;**

Em seguida apresentam-se os cálculos efectuados para cada um destes parâmetros, sendo que cada um deles analisado de forma independente.

3.4.2.5.1 Cálculo do rendimento das diversas cadeias cinemáticas desenvolvidas

Nesta solução, a transmissão de rotação entre o motor e o Porta-nozzle é efectuada através de uma cadeia de engrenagens em Poliacetal (Delrin). Como é sabido, qualquer tipo de engrenagem apresenta perdas de rendimento que estão relacionadas com diversos factores, tais como o material da engrenagem, a temperatura de funcionamento, a lubrificação, o módulo dos dentes, entre outros. A operação de aperto/desaperto do nozzle obriga a controlar de forma precisa o binário fornecido ao sistema, devido à fragilidade do suporte cerâmico da cabeça, pelo que é essencial projectar uma cadeia altamente eficiente de modo a minimizar as perdas entre o primeiro e o último porta-nozzle. O grande problema reside no facto de cada porta-nozzle necessitar de um valor de binário pré-definido para apertar/desapertar o nozzle na cabeça, valor esse que vai diminuindo ao longo da cadeia devido às perdas de rendimento. Desta forma, para alimentar o último Porta-nozzle com 0,1 Nm de binário é obrigatório inserir um valor superior na entrada do sistema, valor este que se for muito elevado pode danificar o suporte cerâmico da cabeça, quando se aperta/desaperta o primeiro ou o segundo nozzle da cadeia. Para minimizar este problema testaram-se várias cadeias cinemáticas diferentes, variando entre elas o posicionamento do motor, das rodas intermédias e ainda a capacidade de armazenamento, com vista a uniformizar o momento de aperto/desaperto ao longo de toda a cadeia.

Para que o cálculo de perdas na cadeia seja o mais exacto possível foi também efectuada uma análise às perdas de carga nos rolamentos. As perdas nos rolamentos não costumam ser muito significativas, no entanto, como este sistema é bastante sensível e o binário requerido extremamente baixo, procurou-se determinar a influência deste componente no correcto funcionamento do sistema.

A escolha das engrenagens para cada cadeia foi efectuada de acordo com os seguintes objectivos:

- **Escolha de rodas dentadas capazes de absorver o momento definido nas especificações;**
- **Diminuição do entre eixo, por forma a reduzir o atravancamento da gaveta;**
- **Diâmetro do veio do Porta-nozzle e da cavilha cilíndrica da roda intermédia;**

A escolha dos rolamentos foi efectuada de acordo com os seguintes objectivos:

- **Diâmetro do veio do Porta-nozzle;**
- **Minimização do diâmetro exterior do rolamento, por forma a diminuir o atravancamento do sistema;**

De seguida apresentam-se os cálculos efectuados para a determinação do rendimento de cada sistema. Para facilitar a compreensão desta análise classificou-se cada sistema de acordo com a capacidade de armazenamento e o posicionamento do (s) motor (es).

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

➤ Gaveta com motor central e capacidade para 24 nozzles

Esta foi a primeira configuração a ser testada quando se iniciou o desenvolvimento da solução da gaveta. Como a solução do prato rotativo apresenta capacidade para 24 nozzles, procurou-se desenvolver uma cadeia cinemática que permitisse um nível de armazenamento semelhante, tendo-se projectado uma matriz 5x5 com motorização central.

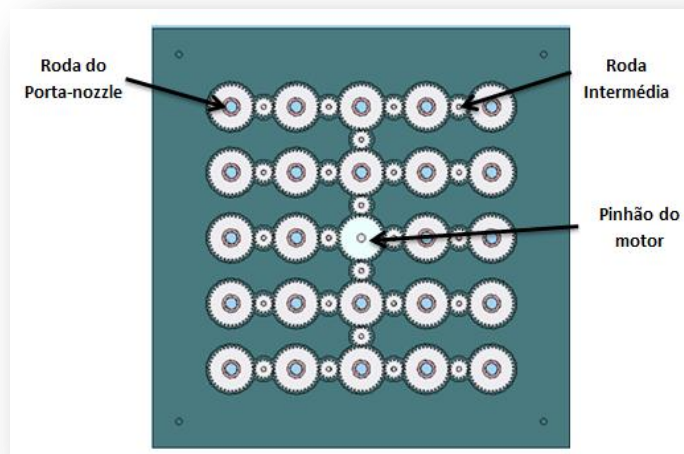


Figura 3.53) Cadeia cinemática com motor central e capacidade para 24 nozzles

1. Cálculo do rendimento da engrenagem:

De acordo com os objectivos definidos escolheram-se as seguintes rodas de dentado recto da HPC GEARS: [23] (Anexo B)

Tabela 13) Características das rodas dentadas escolhidas.

Componentes	Roda do Porta-nozzle (2)	Roda Intermédia (1)	Pinhão do motor (2)
Modelo	ZG1-25	ZG1-15	ZG1-25
Nº de dentes (Z)	25	15	25
Módulo (m) [mm]	1	1	1
Espessura da face [mm]	8	8	8
Binário admissível [Nm]	0,39	0,14	0,39
Coeficiente de atrito (μ)		0,35	
Ângulo de pressão (α)		20°	

A análise a tabela acima permite desde já concluir que as rodas escolhidas apresentam um valor de binário admissível superior ao binário de aperto definido nas especificações. Este valor de binário não foi retirado directamente do catálogo da HPC mas sim do catálogo da HUCO [24], que também fabrica rodas dentadas em Poliacetal muito similares a estas. (Anexo B)

Com as informações da tabela 13 calcularam-se as características físicas da engrenagem, pelas seguintes equações: [25]

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

- **Entre-eixo de funcionamento:**

$$a = \frac{(Z_1 + Z_2) * m_n}{2} = \frac{(15 + 25) * 1}{2} = 20 \text{ mm}$$

- **Raios Primitivos:**

$$r = \frac{Z * m}{2} \Leftrightarrow r_1 = \frac{15 * 1}{2} = 7,5 \text{ mm} \Leftrightarrow r_2 = \frac{25 * 1}{2} = 12,5 \text{ mm}$$

- **Raios de cabeça:**

$$r_a = r + m_n \Leftrightarrow r_{a1} = 7,5 + 1 = 8,5 \text{ mm} \Leftrightarrow r_{a2} = 12,5 + 1 = 13,5 \text{ mm}$$

- **Raios de base:**

$$r_b = r * \cos \alpha$$

$$\Leftrightarrow r_{b1} = 7,5 * \cos 20 = 7,05 \text{ mm} \Leftrightarrow r_{b2} = 12,5 * \cos 20 = 11,75 \text{ mm}$$

- **Razão de redução:**

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \Leftrightarrow i = \frac{25}{15} \Leftrightarrow i = 1,67$$

- **Velocidade de rotação:**

$$N_2 = 50 \text{ Rpm} \Leftrightarrow N_1 = N_2 * i = 50 * 1,67 = 83,33 \text{ Rpm}$$

- **Velocidade angular:**

$$w = \frac{2 * \pi * N}{60}$$

$$w_1 = \frac{2 * \pi * 83,5}{60} = 8,73 \text{ rad/s} \Leftrightarrow w_2 = \frac{2 * \pi * 50}{60} = 5,24 \text{ rad/s}$$

Tendo calculado os parâmetros da engrenagem é agora possível proceder ao cálculo do rendimento da engrenagem. Para este cálculo o mais natural seria utilizar a equação do rendimento demonstrada no livro “Engrenages” de Georges Henriot, no entanto, esta equação destina-se ao cálculo de rendimentos em engrenagens metálicas, pelo que se optou por utilizar a equação seguinte, obtida no catálogo de um outro fabricante de rodas em Poliacetal: [26, 27]

$$\eta [\%] = 100 - \left(\frac{50 * \mu}{\cos \alpha} * \frac{H_s^2 + H_t^2}{H_s + H_t} \right)$$

Onde:

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

$$H_s = (i + 1) * \left[\sqrt{\left(\frac{r_{a2}}{r_2}\right)^2 - (\cos \alpha)^2} - \sin \alpha \right]$$

$$H_t = \left(\frac{i + 1}{i}\right) * \left[\sqrt{\left(\frac{r_{a1}}{r_1}\right)^2 - (\cos \alpha)^2} - \sin \alpha \right]$$

Logo:

$$H_s = (1,67 + 1) * \left[\sqrt{\left(\frac{13,5}{12,5}\right)^2 - (\cos 20)^2} - \sin 20 \right] \Leftrightarrow H_s = 0,51$$

$$H_t = \left(\frac{1,67 + 1}{1,67}\right) * \left[\sqrt{\left(\frac{8,5}{7,5}\right)^2 - (\cos 20)^2} - \sin 20 \right] \Leftrightarrow H_t = 0,47$$

$$\eta [\%] = 100 - \left(\frac{50 * 0,35}{\cos 20} * \frac{0,51^2 + 0,47^2}{0,51 + 0,47} \right) \Leftrightarrow \eta [\%] = 90,91$$

Com o rendimento da engrenagem calculado é agora possível determinar o rendimento da cadeia cinemática, por forma a aferir se a diferença de momento entre o primeiro e o último Porta-nozzle é significativa.

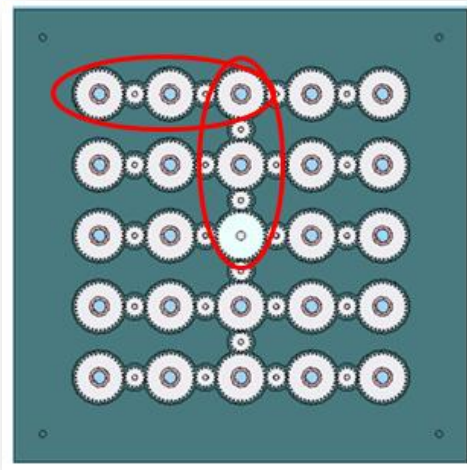


Figura 3.54) Demonstração da cadeia de transmissão mais longa do sistema.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Observando a figura 3.54 verifica-se que existem 6 transmissões de rotação entre o primeiro e o último Porta-nozzle, pelo que o rendimento total entre estes dois componentes é:

$$\eta_{cadeia} [\%] = \eta [\%]^{N^{\circ} transmissões} \Leftrightarrow \eta_{cadeia} [\%] = 90,91^6 \Leftrightarrow \eta_{cadeia} [\%] = 56,47$$

Para se obter 0,1 Nm de binário no Porta-nozzle mais distante é necessário fornecer o seguinte valor ao primeiro:

$$M_{1^{\circ} Porta-nozzle} = \frac{M}{\eta_{cadeia}} \Leftrightarrow M_{1^{\circ} Porta-nozzle} = \frac{0,1}{0,56} \\ \Leftrightarrow M_{1^{\circ} Porta-nozzle} = 0,18 \text{ Nm}$$

2. Cálculo das perdas nos rolamentos

De acordo com os objectivos definidos escolheu-se o seguinte rolamento da Inafag:

Tabela 14) Características do rolamento escolhido. [32]

Modelo	Diâmetro Interno [mm]	Diâmetro externo [mm]	Espessura [mm]
6000 2RSR	10	26	8

Tendo em conta que o cálculo de perdas num rolamento é algo complicado, pois obriga ao conhecimento de parâmetros como a velocidade de rotação, a temperatura de funcionamento, a viscosidade do lubrificante, entre outros, recorreu-se ao “software” da SKF para determinar o seu valor. Apesar de o rolamento escolhido ser da Inafag, a SKF apresenta modelos semelhantes pelo que o valor obtido será sempre bastante aproximado. [28]

Por forma a utilizar este “software” foi necessário determinar os seguintes parâmetros: [25]

- **Velocidade de rotação:** 50 Rpm (definido nas especificações de produto)
- **Força tangencial exercida sobre a roda do Porta-nozzle:**

$$P_{1^{\circ} Porta-nozzle} = M_{\text{mínimo}} * W_2 \Leftrightarrow P_{1^{\circ} Porta-nozzle} = 0,18 * 5,24 \\ \Leftrightarrow P_{1^{\circ} Porta-nozzle} = 0,93 \text{ W}$$

Logo:

$$P_e = \frac{P_{1^{\circ} Porta-nozzle}}{\eta} \Leftrightarrow P_e = \frac{0,93}{0,91} \Leftrightarrow P_e = 1,02 \text{ W}$$

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Sabendo a potência de entrada é possível obter o binário de entrada:

$$M_e = \frac{P_e}{\omega_1} \Leftrightarrow M_{motor} = \frac{1,02}{8,73} \Leftrightarrow M_{motor} = 0,12 \text{ Nm}$$

Logo:

$$F_{t2} = F_{t1} = \frac{M_e}{r_1} \Leftrightarrow F_{t1} = 1000 * \frac{0,12}{7,5} \Leftrightarrow F_{t1} = 15,58 \text{ N}$$

- **Força axial exercida na roda do Porta-nozzle:**

$$F_{a2} = F_{a1} = 0$$

- **Força radial exercida na roda do Porta-nozzle:**

$$F_{r2} = F_{r1} = F_{t1} * \tan \alpha \Leftrightarrow F_{r1} = 15,58 * \tan 20 \Leftrightarrow F_{r1} = 5,67 \text{ N}$$

- **Viscosidade:** 715 mm/s² (Valor obtido no programa de cálculo arbitrando uma temperatura de funcionamento de 50° C)

- **Força axial máxima exercida pela mola de compressão:** 7,5 N (este valor será demonstrado mais à frente)

Colocando estes dados no “software” da SKF obteve-se o seguinte resultado:

Consulte a seção "O novo modelo SKF para cálculo de momento de fricção"

Rolamento	6000	Momento de fricção rolante	$\Phi_{ish} \Phi_{rs} M_{rr}$ [Nmm]	0.822
d [mm]	10	Momento de fricção deslizante	M_{sl} [Nmm]	0.0641
D [mm]	26	Momento de fricção dos vedantes	M_{seal} [Nmm]	0
d _m [mm]	18	Momento de fricção das perdas por arraste	M_{drag} [Nmm]	0
n [r/min]	50	Momento de fricção total	M [Nmm]	0.886
v [mm ² /s]	715	Perda de potência	N_R [W]	0.00464
F _r [N]	5.67	Torque de partida	M_{start} [Nmm]	0.116
F _a [N]	7.5			
μ_{EHL}	0.05			
☒ Graxa				
☐ Atomização				
☐ Banho de óleo				
☐ Jato de óleo				
H [mm]		Aumento de temperatura	ΔT [°C]	
K _{rs}	6e-8			
	Calcular			

Informações extras

Figura 3.55) Valor do momento de fricção para o rolamento escolhido.

Como o tramo de transmissão mais logo é composto por 8 rolamentos, a perda de carga resultante da rotação de estes elementos é a seguinte:

$$M_{\text{fricção dos rolamentos}} = 8 * 0,886 \Leftrightarrow M_{\text{fricção dos rolamentos}} = 7,088 * 10^{-3} \text{ Nm}$$

3. Binário mínimo a fornecer ao primeiro Porta-nozzle

Tendo em conta o valor de perdas nos rolamentos e o resultado do cálculo do rendimento das engrenagens, é agora possível determinar o binário mínimo a fornecer ao primeiro Porta-nozzle, de modo a que o último receba o momento de aperto definido nas especificações.

$$M_{\text{mínimo}} = M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} + M_{\text{fricção dos rolamentos}}$$

$$\Leftrightarrow M_{\text{mínimo}} = 0,18 + 7,088 * 10^{-3}$$

$$\Leftrightarrow M_{\text{mínimo}} = 0,19 \text{ Nm}$$

Através deste cálculo, verifica-se que para conseguir apertar o último nozzle da cadeia com 0,1 Nm de binário é necessário fornecer ao primeiro 0,19 Nm. Esta diferença entre os dois Porta-nozzle é muito significativa, pelo que se projectou uma nova cadeia.

➤ Gaveta com motor em posição lateral e capacidade para 18 nozzles

Tendo em conta os resultados da cadeia cinemática anterior procurou-se desenvolver uma nova configuração que permita obter resultados mais animadores. Desta forma, modelou-se uma nova cadeia com capacidade para 18 nozzles e motor em posição lateral. Por forma a melhorar o rendimento procurou-se aumentar o entre-eixo da engrenagem, pelo que as rodas utilizadas são ligeiramente maiores.

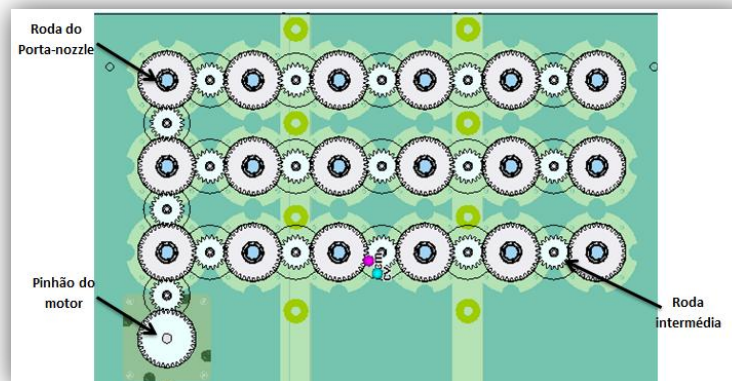


Figura 3.56) Cadeia cinemática com motor lateral e capacidade para 18 nozzles.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

1. Cálculo do rendimento da engrenagem:

De acordo com os objectivos definidos escolheram-se as seguintes rodas de dentado recto da HPC GEARS: [23] (Anexo B)

Tabela 15) Características das rodas dentadas escolhidas.

Componentes	Roda do Porta-nozzle (2)	Roda Intermédia (1)	Pinhão do motor (2)
Modelo	ZG1-35	ZG1-20	ZG1-35
Nº de dentes (Z)	35	20	35
Módulo (m) [mm]	1	1	1
Espessura da face [mm]	8	8	8
Binário admissível [Nm]	0,77	0,25	0,77
Coeficiente de atrito (μ)		0,35	
Ângulo de pressão (α)		20°	

Utilizando um processo análogo ao demonstrado para a primeira cadeia determinaram-se as características físicas e o rendimento da engrenagem:

- Entre-eixo de funcionamento:

$$a = \frac{(Z_1 + Z_2) * m_n}{2} = \frac{(35 + 20) * 1}{2} = 27,5 \text{ mm}$$

- Raios Primitivos:

$$r = \frac{Z * m}{2} \Leftrightarrow r_1 = \frac{20 * 1}{2} = 10 \text{ mm} \Leftrightarrow r_2 = \frac{35 * 1}{2} = 17,5 \text{ mm}$$

- Raios de cabeça:

$$r_a = r + m \Leftrightarrow r_{a1} = 10 + 1 = 11 \text{ mm} \Leftrightarrow r_{a2} = 17,5 + 1 = 18,5 \text{ mm}$$

- Raios de base:

$$r_b = r * \cos \alpha$$

$$\Leftrightarrow r_{b1} = 10 * \cos 20 = 9,4 \text{ mm} \Leftrightarrow r_{b2} = 17,5 * \cos 20 = 16,44 \text{ mm}$$

- Razão de redução:

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \Leftrightarrow i = \frac{35}{20} \Leftrightarrow i = 1,75$$

- Velocidade de rotação:

$$N_2 = 50 \text{ Rpm} \Leftrightarrow N_1 = N_2 * i = 50 * 1,75 = 87,5 \text{ Rpm}$$

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

- **Velocidade angular:**

$$w = \frac{2 * \pi * N}{60}$$

$$w_1 = \frac{2 * \pi * 87,5}{60} = 9,16 \text{ rad/s} \Leftrightarrow w_2 = \frac{2 * \pi * 50}{60} = 5,24 \text{ rad/s}$$

- **Rendimento da engrenagem:**

$$\eta [\%] = 100 - \left(\frac{50 * \mu}{\cos \alpha} * \frac{H_s^2 + H_t^2}{H_s + H_t} \right)$$

Onde:

$$H_s = (i + 1) * \left[\sqrt{\left(\frac{r_{a2}}{r_2} \right)^2 - (\cos \alpha)^2} - \sin \alpha \right]$$

$$H_t = \left(\frac{i + 1}{i} \right) * \left[\sqrt{\left(\frac{r_{a1}}{r_1} \right)^2 - (\cos \alpha)^2} - \sin \alpha \right]$$

Logo:

$$H_s = (1,75 + 1) * \left[\sqrt{\left(\frac{18,5}{17,5} \right)^2 - (\cos 20)^2} - \sin 20 \right] \Leftrightarrow H_s = 0,39$$

$$H_t = \left(\frac{1,75 + 1}{1,75} \right) * \left[\sqrt{\left(\frac{11}{10} \right)^2 - (\cos 20)^2} - \sin 20 \right] \Leftrightarrow H_t = 0,36$$

$$\eta [\%] = 100 - \left(\frac{50 * 0,35}{\cos 20} * \frac{0,39^2 + 0,36^2}{0,39 + 0,36} \right) \Leftrightarrow \eta [\%] = 92,98$$

Com o rendimento da engrenagem calculado é agora possível determinar o rendimento da cadeia cinemática, por forma a aferir se a diferença de momento entre o primeiro e o último Porta-nozzle é significativa.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

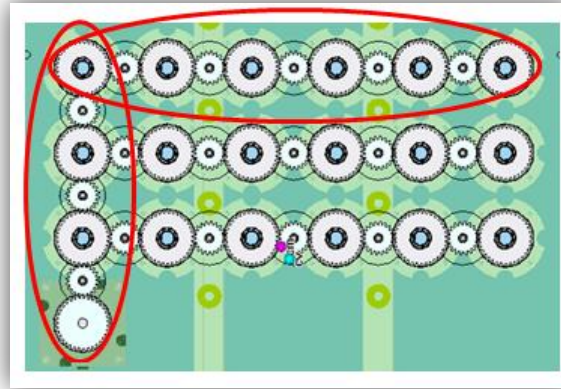


Figura 3.57) Demonstração da cadeia de transmissão mais longa do sistema.

Observando a figura 3.57 verifica-se que existem 14 transmissões de rotação entre o primeiro e o último Porta-nozzle, pelo que o rendimento total entre estes dois componentes é:

$$\eta_{cadeia} [\%] = \eta [\%]^{N^{\circ} \text{ transmissões}} \Leftrightarrow \eta_{cadeia} [\%] = 92,98^{14} \Leftrightarrow \eta_{cadeia} [\%] = 36,11$$

Para se obter 0,1 Nm de binário no último Porta-nozzle é necessário fornecer o seguinte valor ao primeiro:

$$M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = \frac{M}{\eta_{cadeia}} \Leftrightarrow M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = \frac{0,1}{0,36} \\ \Leftrightarrow M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = 0,28 \text{ Nm}$$

2. Cálculo das perdas nos rolamentos

De acordo com os objectivos definidos escolheu-se o seguinte rolamento da Inafag:

Tabela 16) Características do rolamento escolhido. [32]

Modelo	Diâmetro Interno [mm]	Diâmetro externo [mm]	Espessura [mm]
6000 2RSR	10	26	8

Recorrendo ao “software” da SKF determinaram-se as perdas de carga para o rolamento escolhido, utilizando para isso um procedimento análogo ao demonstrado na primeira cadeia.

- **Velocidade de rotação:** 50 Rpm (definido nas especificações de produto)
- **Força tangencial exercida sobre a roda do Porta-nozzle:**

$$P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = M_{\text{mínimo}} * W_2 \Leftrightarrow P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = 0,28 * 5,24$$

$$\Leftrightarrow P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = 1,45 \text{ W}$$

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Logo:

$$P_e = \frac{P_{1^\circ \text{ Porta-nozzle}}}{\eta} \Leftrightarrow P_e = \frac{1,45}{0,93} \Leftrightarrow P_e = 1,56 \text{ W}$$

Sabendo a potência de entrada é possível obter o binário de entrada:

$$M_e = \frac{P_e}{w_1} \Leftrightarrow M_e = \frac{1,56}{9,16} \Leftrightarrow M_e = 0,17 \text{ Nm}$$

Logo:

$$F_{t2} = F_{t1} = \frac{M_e}{r_1} \Leftrightarrow F_{t1} = 1000 * \frac{0,17}{10} \Leftrightarrow F_{t1} = 17 \text{ N}$$

- **Força axial exercida na roda do Porta-nozzle:**

$$F_{a2} = F_{a1} = 0$$

- **Força radial exercida na roda do Porta-nozzle:**

$$F_{r2} = F_{r1} = F_{t1} * \tan \alpha \Leftrightarrow F_{r1} = 17 * \tan 20 \Leftrightarrow F_{r1} = 6,19 \text{ N}$$

- **Viscosidade:** 715 mm/s² (Valor obtido no programa de cálculo arbitrando uma temperatura de funcionamento de 50° C)
- **Força axial máxima exercida pela mola de compressão:** 7,5 N

Colocando estes dados no “software” da SKF obteve-se o seguinte resultado:

Consulte a seção "O novo modelo SKF para cálculo de momento de fricção"

Rolamento	6000	Momento de fricção rolante	$\Phi_{ish} \Phi_{rs} M_{rr}$ [Nmm]	0.824
d [mm]	10	Momento de fricção deslizante	M_{sl} [Nmm]	0.0641
D [mm]	26	Momento de fricção dos vedantes	M_{seal} [Nmm]	0
d _m [mm]	18	Momento de fricção das perdas por arraste	M_{drag} [Nmm]	0
n [r/min]	50	Momento de fricção total	M [Nmm]	0.888
v [mm ² /s]	715	Perda de potência	N_R [W]	0.00465
F _r [N]	6.19	Torque de partida	M_{start} [Nmm]	0.116
F _a [N]	7.5			
μ _{EHL}	0.05			
☒ Graxa				
☐ Atomização				
☐ Banho de óleo				
☐ Jato de óleo				
H [mm]		Aumento de temperatura	ΔT [°C]	
K _{rs}	6e-8			

[Informações extras](#)

[Calcular](#)

Figura 3.58) Valor do momento de fricção para o rolamento escolhido.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Como o tramo de transmissão mais logo é composto por 16 rolamentos, a perda de carga resultante da rotação de estes elementos é a seguinte:

$$M_{\text{fricção dos rolamentos}} = 16 * 0,888 \Leftrightarrow M_{\text{fricção dos rolamentos}} = 14,2 * 10^{-3} Nm$$

3. Binário mínimo a fornecer ao primeiro Porta-nozzle:

Tendo em conta o valor de perdas nos rolamentos e o resultado do cálculo do rendimento das engrenagens, é agora possível determinar o binário que o primeiro Porta-nozzle tem de absorver por forma a respeitar o valor mínimo de momento de aperto definido nas especificações.

$$M_{\text{mínimo}} = M_{1^{\text{ª}} \text{ Porta-nozzle}} + M_{\text{fricção da cadeia}}$$

$$\Leftrightarrow M_{\text{mínimo}} = 0,28 + 14,2 * 10^{-3}$$

$$\Leftrightarrow M_{\text{mínimo}} = 0,29 Nm$$

O valor obtido é 2,9 vezes superior ao valor de binário definido nas especificações, pelo que se procurou modelar uma nova cadeia.

➤ Gaveta com motor central e capacidade para 18 nozzles

À primeira vista a cadeia cinemática anterior teria todas as condições para fornecer um bom resultado, uma vez que a quantidade de nozzles a serem alimentados é inferior. No entanto, a posição lateral do motor revelou-se um desastre, pelo que se tentou efectuar um novo cálculo mas agora com o motor no centro da cadeia. Para além da alteração da posição do motor foi também modificado o valor do entre-eixo, pelo que as novas rodas são ligeiramente maiores do que as da cadeia anterior.

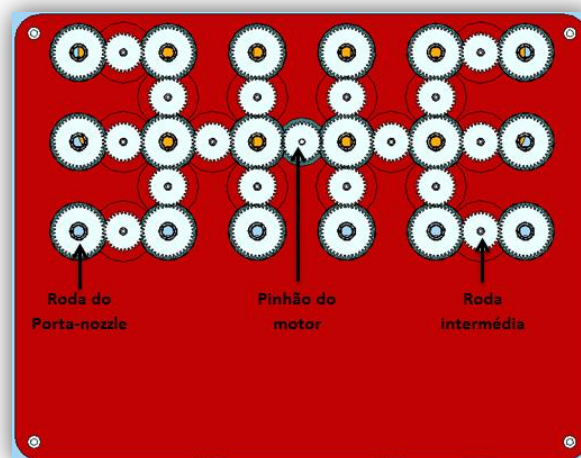


Figura 3.59) Cadeia cinemática com motor central e capacidade para 18 nozzles.

1. Cálculo do rendimento da engrenagem:

De acordo com os objectivos definidos escolheram-se as seguintes rodas de dentado recto da HPC GEARS: [23] (Anexo B)

Tabela 17) Características das rodas dentadas escolhidas.

Componentes	Roda do Porta-nozzle (2)	Roda Intermédia (1)	Pinhão do motor (1)
Modelo	ZG1-40	ZG1-30	ZG1-30
Nº de dentes (Z)	40	30	30
Módulo (m) [mm]	1	1	1
Espessura da face [mm]	8	8	8
Binário admissível [Nm]	1	0,57	0,57
Coefficiente de atrito (μ)		0,35	
Ângulo de pressão (α)		20°	

Utilizando um processo análogo ao demonstrado para a primeira cadeia determinaram-se as características físicas e o rendimento da engrenagem:

- Entre-eixo de funcionamento:

$$a = \frac{(Z_1 + Z_2) * m_n}{2} = \frac{(30 + 40) * 1}{2} = 35 \text{ mm}$$

- Raios Primitivos:

$$r = \frac{Z * m}{2 * \cos \beta} \Leftrightarrow r_1 = \frac{30 * 1}{2} = 15 \text{ mm} \Leftrightarrow r_2 = \frac{40 * 1}{2} = 20 \text{ mm}$$

- Raios de cabeça:

$$r_a = r + m \Leftrightarrow r_{a1} = 15 + 1 = 16 \text{ mm} \Leftrightarrow r_{a2} = 20 + 1 = 21 \text{ mm}$$

- Raios de base:

$$r_b = r * \cos \alpha$$

$$\Leftrightarrow r_{b1} = 15 * \cos 20 = 14,10 \text{ mm} \Leftrightarrow r_{b2} = 20 * \cos 20 = 18,79 \text{ mm}$$

- Razão de redução:

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \Leftrightarrow i = \frac{40}{30} \Leftrightarrow i = 1,33$$

- Velocidade de rotação:

$$N_2 = 50 \text{ Rpm} \Leftrightarrow N_1 = N_2 * i = 50 * 1,33 = 66,67 \text{ Rpm}$$

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

- **Velocidade angular:**

$$w = \frac{2 * \pi * N}{60}$$

$$w_1 = \frac{2 * \pi * 66,67}{60} = 6,98 \text{ rad/s} \Leftrightarrow w_2 = \frac{2 * \pi * 50}{60} = 5,24 \text{ rad/s}$$

- **Rendimento da engrenagem:**

$$\eta [\%] = 100 - \left(\frac{50 * \mu}{\cos \alpha} * \frac{H_s^2 + H_t^2}{H_s + H_t} \right)$$

Onde:

$$H_s = (i + 1) * \left[\sqrt{\left(\frac{r_{a2}}{r_2} \right)^2 - (\cos \alpha)^2} - \sin \alpha \right]$$

$$H_t = \left(\frac{i + 1}{i} \right) * \left[\sqrt{\left(\frac{r_{a1}}{r_1} \right)^2 - (\cos \alpha)^2} - \sin \alpha \right]$$

Logo:

$$H_s = (1,67 + 1) * \left[\sqrt{\left(\frac{21}{20} \right)^2 - (\cos 20)^2} - \sin 20 \right] \Leftrightarrow H_s = 0,30$$

$$H_t = \left(\frac{1,67 + 1}{1,67} \right) * \left[\sqrt{\left(\frac{16}{15} \right)^2 - (\cos 20)^2} - \sin 20 \right] \Leftrightarrow H_t = 0,28$$

$$\eta [\%] = 100 - \left(\frac{50 * 0,35}{\cos 20} * \frac{0,30^2 + 0,28^2}{0,30 + 0,28} \right) \Leftrightarrow \eta [\%] = 94,6$$

Com o rendimento da engrenagem calculado é agora possível determinar o rendimento da cadeia cinemática por forma a aferir se a diferença de momento entre o primeiro e o último Porta-nozzle é significativa.

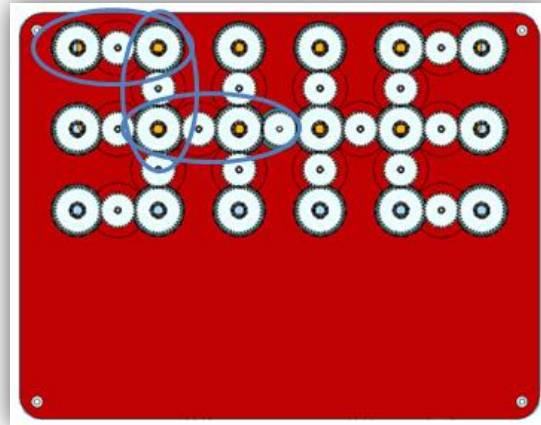


Figura 3.60) Demonstração da cadeia de transmissão mais longa do sistema.

Observando a figura 3.60 é possível verificar que existem 6 transmissões de rotação entre o primeiro e o último Porta-nozzle da cadeia, pelo que o rendimento total entre estes dois componentes é:

$$\eta_{cadeia} [\%] = \eta [\%]^{N^{\circ} \text{ transmissões}} \Leftrightarrow \eta_{cadeia} [\%] = 94,6^6 \Leftrightarrow \eta_{cadeia} [\%] = 71,67$$

Para se obter 0,1 Nm de binário no Porta-nozzle mais distante é necessário fornecer o seguinte valor ao primeiro Porta-nozzle:

$$M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = \frac{M}{\eta_{cadeia}} \Leftrightarrow M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = \frac{0,1}{0,72}$$

$$M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = 0,14 \text{ Nm}$$

2. Cálculo das perdas nos rolamentos:

De acordo com os objectivos definidos escolheu-se o seguinte rolamento da Inafag:

Tabela 18) Características do rolamento escolhido. [32]

Modelo	Diâmetro Interno [mm]	Diâmetro externo [mm]	Espessura [mm]
6000 2RSR	10	26	8

Recorrendo ao “software” da SKF determinaram-se as perdas de carga para o rolamento escolhido, utilizando para isso um procedimento análogo ao demonstrado na primeira cadeia.

- **Velocidade de rotação:** 50 Rpm (definido nas especificações de produto)
- **Força tangencial exercida sobre a roda do Porta-nozzle:**

$$P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = M_{\text{mínimo}} * W_2 \Leftrightarrow P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = 0,14 * 5,24$$

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

$$\Leftrightarrow P_{1^\circ \text{ Porta-nozzle}} = 0,73 \text{ W}$$

Logo:

$$P_e = \frac{P_{1^\circ \text{ Porta-nozzle}}}{\eta} \Leftrightarrow P_e = \frac{0,73}{0,95} \Leftrightarrow P_e = 0,77 \text{ W}$$

Sabendo a potência de entrada é possível obter o binário de entrada:

$$M_e = \frac{P_e}{\omega_1} \Leftrightarrow M_e = \frac{0,77}{6,98} \Leftrightarrow M_e = 0,11 \text{ Nm}$$

Logo:

$$F_{t2} = F_{t1} = \frac{M_e}{r_1} \Leftrightarrow F_{t1} = 1000 * \frac{0,11}{15} \Leftrightarrow F_{t1} = 7,37 \text{ N}$$

- **Força axial exercida na roda do Porta-nozzle:**

$$F_{a2} = F_{a1} = 0$$

- **Força radial exercida na roda do Porta-nozzle:**

$$F_{r2} = F_{r1} = F_{t1} * \tan \alpha \Leftrightarrow F_{r1} = 7,37 * \tan 20 \Leftrightarrow F_{r1} = 2,68 \text{ N}$$

- **Viscosidade:** 715 mm/s² (Valor obtido no programa de cálculo arbitrando uma temperatura de funcionamento de 50° C)
- **Força axial máxima exercida pela mola de compressão:** 7,5 N

Colocando estes dados no “software” da SKF obteve-se o seguinte resultado:

Consulte a seção "O novo modelo SKF para cálculo de momento de fricção"

Rolamento	6000	Momento de fricção rolante	$\Phi_{ish} \Phi_{rs} M_{rr}$ [Nmm]	0.811
d [mm]	10	Momento de fricção deslizante	M_{sl} [Nmm]	0.0641
D [mm]	26	Momento de fricção dos vedantes	M_{seal} [Nmm]	0
d _m [mm]	18	Momento de fricção das perdas por arraste	M_{drag} [Nmm]	0
n [r/min]	50	Momento de fricção total	M [Nmm]	0.875
v [mm ² /s]	715	Perda de potência	N_R [W]	0.00458
F _r [N]	2.68	Torque de partida	M_{start} [Nmm]	0.116
F _a [N]	7.5			
μ_{EHL}	0.05			
☒ Graxa				
☐ Atomização				
☐ Banho de óleo				
☐ Jato de óleo				
H [mm]		Aumento de temperatura	ΔT [°C]	
K _{rs}	6e-8			
	Calcular			
W _s [W/°C]				
	Calcular			

[Informações extras](#)

Figura 3.61) Valor do momento de fricção para o rolamento escolhido.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Como o tramo de transmissão mais logo é composto por 8 rolamentos, a perda de carga resultante da rotação de estes elementos é a seguinte:

$$M_{\text{fricção dos rolamentos}} = 8 * 0,875 \Leftrightarrow M_{\text{fricção dos rolamentos}} = 7 * 10^{-3} Nm$$

3. Binário mínimo a fornecer ao primeiro Porta-nozzle:

Tendo em conta o valor de perdas nos rolamentos e o resultado do cálculo do rendimento das engrenagens, é agora possível determinar o binário que o primeiro Porta-nozzle tem de absorver por forma a respeitar o valor mínimo de momento de aperto definido nas especificações.

$$M_{\text{mínimo}} = M_{\text{cadeia}} + M_{\text{fricção dos rolamentos}} \Leftrightarrow M_{\text{mínimo}} = 0,14 + 7 * 10^{-3} \\ \Leftrightarrow M_{\text{mínimo}} = 0,15 Nm$$

Este valor obtido já é bastante mais interessante que os anteriores, pois representa um incremento de 50 % em relação ao binário pré-definido. No entanto, como o suporte da cabeça é em cerâmica procurou-se melhorar ainda mais esta solução, por forma a evitar que este componente quebre durante o aperto.

➤ Gaveta com 3 motores e capacidade para 18 nozzles

Esta foi a última cadeia cinemática explorada neste estudo. Uma vez que a solução anterior forneceu um resultado animador, procurou-se melhorar ainda mais o sistema influenciando apenas na quantidade de motores utilizados. Desta forma dividiu-se a matriz 3x6 em 3 submatrizes 3x2 e colocou-se um motor em cada uma delas. Assim, como cada motor tem de alimentar menos Porta-nozzles é de esperar que o resultado final seja muito interessante.

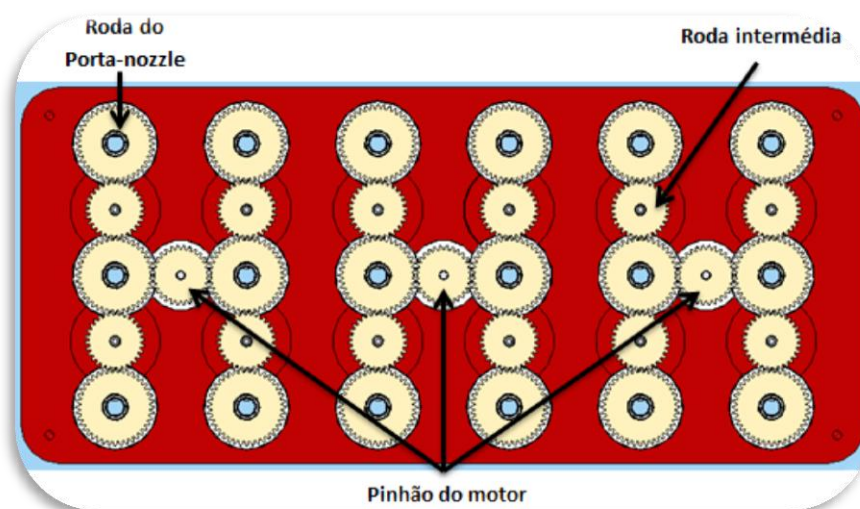


Figura 3.62) Cadeia cinemática com motor central e capacidade para 24 nozzles.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

1. Cálculo do rendimento da engrenagem:

De acordo com os objectivos definidos escolheram-se as seguintes rodas de dentado recto da HPC GEARS: [23] (Anexo B)

Tabela 19) Características das rodas dentadas escolhidas.

Componentes	Roda do Porta-nozzle (2)	Roda Intermédia (1)	Pinhão do motor (1)
Modelo	ZG1-40	ZG1-30	ZG1-30
Nº de dentes (Z)	40	30	30
Módulo (m) [mm]	1	1	1
Espessura da face [mm]	8	8	8
Binário admissível [Nm]	1	0,57	0,57
Coefficiente de atrito (μ)		0,35	
Ângulo de pressão (α)		20°	

Utilizando um processo análogo ao demonstrado para a primeira cadeia determinaram-se as características físicas e o rendimento da engrenagem:

- Entre-eixo de funcionamento:

$$a = \frac{(Z_1 + Z_2) * m_n}{2} = \frac{(30 + 40) * 1}{2} = 35 \text{ mm}$$

- Raios Primitivos:

$$r = \frac{Z * m}{2 * \cos \beta} \Leftrightarrow r_1 = \frac{30 * 1}{2} = 15 \text{ mm} \Leftrightarrow r_2 = \frac{40 * 1}{2} = 20 \text{ mm}$$

- Raios de cabeça:

$$r_a = r + m \Leftrightarrow r_{a1} = 15 + 1 = 16 \text{ mm} \Leftrightarrow r_{a2} = 20 + 1 = 21 \text{ mm}$$

- Raios de base:

$$r_b = r * \cos \alpha$$

$$\Leftrightarrow r_{b1} = 15 * \cos 20 = 14,10 \text{ mm} \Leftrightarrow r_{b2} = 20 * \cos 20 = 18,79 \text{ mm}$$

- Razão de redução:

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \Leftrightarrow i = \frac{40}{30} \Leftrightarrow i = 1,33$$

- Velocidade de rotação:

$$N_2 = 50 \text{ Rpm} \Leftrightarrow N_1 = N_2 * i = 50 * 1,33 = 66,67 \text{ Rpm}$$

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

- **Velocidade angular:**

$$w = \frac{2 * \pi * N}{60}$$

$$w_1 = \frac{2 * \pi * 66,67}{60} = 6,98 \text{ rad/s} \Leftrightarrow w_2 = \frac{2 * \pi * 50}{60} = 5,24 \text{ rad/s}$$

- **Rendimento da engrenagem:**

$$\eta [\%] = 100 - \left(\frac{50 * \mu}{\cos \alpha} * \frac{H_s^2 + H_t^2}{H_s + H_t} \right)$$

Em que:

$$H_s = (i + 1) * \left[\sqrt{\left(\frac{r_{a2}}{r_2} \right)^2 - (\cos \alpha)^2} - \sin \alpha \right]$$

$$H_t = \left(\frac{i + 1}{i} \right) * \left[\sqrt{\left(\frac{r_{a1}}{r_1} \right)^2 - (\cos \alpha)^2} - \sin \alpha \right]$$

Logo:

$$H_s = (1,33 + 1) * \left[\sqrt{\left(\frac{21}{20} \right)^2 - (\cos 20)^2} - \sin 20 \right] \Leftrightarrow H_s = 0,30$$

$$H_t = \left(\frac{1,33 + 1}{1,33} \right) * \left[\sqrt{\left(\frac{16}{15} \right)^2 - (\cos 20)^2} - \sin 20 \right] \Leftrightarrow H_t = 0,28$$

$$\eta [\%] = 100 - \left(\frac{50 * 0,35}{\cos 20} * \frac{0,30^2 + 0,28^2}{0,30 + 0,28} \right) \Leftrightarrow \eta [\%] = 94,6$$

Com o rendimento da engrenagem calculado é agora possível determinar o rendimento da cadeia cinemática por forma a aferir se a diferença de momento entre o primeiro e o último Porta-nozzle é significativa.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

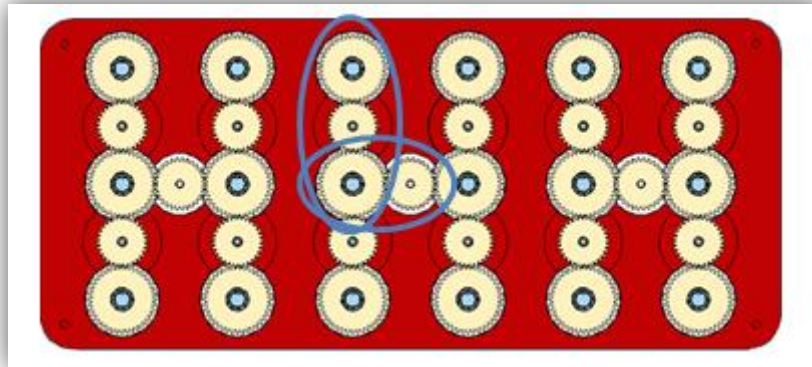


Figura 3.63) Demonstração da cadeia de transmissão mais longa do sistema.

Pela figura 3.63 verifica-se que existem 2 transmissões de rotação entre o primeiro e o último Porta-nozzle da cadeia, pelo que o rendimento total entre estes dois componentes é:

$$\eta_{cadeia} [\%] = \eta [\%]^{N^{\circ} \text{ transmissões}} \Leftrightarrow \eta_{cadeia} [\%] = 94,6^2 \Leftrightarrow \eta_{cadeia} [\%] = 89,49$$

Para se obter 0,1 Nm de binário no Porta-nozzle mais distante é necessário fornecer o seguinte valor ao primeiro Porta-nozzle:

$$M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = \frac{M}{\eta_{cadeia}} \Leftrightarrow M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = \frac{0,1}{0,89}$$

$$M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = 0,11 \text{ Nm}$$

2. Cálculo das perdas nos rolamentos

De acordo com os objectivos definidos escolheu-se o seguinte rolamento da Inafag:

Tabela 20) Características do rolamento escolhido. [32]

Modelo	Diâmetro Interno [mm]	Diâmetro externo [mm]	Espessura [mm]
6000 2RSR	10	26	8

Recorrendo ao “software” da SKF determinaram-se as perdas de carga para o rolamento escolhido, utilizando para isso um procedimento análogo ao demonstrado na primeira cadeia.

- **Velocidade de rotação:** 50 Rpm (definido nas especificações de produto)
- **Força tangencial exercida sobre a roda do 1º Porta-nozzle:**

$$P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = M_{\text{mínimo}} * W_2 \Leftrightarrow P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = 0,11 * 5,24$$

$$\Leftrightarrow P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = 0,59 \text{ W}$$

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Logo:

$$P_e = \frac{P_{1^\circ \text{ Porta-nozzle}}}{\eta} \Leftrightarrow P_e = \frac{0,59}{0,95} \Leftrightarrow P_e = 0,62 \text{ W}$$

Sabendo a potência de entrada é possível obter o binário de entrada:

$$M_e = \frac{P_e}{\omega_1} \Leftrightarrow M_e = \frac{0,62}{6,98} \Leftrightarrow M_e = 0,09 \text{ Nm}$$

Logo:

$$F_{t2} = F_{t1} = \frac{M_e}{r_1} \Leftrightarrow F_{t1} = 1000 * \frac{0,09}{15} \Leftrightarrow F_{t1} = 5,91 \text{ N}$$

- **Força axial exercida na roda do Porta-nozzle:**

$$F_{a2} = F_{a1} = 0$$

- **Força radial exercida na roda do Porta-nozzle:**

$$F_{r2} = F_{r1} = F_{t1} * \tan \alpha \Leftrightarrow F_{r1} = 5,91 * \tan 20 \Leftrightarrow F_{r1} = 2,15 \text{ N}$$

- **Viscosidade:** 715 mm/s² (Valor obtido no programa de cálculo arbitrando uma temperatura de funcionamento de 50° C)
- **Força axial máxima exercida pela mola de compressão:** 7,5 N

Colocando estes dados no calculador da SKF obteve-se o seguinte resultado:

Consulte a seção "O novo modelo SKF para cálculo de momento de fricção"

Rolamento	6000	Momento de fricção rolante	$\Phi_{ish} \Phi_{rs} M_{rr}$ [Nmm]	0.809
d [mm]	10	Momento de fricção deslizante	M_{sl} [Nmm]	0.0641
D [mm]	26	Momento de fricção dos vedantes	M_{seal} [Nmm]	0
d _m [mm]	18	Momento de fricção das perdas por arraste	M_{drag} [Nmm]	0
n [r/min]	50	Momento de fricção total	M [Nmm]	0.873
v [mm ² /s]	715	Perda de potência	N_R [W]	0.00457
F _r [N]	2.15	Torque de partida	M_{start} [Nmm]	0.116
F _a [N]	7.5			
μ _{EHL}	0.05			
☒ Graxa				
☐ Atomização				
☐ Banho de óleo				
☐ Jato de óleo				
H [mm]		Aumento de temperatura	ΔT [°C]	
K _{rs}	6e-8			
	Calcular			

[Informações extras](#)

Figura 3.64) Valor do momento de fricção para o rolamento escolhido.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Como o tramo de transmissão mais logo é composto por 4 rolamentos, a perda de carga resultante da rotação de estes elementos é a seguinte:

$$M_{\text{fricção dos rolamentos}} = 4 * 0,873 \Leftrightarrow M_{\text{fricção dos rolamentos}} = 3,49 * 10^{-3} Nm$$

3. Binário mínimo a fornecer ao primeiro Porta-nozzle:

Tendo em conta o valor de perdas nos rolamentos e o resultado do cálculo do rendimento das engrenagens, é agora possível determinar o binário que o primeiro porta-nozzle tem de absorver por forma a respeitar o valor mínimo de momento de aperto definido nas especificações.

$$M_{\text{mínimo}} = M_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} + M_{\text{fricção dos rolamentos}} \Leftrightarrow M_{\text{mínimo}} = 0,11 + 3,49 * 10^{-3} \\ \Leftrightarrow M_{\text{mínimo}} = 0,11 Nm$$

O resultado obtido indica que para se obter o binário de aperto pré-definido, é necessário fornecer um valor 10% superior à entrada da cadeia. Este valor, apesar de ainda ser ligeiramente elevado foi considerado como aceitável, pois é crível que a cerâmica consiga absorver este impacto. A utilização de 3 motores certamente que irá encarecer o preço final da solução, no entanto, como este projecto é o primeiro do tipo na empresa optou-se por garantir o correcto funcionamento do sistema em detrimento dos custos.

3.4.2.5.2 Dimensionamento dos componentes de transmissão de potência da cadeia escolhida

Tendo-se definido a cadeia cinemática a utilizar, é agora necessário efectuar o dimensionamento dos elementos responsáveis pela transmissão de potência no sistema. Estes elementos são os seguintes:

- **Engrenagem;**
- **Veio estriado do Porta-nozzle;**
- **Cavilha cilíndrica da roda intermédia;**
- **Rolamentos;**

No capítulo anterior foram utilizados valores aproximados para o binário máximo admissível das rodas dentadas. Estes valores foram retirados do catálogo de outro fabricante, pelo que é necessário verificar se as rodas da HPC GEARS resistem aos esforços a que vão ser submetidas. Para efectuar este cálculo recorreu-se à equação de Lewis que permite a determinar a espessura mínima da face das engrenagens. Esta equação foi retirada da conferência Feup-Gears, realizada em 2003 na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e é utilizada pela grande maioria dos fabricantes de rodas plásticas, sendo inclusive recomendada pela *DuPont*. [29]

Para o cálculo das dimensões mínimas do veio e da cavilha recorreu-se ao critério da tensão tangencial máxima que é demonstrado no livro “Elementos de máquinas”. Este

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

critério consiste em aplicar uma série de iterações à equação da tensão tangencial máxima, até que o valor de diâmetro obtido se encontre dentro de um determinado intervalo.

Para dimensionar os rolamentos recorreu-se ao “software” da Inafag, que fornece uma estimativa da vida útil de um rolamento de acordo com as forças a que este está sujeito. O sistema de troca de nozzle não vai ter uma utilização muito exigente, no entanto, é interessante que os rolamentos escolhidos tenham uma vida útil elevada, por forma a eliminar a necessidade da sua substituição.

Em seguida apresentam-se os cálculos referentes ao dimensionamento de cada um destes elementos.

➤ Cálculo da espessura mínima da face das rodas

Para se efectuar este cálculo recorreu-se à seguinte equação: [30]

$$f = \frac{F_t}{m * Y * S}$$

Onde:

- f - Espessura mínima da roda;
- F_t - Força tangencial exercida sobre a roda mais solicitada;
- m – módulo da engrenagem;
- S – Tensão de flexão;
- Y – Factor de forma de Lewis para a engrenagem;

Assim para o sistema de aperto mais esforçado temos: [25]

$$F_{t2} = F_{t1} = \frac{M_e}{r_1} \Leftrightarrow F_{t1} = 1000 * \frac{0,09}{15} \Leftrightarrow F_{t1} = 5,91 \text{ N}$$

Os factores de forma (Y) de cada roda são: [29]

$$Y = 0,25 * Z^{0,25} \Leftrightarrow Y_1 = 0,25 * 30^{0,25} = 0,59 \Leftrightarrow Y_2 = 0,25 * 40^{0,25} = 0,63$$

O factor de forma da engrenagem é aproximadamente:

$$Y = \frac{0,59 + 0,63}{2} = 0,61$$

Para calcular a tensão de flexão (S) suportada pelo dente determinou-se em primeiro lugar a velocidade periférica da engrenagem.

$$V_{p2} = \frac{\pi * d_2 * N_2}{60000} \Leftrightarrow V_p = \frac{\pi * 40 * 50}{60000} \Leftrightarrow V_p = 0,1 \text{ m/s}$$

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Em seguida recorreu-se a um gráfico do fabricante americano DuPont, que fornece valores para a tensão de flexão de acordo com a velocidade periférica obtida. Através desse gráfico, apresentado em anexo (Anexo D), obteve-se o seguinte valor para a tensão de flexão (S).

$$S = 20,5 \text{ MPa}$$

Assim, obteve-se o seguinte valor para a espessura mínima:

$$f = \frac{F_t}{m * Y * S} \Leftrightarrow f = \frac{5,91}{1 * 0,61 * 20,5} \Leftrightarrow f = 0,47 \text{ mm}$$

Este cálculo indica que a engrenagem tem de apresentar no mínimo de 0,47 mm de espessura para absorver a força tangencial de engrenamento. Como já foi visto anteriormente, o fabricante HPC GEARS fornece rodas com 8 mm de espessura, pelo que é certo afirmar que as rodas escolhidas são suficientemente resistentes para esta aplicação.

➤ Determinação do diâmetro mínimo dos veios

A determinação do diâmetro mínimo dos veios foi efectuada com base na seguinte equação: [31]

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{16 * M}{\pi * \tau_{adm}}}$$

Esta equação relaciona o momento aplicado com a tensão de corte suportada pelo material constituinte do veio. Os valores da tensão de corte admissível, que estão explicitados na tabela seguinte, dependem do diâmetro do veio. Desta forma, a correcta determinação do diâmetro mínimo preconiza a elaboração de uma série de iterações, de modo a que o diâmetro final esteja de acordo com a tensão de corte escolhida. O veio estriado do Porta-nozzle e a cavilha cilíndrica das rodas intermédias são ambos construídos em aço CK45.

Tabela 21) Relação entre a Tensão de corte admissível e o diâmetro mínimo do veio para os diferentes materiais.

Diâmetro	mm	Materiais	<16	16 40	40 63	63 100	> 100
τ_{adm}	N/mm ²	St50, CK45					32
		34CrMn4, 42CrMo4	10	16	25	32	
		Aços de Cementação					40

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Admitindo de forma simplista que o momento aplicado no veio estriado do Porta-nozzle e na cavilha vale 0,11 Nm, obtém-se o seguinte diâmetro mínimo:

1. Para $\tau_{adm} = 10 \text{ N/mm}^2$

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{16 * M}{\pi * \tau_{adm}}} \Leftrightarrow d_v = \sqrt[3]{\frac{16 * 0,11}{\pi * 10 * 10^6}} \Leftrightarrow d_v = 0.004 \text{ m} \Leftrightarrow d_v = 3,8 \text{ mm}$$

Pela tabela 21 verifica-se que a primeira iteração só é válida se o valor de diâmetro do veio for inferior a 16 mm. Como se obteve 3,8 mm de diâmetro, não é necessário efectuar uma nova iteração.

No desenho do sistema, o veio estriado e a cavilha cilíndrica apresentam respectivamente 10 mm e 6 mm de diâmetro, pelo que estão correctamente dimensionados

➤ Determinação da vida útil dos rolamentos

A determinação da vida útil dos rolamentos foi efectuada recorrendo ao “software” disponibilizado pela Inafag. A utilização deste calculador obriga ao conhecimento do valor das reacções nos apoios do veio estriado, reacções essas que foram calculadas utilizando o valor das forças de engrenamento determinadas no dimensionamento da cadeia cinemática e ainda a força máxima exercida pela mola no início da operação de aperto (que é igual a 7,5 N como se verá mais à frente). O mais correcto seria recalcular as forças de engrenamento tendo em conta também as perdas nos rolamentos, no entanto, como este parâmetro tem um peso inferior a 10% optou-se por ignorá-lo.

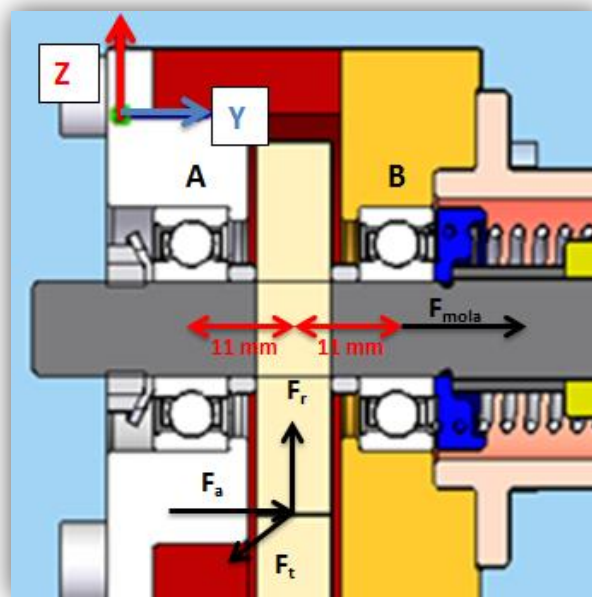


Figura 3.65) Esquema para o cálculo das reacções nos apoios do veio estriado.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

- Para x :

$$R_A^x + F_t + R_B^x = 0 \Leftrightarrow R_A^x + 5,91 + R_B^x = 0$$

$$R_A^x * 22 + F_t * 11 = 0 \Leftrightarrow R_A^x * 22 + 5,91 * 11 = 0$$

Resulta:

$$R_A^x = -2,96 \text{ N} \quad e \quad R_B^x = -2,96 \text{ N}$$

- Em z :

$$R_A^z + F_r + R_B^z = 0 \Leftrightarrow R_A^z + 2,15 + R_B^z = 0$$

$$-R_A^z * 22 - F_r * 11 = 0 \Leftrightarrow -R_A^z * 22 - 2,15 * 11 = 0$$

Resulta:

$$R_A^z = -1,08 \text{ N} \quad e \quad R_B^z = -1,08 \text{ N}$$

- Já em y vem:

$$R_A^y + F_a + F_{mola} = 0 \Leftrightarrow R_A^y = -7,5 \text{ N}$$

Finalmente, é possível calcular os esforços nos apoios pois:

$$R^{radial} = \sqrt{(R^x)^2 + (R^z)^2}$$

$$R^{axial} = R^y$$

Logo os resultados são os seguintes:

$$R_A^{radial} = 3,15 \text{ N} \quad R_B^{radial} = 3,15 \text{ N} \quad R_{AB}^{axial} = 7,5 \text{ N}$$

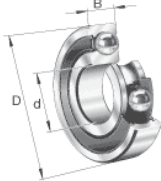
Colocando o valor das reacções nos apoios no “software” da Inafag obtém-se o seguinte valor para a vida útil: [32]

Loadcase			
Designation	Des	Load case 1	
Time portion	q	100.000	%
Axial load	Fa	7.5	N
Radial load	Fr	3.2	N
Type of movement		Rotating	
Speed	n_i	50.00	1/min
Mean operating temperature	T	50	°C
Shock factor	fz	1.0	

Figura 3.66) Inserção dos parâmetros no “software” para efectuar a estimativa da vida útil do rolamento.

Deep groove ball bearings 6000-2RSR
main dimensions to DIN 625-1, lip seals on both sides

Load case 1



Description	Name	Value	Unit
Total rating life in hours (nominal)	Lh10	> 1000000	h
Modified rating life in hours	Lh_nm	> 1000000	h
Static load safety factor	SD_min	> 100.000	
Dynamic load safety factor	SD	> 100.000	

Complete results: see toolbar -> Display calculation result

Figura 3.67) Estimativa da vida útil fornecida pelo “software” da Inafag.

Como é possível verificar pela figura 3.67, o rolamento escolhido apresenta uma vida útil de aproximadamente 1000000 de horas. Este valor é claramente superior ao necessário, no entanto, este tipo de rolamento é dos mais simples existentes no mercado pelo que vai ser utilizado no sistema da gaveta.

3.4.2.5.3 Dimensionamento da mola de compressão

A colocação da mola de compressão no sistema de aperto tem dois objectivos principais que são respectivamente o aumento da força de atrito entre o nozzle e o Porta-nozzle e a manutenção do cubo estriado na posição de repouso. Sabendo que estes dois objectivos são muito importantes para o bom funcionamento do sistema, procurou-se dimensionar a mola tendo em conta os seguintes três parâmetros:

- O espaço disponível para a instalação;

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

- A necessidade de a mola ser instalada com pré-compressão de modo a que ao ser actuada já se encontre na fase linear de funcionamento;
- Escolha de uma mola com um baixo coeficiente de elasticidade, de modo a que força exercida não seja demasiadamente elevada e, por conseguinte, não danifique o suporte cerâmico da cabeça;

Após o desenho do sistema o espaço disponível para a colocação da mola é o evidenciado na figura seguinte.

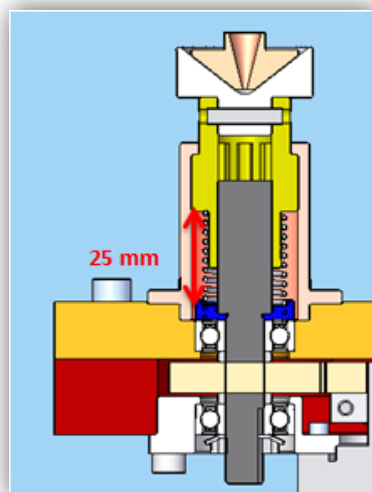


Figura 3.68) Espaçamento vertical disponível para a colocação da mola de compressão.

Segundo o livro “Machine Design” uma mola de secção circular funciona de forma linear quando é comprimida entre 15% e 85% da sua deformação máxima. [19] Tendo em conta esta informação e sabendo o diâmetro mínimo do cubo estriado (19 mm) escolheu-se a seguinte mola da MIZUMI:

- **MIZUMI WR 22 – com 30 mm de comprimento**

A tabela seguinte apresenta as características principais desta mola.

Tabela 22) Características da mola de compressão escolhida.

Fabricante	Modelo	Comp. [mm]	K [N/mm]	Ø [mm]	Ø secção [mm]	Deformação máx. [mm]	F. Máx. (N)
MIZUMI	WR 22 – L30	30	0,5	22	1,2	18	0,5*18=9

Com base nestas especificações e nas informações recolhidas no livro “Machine Design”, calculou-se a pré-deformação mínima que a mola deve ter, por forma a garantir que ao ser comprimida já está na fase linear de funcionamento.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Tabela 23) Limites de funcionamento linear da mola.

Características	Modelo
	WR 22
Deformação máxima [mm]	18
Limite inferior de funcionamento [mm]	$0,15 \cdot 18 = 2,7$
Limite superior de funcionamento [mm]	$0,85 \cdot 18 = 15,3$

A análise da tabela anterior permite concluir que a mola deve ser instalada com uma pré-compressão mínima de 2,7 mm e que não deve ser comprimida acima dos 15,3 mm. A primeira condição está assegurada, pois a mola apresenta um comprimento sem deformação de 30 mm e está inserida numa cavidade com 25 mm de comprimento, encontrando-se assim com uma pré-compressão de 5 mm. A segunda condição indica que a cabeça de corte não pode comprimir a mola acima dos 15,3 mm. Esta condição também é respeitada, pois o cubo apresenta um batente que limita a compressão da mola a 10 mm, pelo que somando este valor à pré-compressão inicial de 5 mm se obtém uma compressão máxima de 15 mm (50% do comprimento inicial).

Tendo-se determinado a deformação máxima admissível e conhecendo os valores do coeficiente de elasticidade, é possível calcular a força máxima e mínima exercida pela mola antes de se iniciar, respectivamente, a operação de aperto e desaperto, recorrendo para isso à seguinte equação:

$$F = K \cdot \Delta l$$

Tabela 24) Força máxima exercida pela mola quando é comprimida com vista a efectuar o aperto do nozzle.

Fabricante	Modelo	Deformação máxima [mm]	K [N/mm]	F. máx. [N]
MIZUMI	WR 22 – L30	15	0,5	$0,5 \cdot 15 = 7,5$

Tabela 25) Força mínima exercida pela mola quando é comprimida com vista a efectuar o desaperto do nozzle

Fabricante	Modelo	Deformação mínima [mm]	K [N/mm]	F. mín. [N]
MIZUMI	WR 22 – L30	6	0,5	$0,5 \cdot 6 = 3$

A tabelas anteriores indicam que as forças máxima e mínima exercidas pela mola são respectivamente 7,5 N e 3 N. A força máxima já foi utilizada no cálculo de perdas dos rolamentos e das reacções nos apoios, enquanto a força mínima vai ser utilizada mais à frente no dimensionamento da ligação por atrito.

3.4.2.5.4 Escolha do motor

A escolha do motor para a solução da gaveta foi orientada segundo os seguintes quatro objectivos:

- **Binário máximo de aperto/desaperto;**

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

- **Velocidade de rotação para a roda de entrada;**
- **Força axial exercida sobre o veio motor;**
- **Escolha de um tipo de motor já existente na ADIRA, por forma a utilizar controladores conhecidos;**

A escolha do motor obriga ao cálculo da velocidade de rotação e do binário a transmitir ao sistema. Uma vez que o binário de aperto para o primeiro Porta-nozzle já é conhecido, é possível calcular os parâmetros de entrada do sistema que são os seguintes: [25]

$$P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = M_{\text{mínimo}} * W_2 \Leftrightarrow P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = 0,11 * 5,24$$
$$\Leftrightarrow P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}} = 0,59 \text{ W}$$

Logo:

$$P_e = \frac{P_{1^{\circ} \text{ Porta-nozzle}}}{\eta} \Leftrightarrow P_e = \frac{0,59}{0,95} \Leftrightarrow P_e = 0,62 \text{ W}$$

Sabendo a potência de entrada é possível obter o binário de entrada:

$$M_e = \frac{P_e}{w_1} \Leftrightarrow M_e = \frac{0,62}{6,98} \Leftrightarrow M_e = 0,09 \text{ Nm}$$

A velocidade de rotação de entrada vai ser a seguinte:

$$N_1 = N_2 * i = 50 * 1,33 = 66,67 \text{ Rpm}$$

De acordo com o momento motor e a velocidade de rotação de entrada, escolheu-se o seguinte motor de passo da FESTO: [33]

- **EMMS-ST-42-S-SE**

Este motor apresenta as seguintes características:

- **Binário máximo:** 0,5 Nm
- **Força axial admissível:** 7 N
- **Banda de rotação de funcionamento:** 1 a 1000 Rpm

As figuras 3.69 e 3.70 apresentam respectivamente as características e a curva de funcionamento do motor. Como é possível verificar, este motor adequa-se à aplicação na qual vai ser utilizado, pois apresenta valores de binário e de força axial superiores aos necessários. Além disto, como já é um motor utilizado na ADIRA vai ser extremamente simples implementá-lo, pois apresenta um controlador conhecido. A sua curva de funcionamento também se adequa à aplicação, pois consegue debitar 0,5 Nm às 50 RPM. Desta forma, basta efectuar algumas variações simples no controlador por forma a obter os 0,09 Nm de binário requerido na entrada.

General technical data		
Size		42
Motor		
Nominal voltage	[V DC]	48
Nominal current	[A]	1.8
Holding torque	[Nm]	0.5
Stepper angle	[°]	1.8 ±5%
Winding resistance	[Ω]	1.75 ±10%
Winding inductance	[mH]	5.4
Drive mass moment of inertia	[kgcm ²]	0.082/0.095 ¹⁾
Radial load on shaft	[N]	20
Axial load on shaft	[N]	7
Mass moment of inertia of rotor	[kgcm ²]	0.082
Brake		
Operating voltage	[V DC]	24 ±10%
Output	[W]	8
Holding torque	[Nm]	0.4
Mass moment of inertia	[kgcm ²]	0.013

Figura 3.69) Características do motor de passo da FESTO.

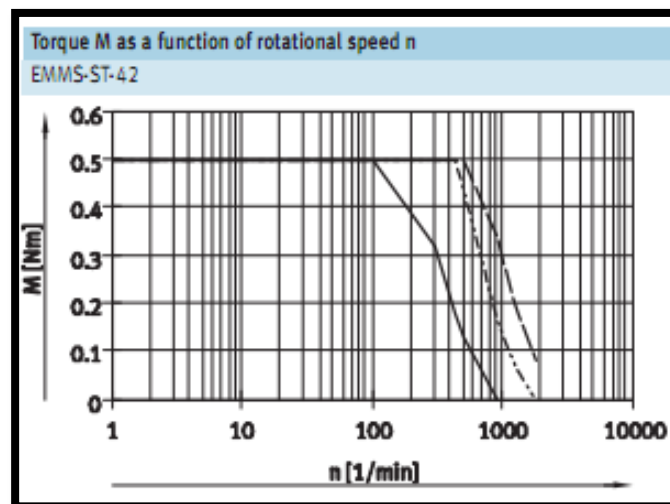


Figura 3.70) Curva de funcionamento do motor de passo escolhido.

3.4.2.5.5 Dimensionamento da ligação por atrito entre o Nozzle e o Porta-nozzle

Um dos aspectos mais importantes deste sistema está relacionado com a ligação entre o nozzle e o Porta-nozzle. Uma vez que a transmissão de rotação entre estes dois componentes é efectuada por atrito, é necessário escolher bem o material do Porta-nozzle e garantir que a força aplicada neste componente é suficiente para fazer rodar o nozzle sem escorregamento. Desta forma definiu-se que o Porta-nozzle será construído em alumínio, pois este material é extremamente macio e apresenta um coeficiente de atrito de aproximadamente 0,57 [21] quando em contacto com o cobre. Este valor de coeficiente foi estimado efectuando a média entre o coeficiente de atrito do cobre/aço e o do Alumínio/aço, que são respectivamente 0,53 e 0,61. [22] Como a força exercida pela mola já é conhecida e o binário de aperto também já foi definido, é possível dimensionar a ligação entre os dois componentes.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

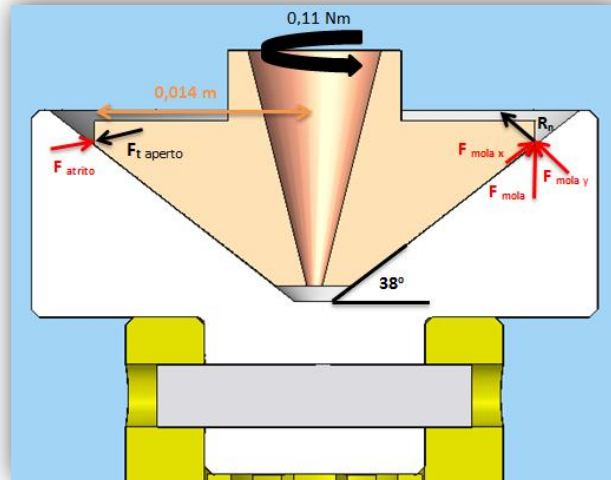


Figura 3.71) Esquema das forças de ligação entre o Porta-nozzle e o nozzle.

Observando a figura 3.71, é possível verificar que existe uma relação directa entre a força de atrito (tangencial) e a força tangencial de aperto. Desta forma, para que o nozzle rode de forma solidária com o Porta-nozzle é necessário que a força de atrito seja sempre superior à força tangencial de aperto/desaperto durante a operação. A fase mais adversa da operação de desaperto é o início, pois a deformação inserida na mola é mínima e o binário requerido é máximo. Assim, a ligação por atrito vai ser dimensionada para este caso, pois é a situação mais desfavorável que pode existir durante a troca do nozzle. A tabela seguinte apresenta os parâmetros necessários para se efectuar o dimensionamento desta ligação.

Tabela 26) Parâmetros necessários para o dimensionamento da ligação por atrito.

Binário de aperto [Nm]	Coefficiente de atrito (μ)	Força mínima exercida pela mola [N]	Braço da força tangencial (b) [m]
0,12	0,57	3	0,014

Desta forma tem-se o seguinte:

$$F_{tangencial\ aperto} = \frac{M}{b} \Leftrightarrow F_{tangencial\ aperto} = \frac{0,11}{0,014} \Leftrightarrow F_{tangencial\ aperto} = 7,86\text{ N}$$

$$F_a = \mu * R_n \Leftrightarrow F_a = 0,57 * F_{mola} * \cos 38 \Leftrightarrow F_a = 0,57 * 3 * \cos 38 \Leftrightarrow$$

$$F_a = 1,35\text{ N}$$

Através deste cálculo verifica-se que a força exercida pela mola é insuficiente para fazer rodar o nozzle e o Porta-nozzle de forma solidária. Para resolver esta situação pode-se utilizar uma mola com um coeficiente de elasticidade superior ou então revestir o Porta-nozzle com uma tinta aderente de borracha. A segunda solução parece mais interessante, pois a utilização de uma mola com maior coeficiente de elasticidade pode induzir uma força muito elevada no suporte cerâmico da cabeça e por conseguinte danificá-lo. No

entanto, existe uma forma de minimizar este problema, que consiste em ordenar à cabeça que efectue uma compressão superior à mola antes do início do desaperto, no entanto, esta compressão não poder ser superior a 4 ou 5 mm sob pena de em seguida ser impossível desapertar na totalidade o nozzle.

De qualquer forma este problema pode nem ser muito importante, pois o binário de aperto/desaperto é estimado, pelo que se na realidade o seu valor for inferior, a força tangencial também o vai ser havendo assim uma aproximação maior entre a força de atrito e a componente tangencial do aperto. Esta é uma daquelas situações que só poderá ser resolvida de forma correcta através da construção de um protótipo.

3.4.2.6 Sequência de montagem

O desenvolvimento de qualquer sistema mecânico preconiza a definição de uma sequência lógica de montagem. Não interessa construir algo que não possa ser montado e industrializado de forma simples e funcional, pelo que durante o desenvolvimento deste sistema houve uma constante atenção a este pormenor. A montagem total da gaveta preconiza a elaboração de quatro etapas individuais que serão apresentadas em seguida.

➤ Etapa 1: Montagem da placa superior

Esta primeira etapa, demonstrada nas figuras 3.72 e 3.73, serve essencialmente para a colocação dos 18 sistemas de aperto na placa superior. A sequência correcta de montagem é a seguinte:

1. Colocar o rolamento num dos orifícios existentes na placa. O rolamento deve ser empurrado pelo orifício, até que a sua pista exterior embata no batente da placa;
2. Inserir a anilha torneada e a mola no veio estriado. Estes dois componentes devem ser montados pela parte inferior do veio e a anilha deve ser encostada ao topo do estriado;
3. Inserir o veio no rolamento até que a anilha torneada embata na pista interior do rolamento;
4. Inserir o cubo estriado no veio até que este encoste na mola;
5. Embutir o tubo guia na placa e apertar os 4 parafusos. Quando o tubo está devidamente apertado todos os componentes que se encontram no seu interior ficam presos;

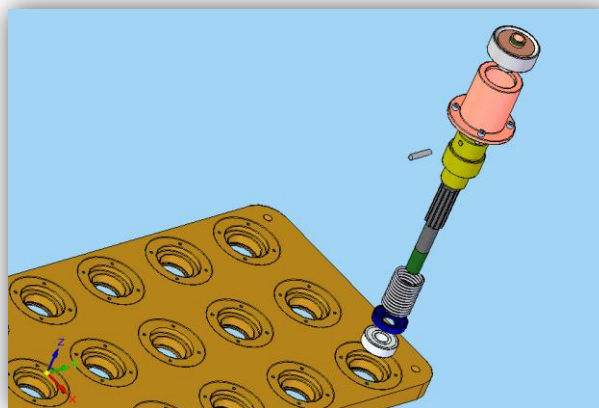


Figura 3.72) Montagem do sistema de aperto na placa superior.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

6. Repetir os passos anteriores mais 17 vezes;
7. Virar a placa e todos os componentes já montados ao contrário;
8. Inserir as anilhas torneadas e a roda dentada no veio estriado, pela ordem demonstrada na figura 3.73;
9. Inserir a cavilha num dos orifícios existentes e em seguida colocar as anilhas e a roda dentada intermédia pela ordem da figura 3.73;
10. Repetir o passo anterior mais 11 vezes;

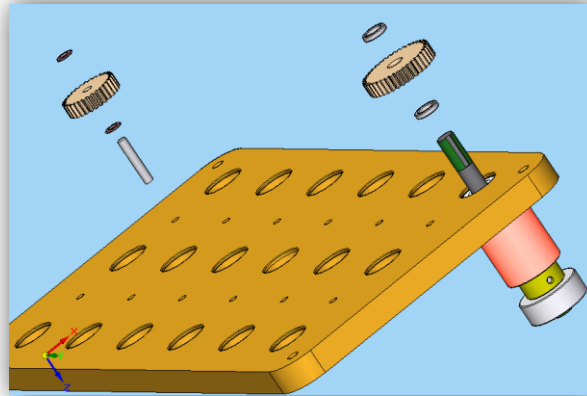


Figura 3.73) Montagem dos inversores e das rodas dentadas de cada Porta-nozzle.

➤ Etapa 2: Montagem da placa inferior:

Quando os sistemas de aperto e a cadeia de engrenagens estão no devido lugar, deve-se iniciar a montagem da placa inferior. Esta etapa deve ser efectuada pela seguinte sequência:

1. Encaixar a placa inferior nas cavilhas da placa superior por forma a garantir o correcto posicionamento destes dois componentes;
2. Apertar os 4 parafusos que se destinam a prender as duas placas;

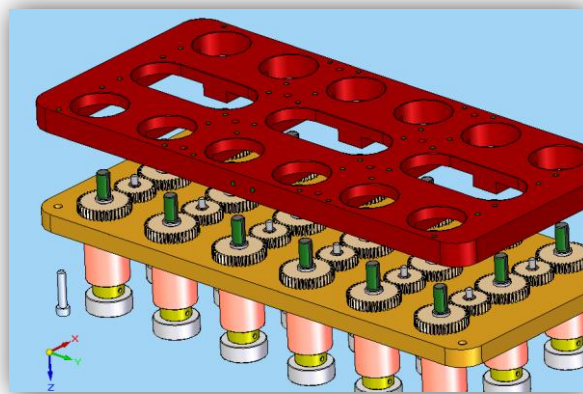


Figura 3.74) Aperto da placa inferior na superior.

3. Embutir as tampas nos orifícios da placa inferior;
4. Embutir os rolamentos nas tampas, até que embatam nos batentes;

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

5. Inserir as anilhas nos veios e apertar as fêmeas por forma a empancar os rolamentos;
6. Apertar os 4 parafusos de cada tampa à placa inferior;
7. Repetir os passos anteriores mais 5 vezes;

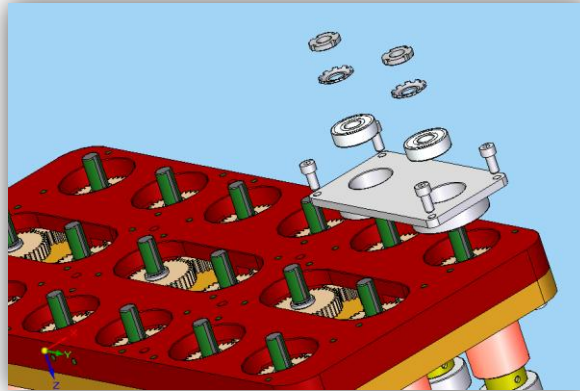


Figura 3.75) Colocação dos rolamentos e das tampas na placa inferior.

➤ Etapa 3: Montagem dos motores:

Com as tampas dos sistemas de aperto correctamente colocadas, falta apenas efectuar a montagem dos motores. Uma vez que cada motor está acoplado a uma tampa e é impossível fazer passar por esta o pinhão, é necessário pré-montar toda a unidade motora à parte. A montagem das unidades motoras é efectuada pela seguinte ordem:

1. Inserir o motor na tampa e apertar os 4 parafusos destinados a prender os dois componentes;
2. Inserir a abraçadeira no veio motor e apertá-la com o parafuso;
3. Inserir a roda dentada no veio e apertá-la à abraçadeira através de 3 parafusos;
4. Desapertar a abraçadeira e alinhar a face superior da roda dentada com o topo do veio;
5. Apertar a abraçadeira, por forma a prender todo o conjunto;
6. Repetir os passos anteriores mais duas vezes;

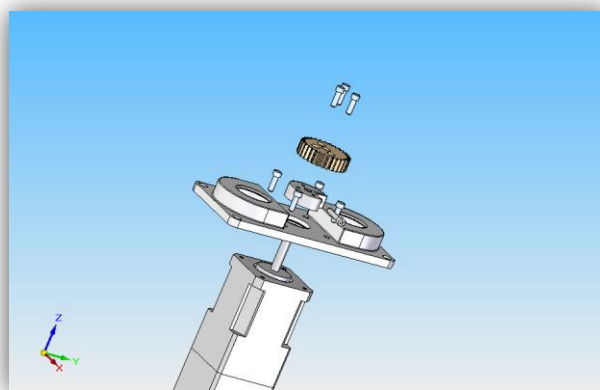


Figura 3.76) Pré-montagem do motor.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

➤ Etapa 4: Montagem dos motores na placa inferior:

Com a montagem das 3 unidades motoras concluída falta apenas colocá-las na placa inferior, por forma a terminar a montagem do sistema. Esta etapa deve ser efectuada, tal com as 2 primeiras, com o sistema virado ao contrário uma vez que não se pode apertar as tampas do motor à placa inferior de imediato. A sequência de montagem desta etapa é a seguinte:

1. Embutir as tampas do motor nos orifícios da placa inferior;
2. Inserir os rolamentos no veio, até que estes embatem nos batentes da tampa;
3. Inserir as anilhas no veio e apertar as fêmeas de segurança, por forma a empancar os rolamentos;
4. Apertar os 4 parafusos das tampas à placa inferior;

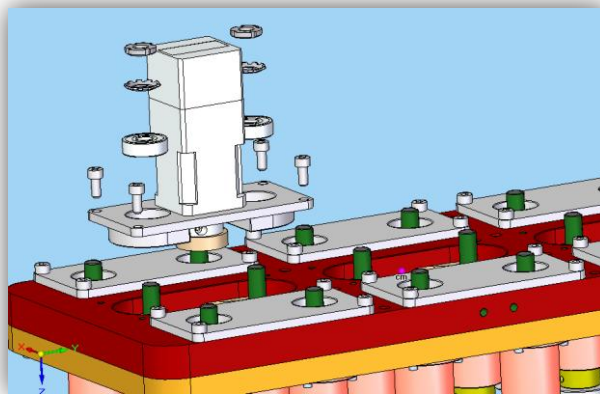


Figura 3.77) Montagem da unidade motora na placa inferior.

3.4.2.7 Conclusão relativa à solução

Estando terminado o desenvolvimento desta solução é possível afirmar que foram atingidos os objectivos propostos no início. A solução da gaveta foi desenvolvida com o objectivo de eliminar os problemas de engate e de precisão do prato rotativo, tendo-se conseguido isso através da utilização da cadeia de engrenagens e da definição do posicionamento estático dos Porta-nozzles.

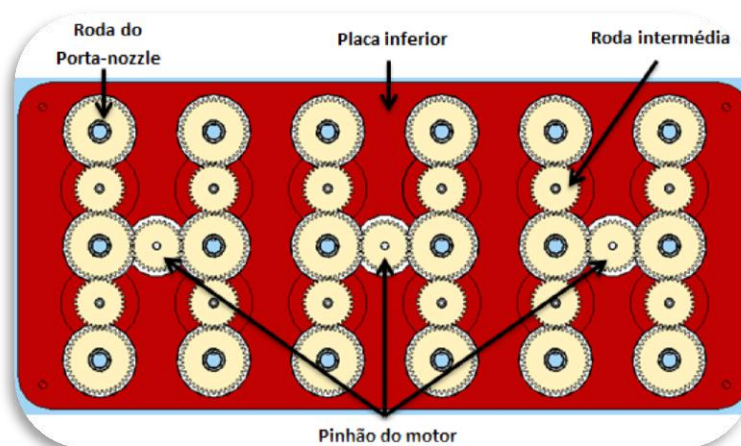


Figura 3.78) Cadeia cinemática escolhida para a gaveta.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

O ponto mais complicado do desenvolvimento desta solução foi o dimensionamento da cadeia de engrenagens, pois o contacto entre duas rodas dentadas preconiza sempre uma perda de rendimento, que neste caso concreto se traduz na impossibilidade de apertar todos os nozzles armazenados com o mesmo binário. Este problema é vital, porque o nozzle aperta num suporte cerâmico que se encontra na cabeça, pelo que se a diferença de binário entre os sistemas de aperto for muito grande é provável que o suporte quebre durante o aperto/desaperto do nozzle mais próximo do motor. Assim, para tornar o sistema o mais eficiente possível efectuou-se uma análise de rendimento a 4 cadeias, tendo-se variado entre cada uma o posicionamento do motor/motores, o entre-eixo da engrenagem e ainda a capacidade do sistema. O resultado deste estudo traduziu-se numa cadeia final com capacidade para 18 sistemas de aperto, que se apresentam subdivididos de forma equitativa por 3 matrizes 3x2. Como cada uma destas matrizes tem motorização individual, a cadeia de engrenagens a alimentar é menos extensa, pelo que a perda de binário entre o primeiro e o último sistema de aperto é de apenas 10%, valor este que foi considerado como aceitável.

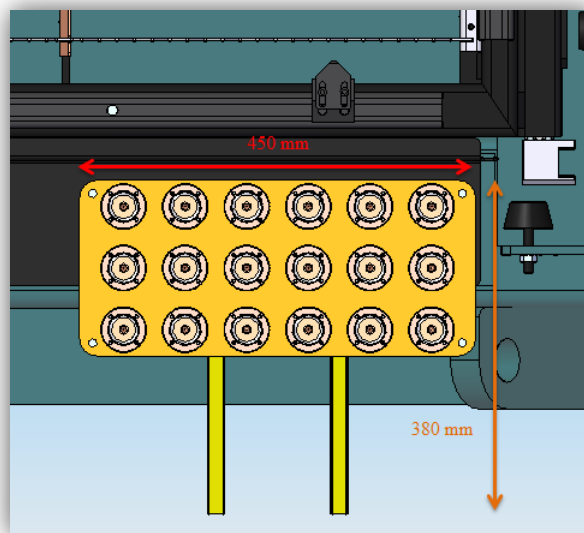


Figura 3.79) Atravancamentos do sistema.

No que toca aos atravancamentos o sistema desenvolvido respeita integralmente as especificações de produto, apresentando respectivamente 450 mm e 380 mm de atravancamento transversal e longitudinal. Contudo, é de esperar que o atravancamento longitudinal aumente, pois é necessário equipar o sistema com algum tipo de accionamento, no entanto, isso não deve ser problemático pois basta subir ligeiramente a gaveta de modo a impedir que esta embata nas dobradiças da porta. O atravancamento vertical foi amplamente respeitado, pois o sistema apresenta 205 mm de altura, existindo ainda uma folga de 75 mm que vai ser aproveitada para inserir o sistema de accionamento. O curso de accionamento deste sistema é ligeiramente superior ao do prato rotativo, pois é necessário fazer entrar toda a gaveta na área de corte, no entanto, este aumento foi de apenas 50 mm (de 200 mm para 250 mm) pelo que se pode considerar este valor como aceitável.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Tendo em conta que este sistema respeita todas as especificações de projecto, é simples e resolve os problemas da primeira solução modelada, acabou por ser o escolhido para equipar os Centros de corte da ADIRA.

3.5 Implementação da gaveta no centro de corte

Este capítulo serve para demonstrar as fases de implementação da gaveta no centro de corte. Anteriormente, na definição das especificações de produto, definiu-se que a gaveta terá de ficar colocada na zona frontal do centro de corte, descaída sobre o lado direito, e imediatamente encostada à mesa móvel por forma a diminuir o curso de accionamento, pelo que nesta fase com o posicionamento definido foi apenas necessário criar um suporte para o sistema, definir do tipo de guiamento e de accionamento e finalmente, modelar uma blindagem que proteja a gaveta do feixe laser e da projecção de detritos durante o funcionamento do centro de corte. Assim sendo, em seguida abordam-se estas 4 etapas de forma individualizada, apresentando em cada uma delas as novas peças modeladas e ainda, sempre que se justifique, os cálculos efectuados.

3.5.1 Definição do guiamento do sistema

A fase de implementação na área de corte iniciou-se com a escolha do tipo de guiamento a fornecer ao sistema. Como é sabido, a gaveta tem de transladar para o interior da área de corte, pelo que a forma mais simples e barata de fornecer guiamento a um movimento desta natureza é através da utilização de guias e de patins de esferas. Assim sendo definiu-se que o guiamento vai ser efectuado por intermédio de duas guias e dois patins, tendo-se optado por este número com o objectivo de efectuar uma distribuição mais correcta do peso da gaveta e por conseguinte aumentar a vida útil do sistema.

Com o tipo de guiamento e o número de componentes definido, a única dúvida que se levantou foi se seria mais interessante prender as guias ou os patins. Normalmente, sempre que se emprega um guiamento deste tipo o elemento estático é a guia sendo o patim a transladar sobre ela, no entanto, como neste caso se pretende que o sistema seja o mais exíguo possível optou-se por fazer o contrário. Esta configuração trás vantagens, nomeadamente o facto de permitir que tanto o suporte como a gaveta sejam mais pequenos. O suporte só necessita de apresentar dimensão longitudinal suficiente para acomodar o patim (70 mm), dimensão que seria bastante superior caso fosse a guia o elemento estático, enquanto a gaveta pode ficar com as dimensões actuais, bastando acoplar umas guias suficientemente compridas para fazer chegar todos os nozzles à área de corte.

Para acoplar as guias à gaveta foi necessário modelar uma régua em alumínio que está demonstrada na figura 3.80. Esta régua para além de prender a guia vai também ajudar a aumentar o espaçamento entre o sistema e o suporte e, por conseguinte, eliminar possíveis interferências entre componentes estáticos e os móveis.

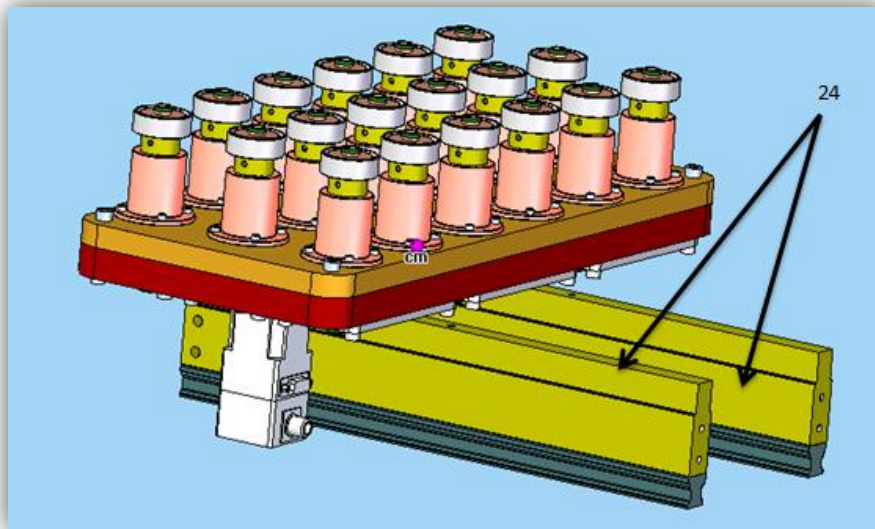


Figura 3.80) Réguas de alumínio modeladas como objectivo de fazer a ligação entre a gaveta e as guias.

Através da base de dados da ADIRA S.A. verificou-se que a empresa já utiliza guias e patins da Bosch Rexroth, pelo que consultando o catálogo deste fabricante se escolheram os seguintes modelos:

- **Patins: R 1622 894 20**
- **Guias: R 1605 804 31**

Com as guias e os patins escolhidos, falta apenas verificar se estes modelos são capazes de absorver os momentos a que são submetidos quando a gaveta translada para o interior da área de corte. As forças responsáveis por estes momentos são respectivamente, a força exercida pela mola durante o aperto e o peso da gaveta. Ambas as forças criam momentos segundo o eixo dos XX e dos YY, no entanto, para efeitos de cálculo vai-se considerar apenas o momento exercido sobre este último eixo. O momento flector segundo o eixo dos XX também é importante, no entanto, como neste caso o peso da gaveta está aplicado no centro do sistema e o braço das forças é menor, optou-se por desprezar esta componente. Recorrendo ao Solid Edge determinou-se o peso da gaveta e o valor do braço das forças referidas, que são os seguintes:

- **Peso da gaveta: 20 Kg**
- $F_{gaveta} = 20 * 9,8 = 196 \text{ N}$
- $B_{gavetaX} = 184,1 \text{ mm}$
- $B_{molaX} = 270,5 \text{ mm}$

A força da mola no início do aperto já foi determinada sendo:

- $F_{mola_{aperto}} = 7,5 \text{ N}$

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

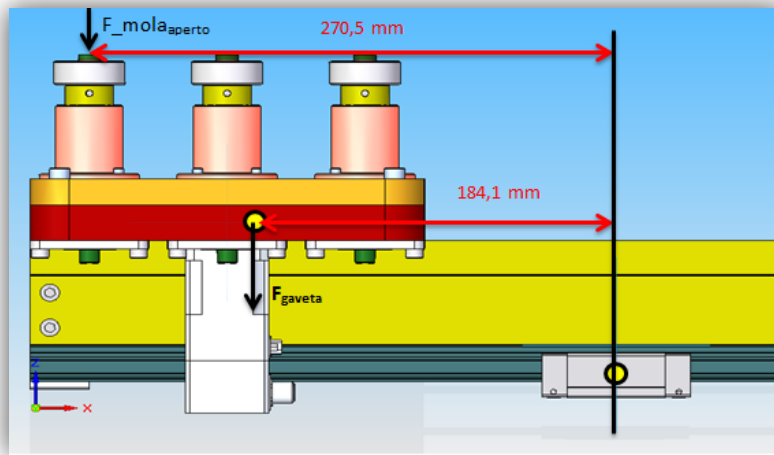


Figura 3.81) Forças e respectivos braços responsáveis pelo momento aplicado sobre os patins de esferas no eixo dos YY.

Sabendo o valor das forças e ainda os braços de aplicação calculou-se o momento máximo exercido sobre os patins no eixo dos YY, que é:

$$M_{fY} = F_{mola_aperto} * b_{molaX} + F_{gaveta} * b_{gavetaX}$$

$$\Leftrightarrow M_{fY} = 7,5 * 270,5 + 196 * 184,1$$

$$\Leftrightarrow M_{fY} = 38112,35 \text{ Nmm}$$

Logo o momento máximo aplicado em cada patim é:

$$M_{fY_patim} = \frac{38112,35}{2} \Leftrightarrow M_{fY_patim} = 19056,18 \text{ Nmm}$$

Pela figura seguinte, retirada do catálogo da Bosch Rexroth, verifica-se que cada patim suporta 130 Nm de momento longitudinal, pelo que o coeficiente de segurança para o patim escolhido é o seguinte: [34]

$$CS = \frac{130000}{19053,18} \Leftrightarrow CS = 6,82$$

M_t [Nm]	240	
$M_{t0 \text{ stat}}$ [Nm]	310	
M_l [Nm]	130	
M_{L0} [Nm]	165	

Figura 3.82) Momentos flectores máximos admitidos pelo patim escolhido.

Este coeficiente de segurança foi considerado como satisfatório, pelo que os patins escolhidos são suficientes para a aplicação.

3.5.2 Modelação do suporte

Estando o problema do guiamento resolvido iniciou-se então a modelação do suporte que se destina a acomodar a gaveta. Este suporte vai ficar colocado na trave frontal de união dos montantes do centro de corte, que está demonstrada na figura 3.83. Esta trave apresenta 150 mm de espessura pelo que se procurou modelar um suporte com dimensões longitudinais inferiores a esta.



Figura 3.83) Zona de apoio do suporte

Assim modelou-se um suporte constituído por 4 peças individuais, maquinadas em alumínio, que apresenta um atravancamento longitudinal de 100 mm e uma espessura constante de 20 mm em todas as peças. O constituinte principal do suporte é a base (26), que se destina a suportar todo o peso do sistema e ainda a conferir ajuste ao posicionamento da gaveta. Este ajuste é conseguido através da utilização de 4 pernos roscados, que estão em contacto constante com a estrutura do centro de corte, e que ao serem apertados ou desapertados permitem que a gaveta suba ou desça. Nas duas faces laterais da base estão apertados dois montantes (25), que se destinam a acomodar os suportes dos patins (28) e oferecer ajuste à flange (27) de suporte do cilindro. Esta flange vai ficar apertada entre os montantes e pode transladar na horizontal, através de dois rasgos efectuados nestes componentes. O suporte modelado para a gaveta está demonstrado na figura ao lado.

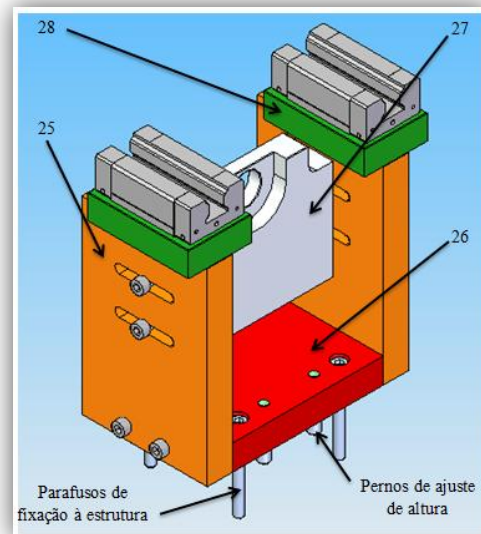


Figura 3.84) Constituintes do suporte.

A sequência de montagem do suporte é extremamente simples, sendo necessário em primeiro lugar apertar os dois montantes à base e em seguida apertar o flange entre estes dois componentes. Finalmente colocam-se os suportes dos patins por cima dos montantes e apertam-se os patins.

3.5.3 Definição de accionamentos

Como já foi referido anteriormente pretendia-se que o accionamento da gaveta fosse simples, pelo que se optou por um cilindro pneumático de duplo efeito. A maioria dos componentes pneumáticos utilizados na ADIRA S.A. é da Festo, pelo que se recorreu ao catálogo “online” deste fabricante para escolher o cilindro pretendido.

Tendo em conta que o espaço para colocação do cilindro não é abundante optou-se pela gama de cilindros DSNU, cujas dimensões compactas e forma cilíndrica é ideal para esta aplicação. Para efectuar a escolha do cilindro foi necessário em primeiro lugar definir o peso do sistema, o curso de accionamento necessário e o tempo de avanço/recuo requerido, cujos valores são os seguintes:

- **Peso do sistema: 20 Kg**
- **Curso de accionamento: 250 mm**
- **Tempo de avanço/recuo requerido: aproximadamente 2 s**

Consultando a gama DSNU escolheu-se o cilindro mais exíguo disponível capaz de fornecer o curso de accionamento requerido, que é o seguinte:

- **DSNU-20-250-PPV-A**

Este cilindro apresenta as seguintes características: [35] (Anexo E)

- **Diâmetro de êmbolo: 20 mm**
- **Curso: 250 mm; (0.25 m)**
- **Pressão de funcionamento: até 6 bar**
- **Força teórica de avanço: $F = P * A \Leftrightarrow F = 0.6 * \pi * 10^2 \Leftrightarrow F = 188,5$**
- **Energia cinética admissível: 0,2 J**
- **Amortecimento de fim de curso**

Em seguida procurou-se determinar se este cilindro é capaz de efectuar o movimento de avanço e de recuo no tempo definido. Para isso aproximou-se o funcionamento do cilindro por uma relação velocidade/tempo como a da figura 3.85 e determinou-se o tempo teórico que a haste demora a abrir, utilizando para isto a segunda lei de Newton (1) e a equação do movimento rectilíneo uniformemente acelerado (2).

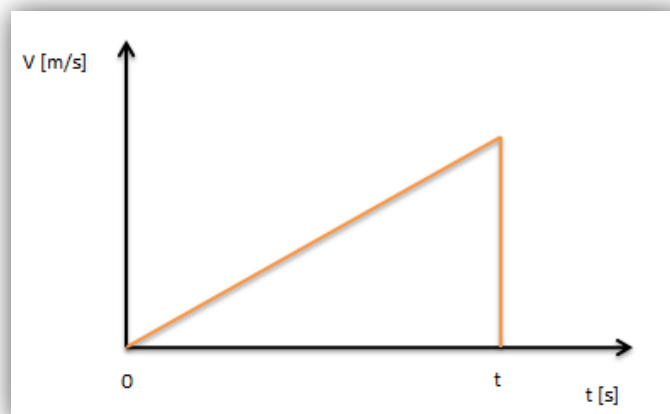


Figura 3.85) Variação teórica da velocidade com o tempo, num cilindro pneumático.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

$$F = m * a \quad (1)$$

$$x = x_0 + V_0 * t + \frac{1}{2} * a * t^2 \quad (2)$$

Substituindo os valores conhecidos nas equações anteriores tem-se:

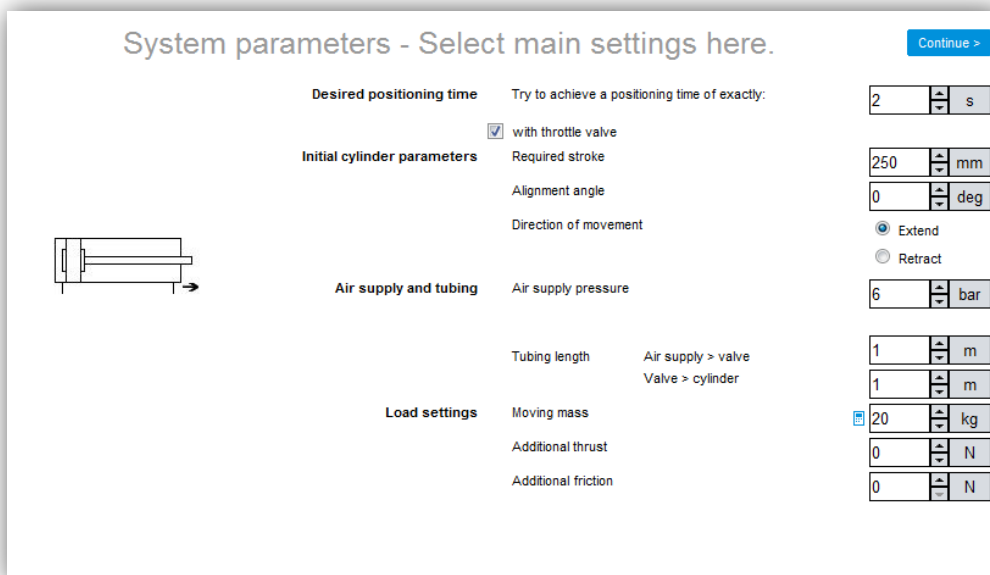
$$188,5 = 20 * a \Leftrightarrow a = 9,425 \text{ m/s}^2$$

$$0,25 = 0 + 0 + \frac{1}{2} * 9,425 * t^2 \Leftrightarrow t = 0,23 \text{ s}$$

O resultado obtido indica que este cilindro, em teoria, consegue movimentar a gaveta de 20 kg em 0,23 segundos, valor este claramente inferior aos 2 segundos pretendidos, pelo que se considerou que é suficiente para a aplicação. Idealmente seria interessante utilizar um cilindro com menor diâmetro de êmbolo (para diminuir a força exercida e por conseguinte a aceleração), no entanto, nesta gama não existe mais nenhum cilindro com diâmetro de êmbolo inferior capaz de fornecer o curso pretendido, pelo que acabou por se utilizar este.

Com o cilindro escolhido recorreu-se ao “software” da Festo para determinar os parâmetros de funcionamento óptimos, tendo-se para isso efectuado duas interações onde apenas se variou a pressão de alimentação. Os resultados destas iterações são apresentados de seguida.

➤ 1ª Iteração: Pressão de funcionamento de 6 Bar



The screenshot shows the 'System parameters - Select main settings here.' window of the Festo software. It includes a 'Continue >' button in the top right. On the left, there is a diagram of a pneumatic cylinder. The settings are organized into several sections:

- Desired positioning time:** A text prompt 'Try to achieve a positioning time of exactly:' followed by a numeric input field set to '2' and a unit dropdown set to 's'.
- Initial cylinder parameters:**
 - A checked checkbox 'with throttle valve'.
 - 'Required stroke' set to '250' mm.
 - 'Alignment angle' set to '0' deg.
 - 'Direction of movement' with radio buttons for 'Extend' (selected) and 'Retract'.
- Air supply and tubing:**
 - 'Air supply pressure' set to '6' bar.
 - 'Tubing length' with two input fields: 'Air supply > valve' set to '1' m and 'Valve > cylinder' set to '1' m.
- Load settings:**
 - 'Moving mass' set to '20' kg.
 - 'Additional thrust' set to '0' N.
 - 'Additional friction' set to '0' N.

Figura 3.86) Colocação dos parâmetros de funcionamento requeridos no “software” da Festo.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Os resultados fornecidos pelo computador para a pressão de 6 Bar estão explanados na figura 3.87. Verifica-se que para esta pressão é possível distender a haste em 2,09 segundos, no entanto o amortecimento de fim de curso tem de estar regulado para 100% e a energia cinética de impacto atinge os 0,27 J, valor este superior aos 0,2 J máximos admissíveis por este modelo. Desta forma é possível utilizar o cilindro nesta configuração, no entanto, é expectável que a sua vida útil diminua bastante, pelo que se efectuou uma nova interacção.

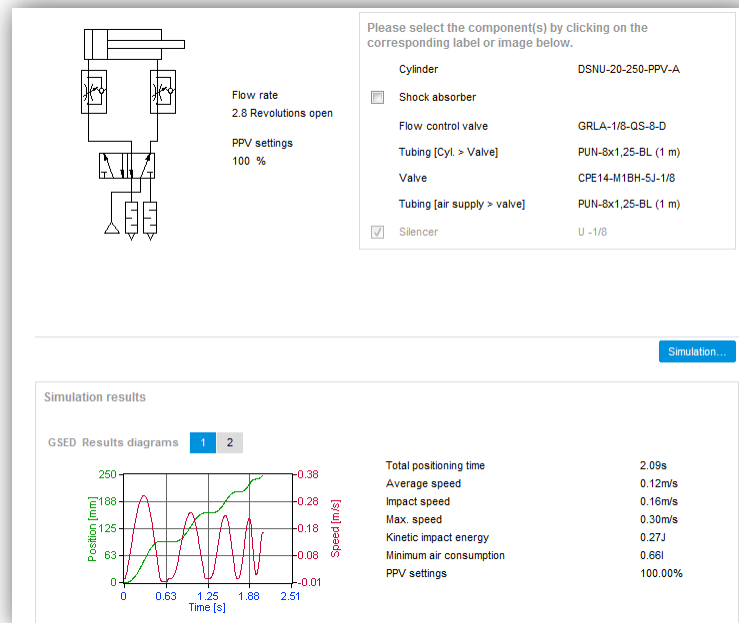


Figura 3.87) Resultados obtidos para a pressão de 6 bar.

➤ 2ª Iteração: Pressão de funcionamento de 3 Bar.

The screenshot displays the "System parameters" configuration screen in the Festo simulation software. The screen is divided into four tabs: "1. System parameters", "2. Cylinder selection", "3. Selection and simulation", and "4. Parts list". The "1. System parameters" tab is active, showing a "Continue >" button in the top right corner.

The "System parameters - Select main settings here." section contains the following settings:

- Desired positioning time: 2 s
- Initial cylinder parameters:
 - ☒ with throttle valve
 - Required stroke: 250 mm
 - Alignment angle: 0 deg
 - Direction of movement: ☒ Extend, ☐ Retract
- Air supply and tubing:
 - Air supply pressure: 3 bar
 - Tubing length:
 - Air supply > valve: 1 m
 - Valve > cylinder: 1 m
- Load settings:
 - Moving mass: 20 kg
 - Additional thrust: 0 N
 - Additional friction: 0 N

Figura 3.88) Colocação dos parâmetros de funcionamento requeridos no “software” da Festo.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

Os resultados obtidos para a pressão de 3 Bar estão explanados na figura 3.89. Verifica-se que a diminuição da pressão de alimentação conduziu a resultados bastante mais interessantes. O tempo de distensão obtido (2,25 s) é bastante aproximado do valor requerido, enquanto o valor de energia cinética desceu para 0,06 J e o amortecimento de fim de curso pode ser regulado para apenas 20%. Estes resultados são satisfatórios pelo, que se sugere que na fase de implementação do sistema se utilize esta pressão de funcionamento.

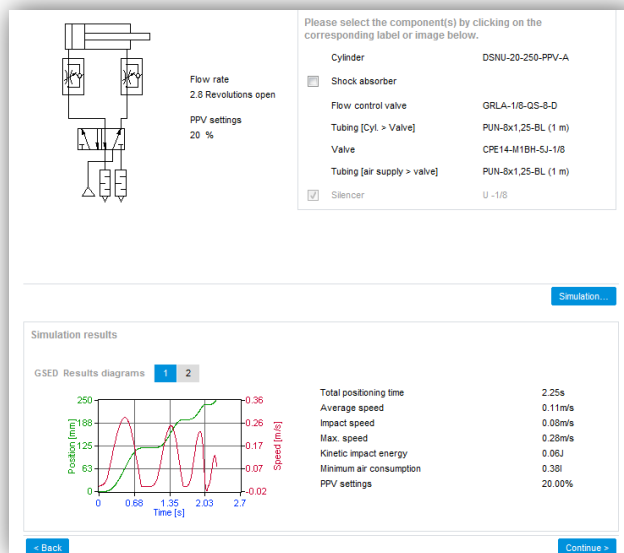


Figura 3.89) Resultados fornecidos para a pressão de 3 Bar.

Com o cilindro e os parâmetros de funcionamento definidos modelaram-se 2 novas peças para a gaveta. A primeira peça é um avental em alumínio (29) com 20 mm de espessura, que vai ficar apertado entre as réguas e contém um furo roscado onde se vai apertar a ponta da haste do cilindro. Esta peça foi modelada com duas finalidades que são, respectivamente, a de efectuar a ligação entre o cilindro e a gaveta (para permitir a translação do sistema para a área de corte) e a de funcionar como batente, para que as guias não saiam dos patins durante o recuo da gaveta.

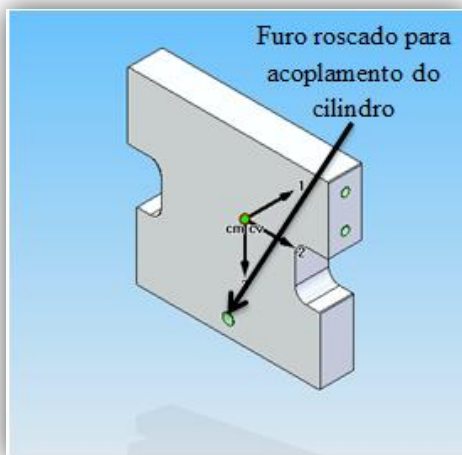


Figura 3.90) Avental para ligação da gaveta ao cilindro pneumático.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

A outra peça é uma chapa de aço (30) com 4 mm de espessura, que se destina a impedir que as guias possam sair dos patins durante a montagem ou durante o avanço da gaveta, no caso de alguma anomalia no cilindro. Esta chapa vai ficar apertada na face traseira de umas das réguas e vai utilizar como limitador, tal como o avental, o suporte dos patins. Estas duas novas peças estão demonstradas na figura 3.91.

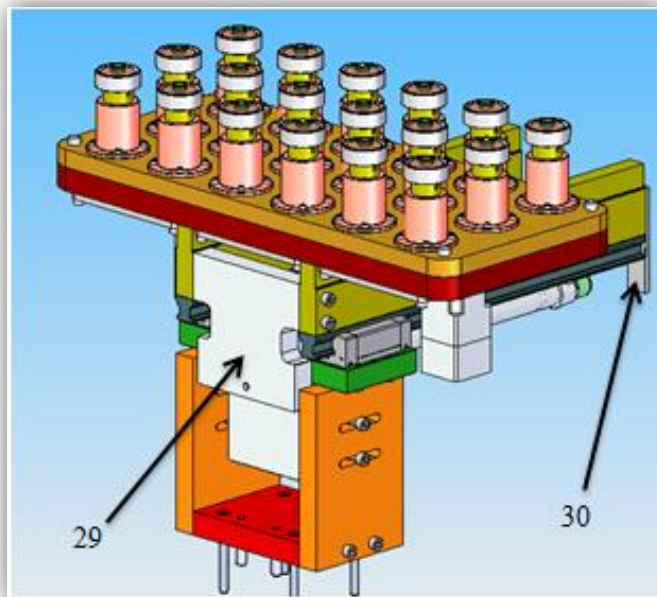


Figura 3.91) Demonstração do batente de chapa e do avental.

3.5.4 Modelação da blindagem

Como o sistema de troca de nozzle vai ficar inserido no interior de um centro de corte é essencial que fique devidamente protegido, pois o corte de chapa implica a projecção de poeiras que podem danificar um sistema tão frágil como este. Desta forma modelou-se uma blindagem simples constituída por 5 peças diferentes, que estão representadas nas figuras 3.92 e 3.93. O constituinte principal da blindagem é uma chapa em forma de U com 1,5 mm de espessura, que vai ser obtida por corte laser e quinagem. A esta chapa em U vai ser soldada uma outra (32) com 1 mm de espessura, cujo objectivo é tapar a face traseira da gaveta. Para tapar a parte frontal da gaveta foi adicionada uma outra chapa (33) de 1 mm de espessura que vai fechar por acção de duas dobradiças de mola (35). Cada uma das dobradiças vai ser apertada numa cantoneira de chapa (34), que por sua vez está soldada à chapa em U.

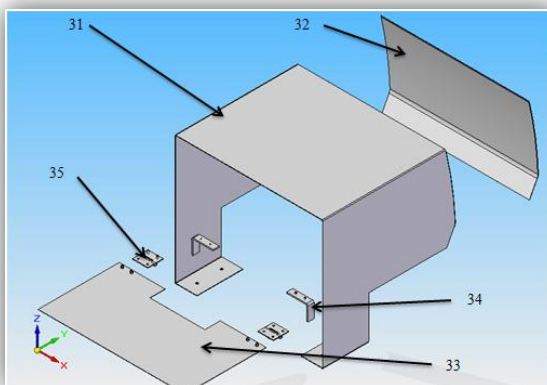


Figura 3.92) Demonstração dos constituintes da blindagem.

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

As dobradiças utilizadas só servem para fechar a tampa frontal, pelo que a abertura ficará a cargo do movimento de avanço da gaveta.

A montagem da blindagem é simples mas preconiza duas operações separadas. A primeira consiste em soldar a chapa traseira e as cantoneiras à chapa em forma de U, enquanto a segunda, que consiste no aperto da tampa e das dobradiças, só pode ser efectuada já com a blindagem em posição no centro de corte.

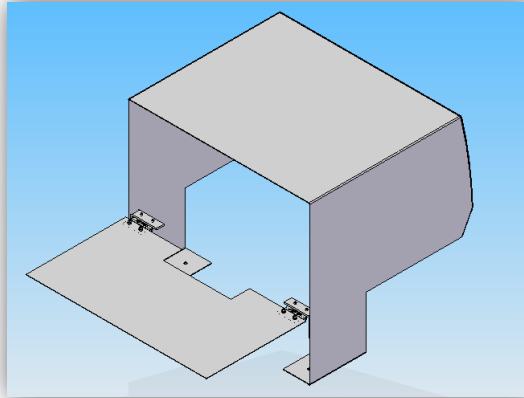


Figura 3.93) Aspecto final da blindagem modelada.

3.5.5 Implementação no centro de corte

Com todos os componentes modelados é agora necessário inseri-los no interior do centro de corte da ADIRA S.A. Desta forma, vai ser necessário efectuar algumas alterações à estrutura do centro de corte, nomeadamente a elaboração de oito furos roscados na trave de ligação dos montantes, cujo objectivo é prender o suporte e as blindagens. A posição aproximada destes furos está exemplificada na figura abaixo.

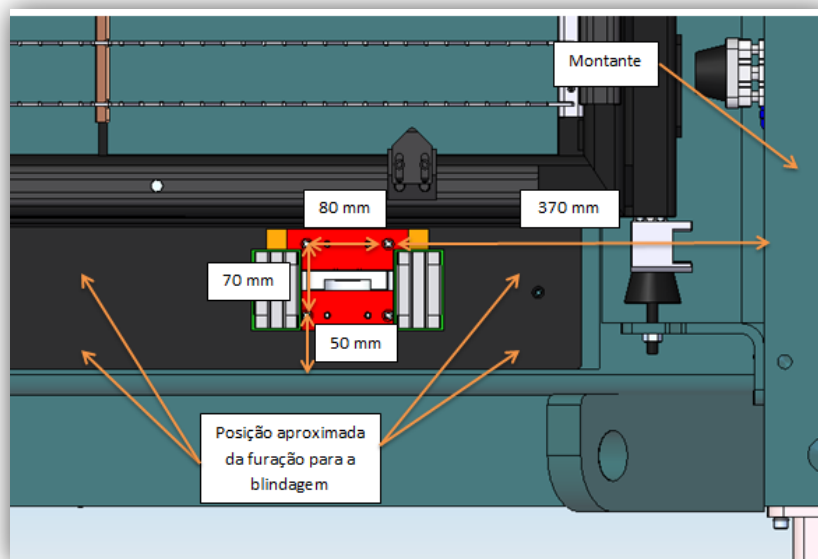


Figura 3.94) Posição dos 8 furos roscados necessários para prender o suporte e a blindagem.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Estando os furos efectuados é agora possível colocar o sistema de troca de nozzle em posição, bastando para isso apertar o suporte nos furos efectuados para o efeito e, em seguida, inserir as guias da gaveta nos patins que estão sobre o suporte. Com a gaveta correctamente colocada sobre o suporte aperta-se o batente de chapa à régua, com vista a impedir que as guias saiam acidentalmente do suporte e, por fim, aperta-se a haste e o corpo do cilindro ao avental e à flange, respectivamente.

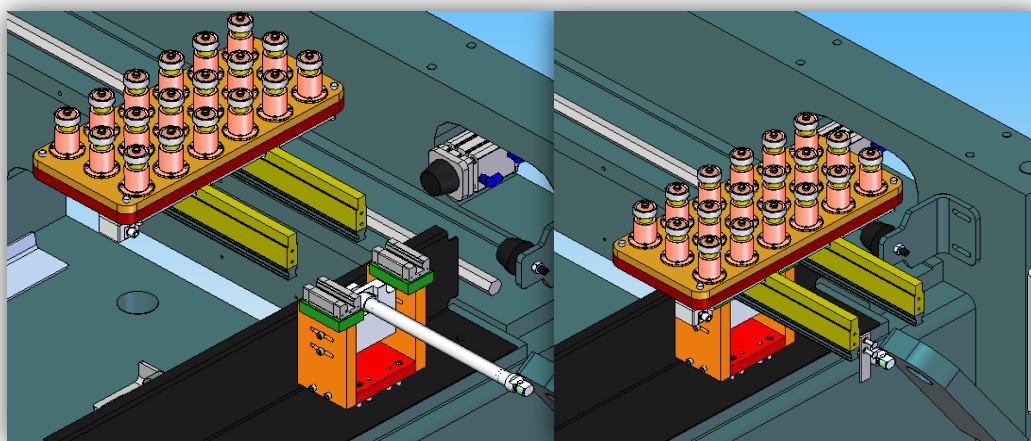


Figura 3.95) Sequência de montagem no interior do Centro de corte.

Quando a gaveta e o suporte estão em posição basta apertar a blindagem nos furos de fixação e assim cobrir a gaveta, estando desta forma todo o sistema montado. O aspecto final do sistema de troca de nozzle é o que está demonstrado na figura 3.96.

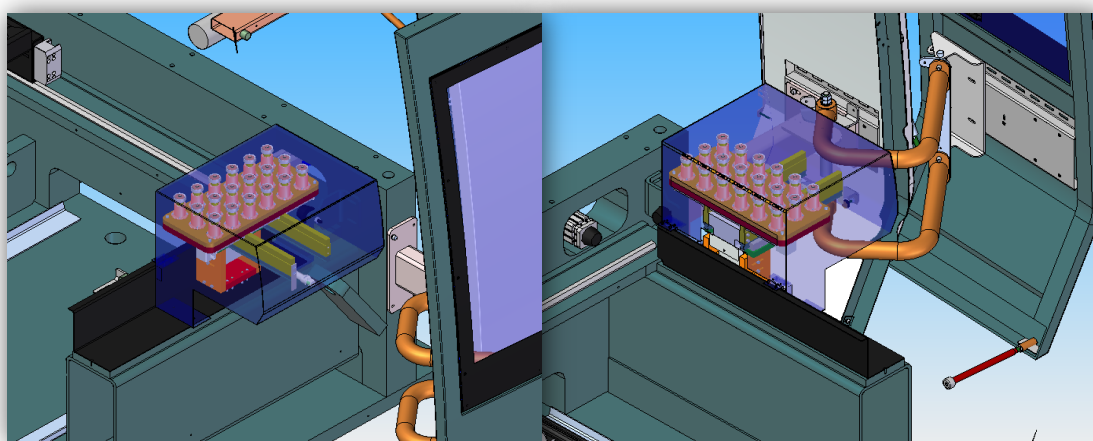


Figura 3.96) Aspecto final do sistema de troca de nozzle desenvolvido.

Com o sistema em posição é agora possível aferir se as restrições espaciais definidas na definição das especificações de produto (capítulo 3.3) estão correctas, bastando para isso verificar a folga existente entre a gaveta e a posição máxima atingida pela cabeça. No plano longitudinal existe uma folga de 37 mm entre a última fila de nozzles e a posição máxima da cabeça, enquanto no plano vertical, a folga verificada atinge os 40

Capítulo III - Desenvolvimento do sistema de troca automática de nozzle de corte

mm, pelo que desta forma é possível afirmar com toda a certeza que as dimensões definidas no capítulo 3.3 estão correctas. Estas folgas estão demonstradas na figura 3.97.

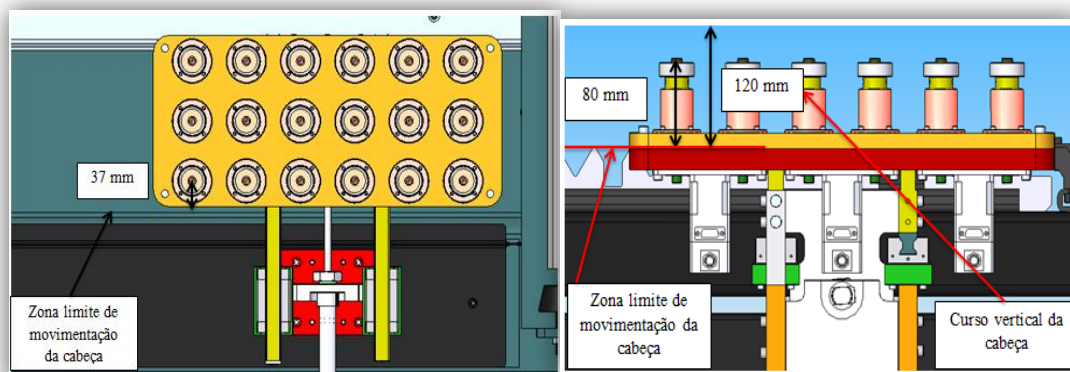


Figura 3.97) Folgas existentes entre a gaveta e a posição máxima da cabeça de corte.

Como o sistema desenhado está completamente adaptado às restrições do centro de corte, não se efectuou mais nenhuma alteração, tendo-se desta forma chegado ao fim da modelação do sistema de troca automática de nozzle. Assim, em seguida vai ser explicado o processo de funcionamento do sistema desenhado.

A troca de nozzle inicia-se com a retirada da mesa de corte e o accionamento do cilindro pneumático que por conseguinte obriga a gaveta a transladar para o interior da área de corte.

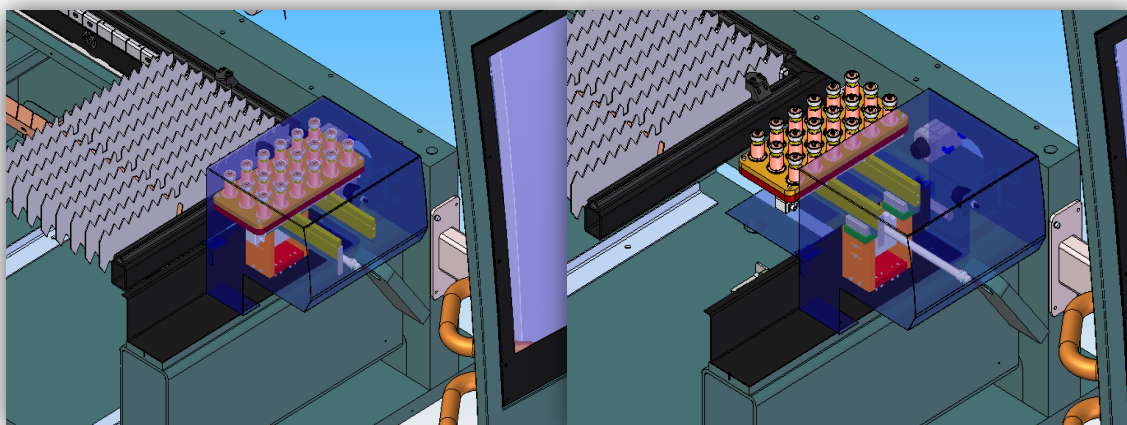


Figura 3.98) Início da operação de troca de nozzle.

Chegada a esta posição, a cabeça de corte movimenta-se para cima da gaveta e aperta/desaperta o nozzle pretendido, utilizando para isso o procedimento explicado no capítulo 3.4.2.3. Quando a operação de troca está concluída, a cabeça de corte retira-se de cima da gaveta e esta última regressa a posição inicial através da retracção da haste do cilindro. Em seguida a mesa de corte regressa à posição original e a operação de troca de nozzle está terminada.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

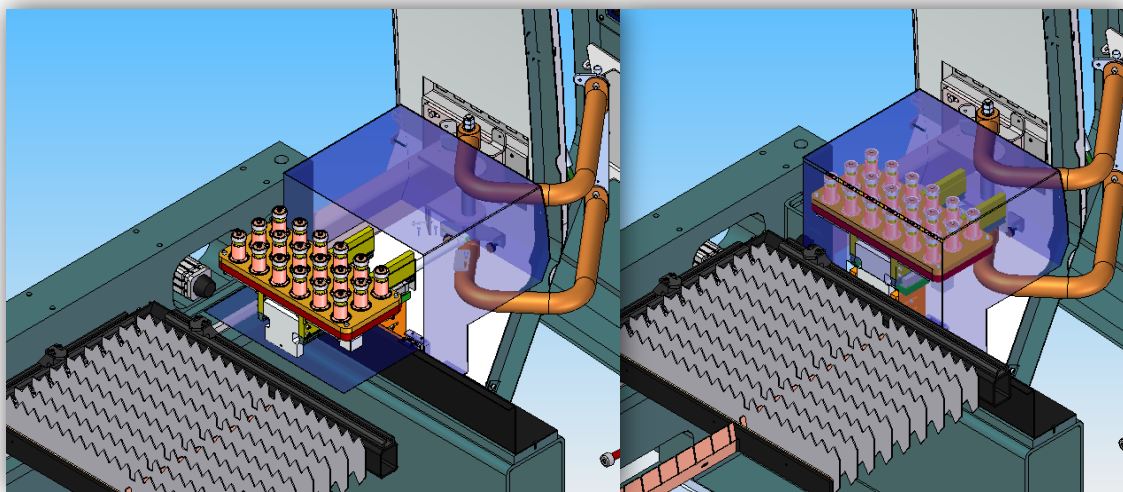


Figura 3.99) Fim da operação de troca de nozzle.

4 Capítulo IV – Análise de custos às soluções modeladas

Nesta secção vai ser efectuada uma análise de custos às soluções e ao suporte modelados. Esta análise vai incidir sobre três parâmetros diferentes que são o custo de matérias-primas, o custo de fabrico e por fim o preço dos componentes adquiridos a terceiros. No caso concreto deste trabalho, seria interessante efectuar uma comparação com o preço dos sistemas de troca de nozzle existentes no mercado, no entanto, esses valores são complicados de se obter, pelo que se optou simplesmente por comparar cada uma das soluções modeladas. Em seguida apresenta-se a estimativa de custos elaborada para cada solução e para o suporte, tendo-se subdividido a análise nos três parâmetros referidos anteriormente.

4.1 Custos de matérias-primas

Para se efectuar a estimativa dos custos de matérias-primas procurou-se numa primeira fase determinar o custo/Kg do material utilizado. Os componentes modelados vão ser construídos a partir de Aço Ck 45, Aço St 33 (componentes em chapa) e alumínio Al 2017-A, pelo que recorrendo à base de dados da ADIRA S.A. se determinaram preços aproximados para estes materiais, que são os seguintes:

- **Al 2017-A: 7,5 €/Kg**
- **Aço Ck 45: 1,6 €/Kg**
- **Aço St 33: 0,54 €/Kg**

Com o custo/Kg de cada material definido, em seguida determinaram-se as dimensões mínimas que cada componente deve apresentar antes de sofrer qualquer tipo de operação de fabrico, com vista à obtenção da peça final. Sabendo estas dimensões e o valor da massa volúmica de cada material determinou-se o peso de cada peça inicial e, multiplicando esse valor pelo custo, obteve-se uma estimativa do preço de matéria-prima para cada componente. Sabendo a quantidade necessária de cada componente, obteve-se o custo total do material necessário para fabricar todos os elementos que constituem as soluções. As tabelas 27, 28 e 29 apresentam os custos de matérias-primas para o prato rotativo, a gaveta e o suporte respectivamente.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Tabela 27) Custos de matérias-primas para o prato rotativo.

Prato rotativo							
Componente			Material	Dimensões iniciais [mm]	Peso inicial [Kg] (2)	Preço/kg [€] (1)	Custo [€] (1)*(2)*(3)
Nr.	Designação	Qt. (3)					
1	Prato rotativo	1	Al 2017-A	400*400*30	13,02	7,5	97,65
2	Placa inferior	1	Al 2017-A	400*400*10	4,34	7,5	32,55
3	Porta-nozzle	24	Al 2017-A	Ø 40*50	0,17	7,5	30,60
5	Patela 5	24	Al 2017-A	Ø 50*20	0,11	7,5	19,80
7	Patela 7	2	Al 2017-A	Ø 50*20	0,11	7,5	1,65
12	Abraçadeira	2	Al 2017-A	Ø 20*20	0,017	7,5	0,26
13	Veio central	1	Aço Ck 45	Ø 55* 120	2,29	1,6	3,66
15	Tubo guia	1	Al 2017-A	Ø 50*80	0,43	7,5	3,23
16	Acoplamento	1	Aço Ck 45	Ø 40*40	0,39	1,6	0,62
Custo total [€]							190,02

Tabela 28) Custos de matérias-primas para a gaveta.

Gaveta							
Componente			Material	Dimensões iniciais [mm]	Peso inicial [Kg] (2)	Preço/kg [€] (1)	Custo [€] (1)*(2)*(3)
Nr.	Designação	Qt. (3)					
1	Placa Superior	1	Al 2017-A	500*250*15	5,085	7,5	38,14
2	Placa inferior	1	Al 2017-A	500*250*20	6,78	7,5	50,85
4	Porta-nozzle	18	Al 2017-A	Ø 30*15	0,029	7,5	3,92
9	Anilha torneada	18	Al 2017-A	Ø 30*10	0,019	7,5	2,57
11	Anilha torneada	36	Aço Ck 45	Ø 20*3	0,007	1,6	0,40
16	Tubo guia	18	Al 2017-A	Ø 60*50	0,383	7,5	51,71
17	Tampas	9	Al 2017-A	120*60*15	0,293	7,5	19,78
20	Abraçadeira	3	Al 2017-A	Ø 15*10	0,005	7,5	0,11
23	Anilhas Laser	24	Aço St 33	20*20*1	0,003	0,54	0,04
29	Avental	1	Al 2017-A	120*120*20	0,781	7,5	5,86
30	Batente chapa	1	Aço St 33	50*40*20	0,075	0,54	0,04
Custo total [€]							173,40

Tabela 29) Custos de matérias-primas para o suporte

Suporte							
Componente			Material	Dimensões iniciais [mm]	Peso inicial [Kg] (2)	Preço/kg [€] (1)	Custo [€] (1)*(2)*(3)
Nr.	Designação	Qt. (3)					
24	Réguas	2	Al 2017-A	380*60*20	1,237	7,5	18,5
25	Montante	2	Al 2017-A	150*100*20	0,814	7,5	12,21
26	Base	1	Al 2017-A	100*120*20	0,651	7,5	4,88
27	Flange	1	Al 2017-A	100*120*20	0,651	7,5	4,88
28	Suporte patins	2	Al 2017-A	100*50*20	0,271	7,5	4,07
Custo total [€]							44,60

Capítulo IV – Análise de custos às soluções modeladas

A análise das tabelas anteriores permite concluir que os gastos com matérias-primas vão ser extremamente baixos. A solução do prato rotativo é cerca de 17 € mais cara do que a da gaveta, sendo isso explicável pelo elevado peso do prato rotativo (13 Kg) que acaba por contribuir para esta diferença, no entanto, os valores são tão próximos que não é possível afirmar que qualquer uma das soluções esteja em vantagem em relação à outra. A construção do suporte preconiza um gasto de 44,6 € em material, valor que é extremamente baixo e facilmente explicável através das pequenas dimensões deste elemento.

4.2 Custos de fabrico

Para se obter uma estimativa dos custos de fabricação foi necessário determinar os tempos e processos de fabrico de cada peça e, ainda, as taxas horárias das máquinas envolvidas no fabrico.

Recorrendo-se ao Sr. Abílio Cunha, que é responsável pela fabricação na ADIRA S.A., determinaram-se os tempos aproximados de fabrico e ainda os processos necessários para a fabricação de cada peça. Todas as peças desenvolvidas são obtidas através de processos simples, pelo que nas tabelas só será indicado o processo de fabrico principal, no entanto, as estimativas temporais do Sr. Abílio comportam todas as operações necessárias para construir a peça na totalidade.

Segundo o Sr. Abílio, todas as peças podem ser construídas em centros de maquinagem CNC, exceptuando o veio central do prato rotativo, que tem de ser fabricado num torno manual, e as anilhas (23) da gaveta e o batente de avanço do suporte, que têm de ser fabricados num centro de corte laser. Recorrendo ao Sr. José Meneses obtiveram-se os custos horários de operação de cada uma destas máquinas, que são os seguintes:

- **Centro de maquinagem: 30 €/h**
- **Torno manual: 15 €/h**
- **Centro de corte Laser: 100 €/h**

Multiplicando os valores das taxas horárias de cada máquina pelo tempo estimado de fabricação obteve-se o custo estimado de fabrico de cada componente, cujos valores estão apresentados nas tabelas 30, 31 e 32.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Tabela 30) Custos de fabrico para o suporte

Suporte								
Componente			Material	Proc. Fabrico	Máquina utilizada	Tempo Fabrico [h] (2)	Custo fabrico / h (1)	Custo [€] (1)*(2)*(3)
Nr.	Designação	Qt. (3)						
24	Réguas	2	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	0,5	30	30
25	Montante	2	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	0,33	30	19,8
26	Base	1	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	0,33	30	9,9
27	Flange	1	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	0,33	30	9,9
28	Suporte patins	2	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	0,50	30	30
Custo total [€]								99,60

Tabela 31) Custos de fabrico para o prato rotativo

Prato rotativo								
Componente			Material	Proc. Fabrico	Máquina Utilizada	Tempo Fabrico [h] (2)	Custo Fabrico /h (1)	Custo [€] (1)*(2)*(3)
Nr.	Designação	Qt. (3)						
1	Prato rotativo	1	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	2,5	30	75
2	Placa inferior	1	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	1,0	30	30
3	Porta-nozzle	24	Al 2017-A	Torneamento	Centro Maquinagem	0,3	30	216
5	Patela 5	24	Al 2017-A	Torneamento	Centro Maquinagem	0,2	30	144
7	Patela 7	2	Al 2017-A	Torneamento	Centro Maquinagem	0,3	30	18
12	Abraçadeira	2	Al 2017-A	Torneamento	Centro Maquinagem	0,5	30	30
13	Veio central	1	Aço Ck 45	Torneamento	Torno Manual	3,0	20	60
15	Tubo guia	1	Al 2017-A	Torneamento	Centro Maquinagem	1,0	30	30
16	Acoplamento	1	Aço Ck 45	Torneamento	Centro Maquinagem	0,7	30	21
Custo total [€]								624

Capítulo IV – Análise de custos às soluções modeladas

Tabela 32) Custos de fabrico para a gaveta

Gaveta								
Componente			Material	Proc. Fabrico	Máquina Utilizada	Tempo Fabrico [h] (2)	Custo Fabrico / h (1)	Custo [€] (1)*(2)*(3)
Nr.	Designação	Qt. (3)						
1	Placa Superior	1	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	2,50	30	75
2	Placa inferior	1	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	1,25	30	37,5
4	Porta-nozzle	18	Al 2017-A	Torneamento	Centro Maquinagem	0,17	30	91,8
6	Cubo estriado	18	Aço Ck 45	Torneamento	Centro Maquinagem	0,17	30	91,8
7	Veio estriado	18	Aço Ck 45	Torneamento	Centro Maquinagem	0,33	30	178,2
9	Anilha	18	Al 2017-A	Torneamento	Centro Maquinagem	0,08	30	43,2
11	Anilha	36	Aço Ck 45	Torneamento	Centro Maquinagem	0,17	30	183,6
16	Tubo guia	18	Al 2017-A	Torneamento	Centro Maquinagem	0,75	30	405
17	Tampas	9	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	1,15	30	310,5
20	Abraçadeira	3	Al 2017-A	Torneamento	Centro Maquinagem	0,42	30	37,8
23	Anilhas	24	Aço St 33	Corte laser	Centro Corte Laser	0,02	100	48
29	Avental	1	Al 2017-A	Fresagem	Centro Maquinagem	0,42	30	12,6
30	Batente chapa	1	Aço St 33	Corte laser	Centro Corte laser	0,03	100	3
Custo total [€]								1518

Pela análise das tabelas anteriores é possível verificar que existe uma discrepância enorme entre os custos de fabricação do prato rotativo e da gaveta. A solução da gaveta apresenta um custo cerca de 2,4 vezes superior ao do prato rotativo, no entanto, este valor já era de esperar pois é necessário maquinar as tampas e a placa superior de forma muito mais cuidada na zona onde vão ficar alojados os rolamentos, o que naturalmente obriga a um gasto superior de tempo no centro de maquinagem. Além disto, a gaveta é composta por bastantes mais componentes, o que acaba por resultar num preço final mais elevado.

4.3 Custo de componentes de compra

Finalmente, efectuou-se uma análise ao custo de todos os componentes que têm de ser adquiridos a terceiros. Para esta análise consultaram-se os catálogos dos fabricantes, a base de dados da ADIRA S.A. e entrou-se em contacto com os representantes das empresas fornecedoras sempre que se justificou. Os resultados desta análise estão explanados nas tabelas 33, 34 e 35.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Tabela 33) Custos de componentes da compra para o prato rotativo

Prato rotativo						
Componente				Qt. (2)	Custo unitário [€] (1)	Custo Total [€] (1)*(2)
Nr.	Designação	Fabricante	Modelo			
6	Mola	MIZUMI	WR-13 L=25	24	0,95	22,8
8	Posicionador	LANEMA	W302-5	4	0,83	3,32
9	Cubo estriado	LANEMA	CB-14 - L=25 mm	2	3,45/25mm	6,9
10	Mola	MIZUMI	WR-22 - L=25	2	1,5	3
11	Veio estriado	LANEMA	EE-14 - L = 30 mm	2	8,73 / 1000mm	0,52
14	Rolamento	Inafag	7005-b-2rs-tvp	1	30	30
17	Motor	Nanotec	ST5918M1008	3	41,8	125,4
18	Cilindro	Festo	ADVU_16_100_P_A	1	44,44	44,44
19	Cavilha cilíndrica	LANEMA	D250.4.40	24	0,15	3,6
20	Cavilha cilíndrica	LANEMA	D250.3.28	2	0,1	0,2
21	Fêmea	SKF	KM0 M10*0,75	1	0,8	0,8
21	Anilha Segurança	SKF	MB0	1	0,15	0,15
23	Freio Exterior		DIN 471 - D25*1,2	1	0,04	0,04
Custo total [€]						241,17

Tabela 34) Custos de componentes da compra para a gaveta

Gaveta						
Componente				Qt. (2)	Custo unitário [€] (1)	Custo Total [€] (1)*(2)
Nr.	Designação	Fabricante	Modelo			
5	Cavilha cilíndrica	LANEMA	D250.4.20	18	0,1	1,8
6	Cubo estriado	LANEMA	CB-14 – L = 45 mm	18	3,45/25mm	111,78
7	Veio estriado	LANEMA	EE-14 - L = 30 mm	18	8,73/1000mm	4,68
8	Mola	MIZUMI	WR-22 L=30	18	1,5	27
10	Rolamento	Inafag	6000 2RSR	18	9	162
12	Rolamento	Inafag	6000 2RSR	18	9	162
13	Fêmea	SKF	KM0 M10*0,75	18	0,8	14,4
14	Anilha Segurança	SKF	MB0	18	0,15	2,7
15	Roda dentada	HPC GEARS	ZG1-40	18	7,82	140,76
18	Motor	Festo	EMMS-ST-42-S-SE	3	186,07	558,21
19	Pinhão	HPC GEARS	ZG1-30	3	5,49	16,47
21	Inversor	HPC GEARS	ZG1-30	12	5,49	65,88
22	Cavilha cilíndrica	LANEMA	D250.6.18	12	0,12	1,44
33	Guias	Bosch	R-1605-804-31	2	28	56
Custo total [€]						1325,12

Capítulo IV – Análise de custos às soluções modeladas

Tabela 35) Custos de componentes da compra para o suporte

Suporte						
Componente				Qt. (2)	Custo unitário [€] (1)	Custo Total [€] (1)*(2)
Nr.	Designação	Fabricante	Modelo			
32	Carro de esferas	Bosch	R-1622-894-20	2	25	50
34	Cilindro pneumático	Festo	DSNU-20-250-PPV-A	1	41,92	41,92
Custo total [€]						91,2

A análise das tabelas 33, 34 e 35 permite concluir que existe uma diferença bastante acentuada de preços entre o prato rotativo e a gaveta. A solução da gaveta exige um gasto em componentes de compra 5,5 vezes superior à do prato rotativo, sendo isso explicado pela utilização de 3 motores de passo bastante mais caros (motores Festo), pela compra de um elevado número de rolamentos e ainda pela utilização de bastantes rodas dentadas em Poliacetal, que acabaram por sair mais caras do que se esperava. O prato rotativo é bastante mais simples e preconiza a utilização de menos componentes, pelo que esta diferença acaba por ser natural.

4.4 Conclusão

Tendo-se determinado os custos de ambas as soluções e do suporte é agora possível determinar o custo final de toda a solução que está explicitado no quadro seguinte.

Tabela 36) Custos totais de cada solução

Custo Total				
	Matérias-primas	Fabricação	Componentes de compra	Total [€]
Prato rotativo	190,02	624	241,17	1055,19
Gaveta	173,40	1518	1325,12	3016,52
Suporte	44,60	99,60	91,2	235,40
Gaveta + Suporte	218	1617,60	1416,32	3251,92

Pela análise deste quadro verifica-se que a solução final escolhida para o sistema de troca de nozzle (gaveta + suporte) ficará por um valor a rondar os 3250 €. A principal contribuição para este valor é proveniente dos custos de fabricação e do preço dos componentes adquiridos a terceiros, que perfazem na totalidade 3016,52 €. Como já foi referido, esta solução preconiza a elaboração de operações de maquinagem mais complexas e precisas em certos componentes, por forma a acomodar os rolamentos, o que aliado à utilização de 3 motores de passo acaba por contribuir para um aumento de preço. Relativamente ao número de motores, era economicamente mais interessante utilizar apenas 1, no entanto, o custo total diminuía para aproximadamente 2879 €, o que não representa uma descida muito significativa e em última análise pode vir a contribuir para um funcionamento deficiente do sistema, pelo que por agora se pensa ser mais interessante manter os 3 motores.

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

Relativamente às duas soluções desenvolvidas, é possível verificar que a gaveta fica cerca 2,9 vezes mais cara que o prato rotativo, sendo isto explicado pelas operações de fabricação mais complexas e demoradas e ainda pela utilização de mais componentes. No entanto, não se pode esquecer que o prato rotativo foi abandonado numa fase muito prematura do desenvolvimento, pelo que caso tivesse sido devidamente explorado, seria de esperar um aumento significativo do preço. Além disto, uma das razões para o abandono do prato prendia-se com a ausência de precisão de movimento, que como já foi indicado, só pode ser resolvido através da utilização de um prato divisor, pelo que a utilização de um sistema deste tipo acresceria ao preço final mais 1500 a 2000 €, o que acabaria por equilibrar o preço de ambas as soluções.

Desta forma, é seguro afirmar que a gaveta se apresenta como uma resposta interessante para o problema e, que de ambas as soluções modeladas, é a que oferece mais garantias, pese embora a diferença de preço.

5 Capítulo V – Conclusão e perspectivas de trabalhos futuros

No final deste trabalho é possível afirmar que foram atingidos os objectivos mínimos propostos. O objectivo deste trabalho passava pelo desenvolvimento de soluções para um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser, tendo-se para isso desenvolvido dois produtos diferentes, o prato rotativo e a gaveta.

O prato rotativo, que foi a primeira ideia explorada, consiste num sistema muito similar ao de uma torreta de troca de ferramenta de uma máquina CNC. A sua ideia base assenta na rotação de um prato, que transporta os nozzles suplentes para uma posição estática onde estão colocados os motores de aperto, que por sua vez são responsáveis por apertar/desapertar o nozzle na cabeça. Esta solução apresenta algumas vantagens, nomeadamente um baixo curso de accionamento e a elevada capacidade de armazenamento, no entanto, acabou por ser abandonada pois preconizava a elaboração de um sistema de engate entre o veio do motor e o Porta-nozzle e ainda a utilização de um prato divisor para melhorar a precisão de rotação do prato, que como já foi referido, é extremamente caro.

Devido a estas dificuldades modelou-se a solução da gaveta, que no final acabou por ser escolhida para produto final. Esta solução é extremamente simples, baseando-se apenas numa cadeia de engrenagens em Poliacetal que transmite a rotação do motor até aos sistemas de aperto/desaperto. O maior problema desta solução adveio da elevada extensão da cadeia de engrenagens inicial, o que provocava um baixo rendimento total do sistema e, por conseguinte, conduzia à existência de grandes diferenças de binário entre o primeiro e o último sistema de aperto. Para contornar este problema analisaram-se 4 cadeias distintas, tendo-se no final dividido a matriz 3x6, em três matrizes 3x2 com motorização individual. Esta solução revelou-se bastante eficaz pois conseguiu diminuir as perdas de binário para apenas 10%, valor que foi considerado como aceitável.

Em termos de atravancamentos, a solução obtida respeita de forma integral as especificações definidas, sendo prova disso as folgas de 37 e 40 mm obtidas para os eixos longitudinal e vertical, respectivamente. Como estes valores são elevados, é possível variar a posição da gaveta e, por conseguinte, alterar a posição dos nozzles durante a afinação do sistema.

Em termos económicos não foi possível efectuar uma comparação directa entre o sistema escolhido e um sistema da concorrência, pelo que se optou por efectuar apenas uma comparação directa entre as duas soluções modeladas. Nesta análise concluiu-se que ambas as soluções apresentam preços finais muito díspares, sendo a gaveta cerca de 2,9 vezes mais cara do que o prato rotativo. Esta diferença é justificável pelo facto de a primeira solução não ter sido devidamente explorada e, ainda, pela utilização de componentes de maior qualidade na gaveta, nomeadamente rolamentos, que obrigam a

Desenvolvimento de um sistema de troca automática de nozzle de corte, para máquinas de corte por laser

cuidados redobrados na fabricação de grande parte das peças e, por conseguinte, conduzem a um aumento do preço de produção. Além disto, a utilização dos 3 motores de passo da Festo também contribuiu bastante para a diferença verificada, no entanto, como nunca se efectuou um projecto deste género na ADIRA S.A. optou-se por sacrificar os custos em função da qualidade. De qualquer forma, apesar de a diferença ser extremamente grande é expectável que diminua no caso de se efectuar uma abordagem mais extensa ao prato rotativo pois, como se viu, esta solução foi abandonada bastante cedo e o seu correcto funcionamento exige a utilização de um prato divisor extremamente caro, que faria aumentar o preço em cerca de 1500 a 2000 €. Assim sendo, conclui-se que apesar da diferença de preços obtida, a solução da gaveta é mais interessante, porque a diferença real entre as duas soluções totalmente funcionais seria extremamente inferior.

Em suma é possível afirmar que das soluções modeladas, a gaveta se apresenta como a melhor, pois é simples, funcional e resolve os problemas da solução do prato rotativo.

Em termos de trabalhos futuros sugere-se a elaboração de um racionamento económico à solução escolhida, com vista à diminuição do preço final. Este racionamento deve-se centrar nos componentes mais caros, que são os motores de passo da Festo, as rodas dentadas da HPC e os rolamentos da Inafag. Desta forma sugere-se o seguinte:

- Analisar a disponibilidade de substituição dos motores da Festo pelos motores da Nanotec, cujo preço é cerca de 3 vezes inferior;
- Procurar fornecedores de rodas em Poliacetal mais baratos, e determinar se a elaboração de uma cadeia semelhante num sistema de polias/correia é mais barata;
- Procurar fornecedores de rolamentos mais baratos, e aferir se a substituição do rolamento escolhido por um outro inferior (tanto em gama como em diâmetro) é vantajosa, pese embora a necessidade de se diminuir o diâmetro dos veios estriados e, por conseguinte, ter de efectuar operações de maquinagem mais extensas;

Além deste racionamento económico sugere-se também a continuação de um trabalho elaborado que fugiu ao âmbito deste relatório. Durante a estadia na empresa foi efectuado um mapeamento dos circuitos da água, do gás, do ar comprimido e da lubrificação dos centros de corte laser da empresa. Este trabalho foi efectuado com o intuito de se diminuir o desperdício de componentes que aparecem nas listas de peças, mas que na realidade não são utilizados, com vista a diminuir a quantidade de monos em “stock”. Foi um trabalho bastante interessante, pois permitiu incrementar o contacto com a produção e assim aferir algumas das dificuldades reais que as empresas têm no dia-a-dia. Este mapeamento consistiu na elaboração de documentos de texto, onde foram colocadas fotos de todos os componentes de cada circuito, estando cada uma delas pela ordem em que aparecem na máquina, isto é, deste a entrada até à saída do circuito. A cada uma das fotos foram adicionadas informações relativas a cada componente, nomeadamente o seu nome, código de identificação e quantidade utilizada.

Capítulo V – Conclusão e perspectivas de trabalhos futuros

No final efectuou-se um “update” das listas de peças e distribuíram-se os diversos documentos pela produção com o intuito de facilitar a construção de novas máquinas. Desta forma, sugere-se que este trabalho seja continuado no futuro, nomeadamente através da elaboração de um mapa de cada circuito num programa apropriado, como por exemplo o Pneusimpro, e através da extensão a outros componentes do centro de corte, como por exemplo, o pórtico ou a própria estrutura. A continuação deste trabalho certamente que irá ajudar a empresa em termos económicos (diminuição de desperdício de componentes) e a própria produção, que assim verá o seu trabalho mais facilitado.

Bibliografia

- [1] - <http://www.adira.pt/>
- [2] - Steen, W. M. "Laser Materials Processing", 2nd Ed. 1998.
- [3] - Tom Price, "Global Investments in Scientific R&D," Optics & Photonics News (OPN) 20, 9, 12-13 (September 2009).
- [4] - http://www.bnl.gov/atf/core_capabilities/co2amp.asp
- [5] – Introduction to laser materials processing, ed. Rofin Sinar, Hamburg
- [6] – <http://www.rofin.com/>
- [7] - <http://www.prclaser.com/retrostory.shtml>
- [8] - <http://spie.org/x17329.xml?ArticleID=x17329>
- [9] – Combined Research and Curriculum Development: Nontraditional Manufacturing Laser Machining Processes, the FU Foundation School of Engineering and Applied Science, Columbia University, (2000)
- [10] – Ulrich, Karl T. - Product design and development. 4th ed. Boston: McGraw-Hill International Editions, cop. 2008. ISBN 007-125947
- [11]-<http://www.trumpf-machines.com/en/products/2d-laser-cutting/innovative-technology/automatic-nozzle-changer.html>
- [12]-
http://www.bystronic.com/cutting_and_bending/com/en/products/laser/byspeed/video1.php
- [13]-<http://www.modernmachinerycompany.com/index.php/laser-cutting-machines/mazak-mark-iii-laser-cutting-machine/>
- [14] – <http://www.youtube.com/watch?v=3rifV2yKEdU>
- [15] - <http://www.youtube.com/watch?v=QV6sYa0KDwo&feature=related>
- [16] - <http://www.youtube.com/watch?v=v6Cfv8vgXJg>
- [17] – ERLNMAIER WERNER [DE]; SCHMAUDER FRANK [DE]; FELBER ARMIN [CH]; GEDEON RETO [CH], Mechanical device for assembling and/or disassembling a laser nozzle and laser processing machine with such a device, patent Nr. EP 2078584, Proprietary: TRUMPF MASCHINEN AG

- [18] – PLUESS CHRISTOPH [CH]; LEIST MICHAEL [CH], Device and method for automatically exchanging cutting nozzles, Patent Nr. EP 2108475, Proprietary: BYSTRONIC LASER AG
- [19] - Standard handbook of machine design. New York: McGraw-Hill Book, 1986. ISBN 0-07-056892-8. Pág. 24.17
- [20] - http://en.nanotec.com/steppermotor_st5918.html
- [21] - <http://hypertextbook.com/facts/2005/aluminum.shtml>
- [22] - Serway R. A. Física. Editorial McGraw-Hill. (1992)
- [23] – http://www.hpcgears.com/products/spur_gears.htm
- [24] - <http://www.huco.com/products.asp?p=true&cat=264>
- [25] - Henriot, Georges - Engrenages: conception, fabrication, mise en oeuvre. 8e ed. Paris: Dunod, cop.2007. (Technique et ingénierie). ISBN 978-2-10-050857-0 – Cap. 7
- [26] – http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Drive/Gear_Efficiency.html
- [27] - http://www.sdp-si.com/Sdptech_lib.htm
- [28] - <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=pt&newlink=1040>
- [29] - http://plastics.dupont.com/plastics/pdflit/europe/design/L12565_8.pdf
- [30] - Gears and Transmissions Workshop., Porto, Portugal, 2003 - Gears & transmissions: gears 2003: proceedings of the. Porto: FEUP, 2003
- [31] - Niemann, Gustav - Elementos de máquinas. 7e ed. S. Paulo: Editora Edgard Blucher, 1991-1996. Vol:2. Cap. 17
- [32] - http://medias.ina.de/medias/en!hp.ec.br.pr/60..-2RSR*6000-2RSR;afFrjwp79Yt9
- [33] - http://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_engb/PDF/EN/EMMS-ST_EN.PDF
- [34] - http://www.boschrexroth.com/is-bin/INTERSHOP.enfinity/eCS/Store/en_GB/-/EUR/BrowseCatalog461038-DisplayExternalCatalogPage?bridgeSelectedCatalog=DE_BRL&bridgePageId=group260736674784700
- [35] - http://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ptbr/PDF/PT/DSNU-ISO_PT.PDF
- [36] - Morais, José Manuel de Simões - Desenho técnico básico. 23ª ed. Porto : Porto Editora, cop.2006. (Desenho de construções mecânicas). ISBN 972-96525-2

Anexo B – Catálogos das rodas de dentado recto

○ HPC GEARS

Spur Gears

Plastic Delrin (fully machined)

1 MOD 20° P.A. SPECIAL TEETH : between 9 - 448

Materials
STD : White Delrin

PART NUMBER	TEETH	PCD (mm)	OD (mm)	BOSS Ø (mm)	BORE Ø (mm)	WEIGHT (kg)	PRICE EACH 1-5		
							ZG	ZPG	
ZG1-32	32	32.00	34.00	18	6	0.010	0.008	£6.90	£5.27
ZG1-33	33	33.00	35.00	18	6	0.010	0.009	£6.96	£5.36
ZG1-34	34	34.00	36.00	18	6	0.011	0.009	£7.10	£5.43
ZG1-35	35	35.00	37.00	18	6	0.011	0.010	£7.18	£5.44
ZG1-36	36	36.00	38.00	18	6	0.012	0.010	£7.22	£5.53
ZG1-38	38	38.00	40.00	18	6	0.013	0.011	£7.42	£5.72
ZG1-39	39	39.00	41.00	18	6	0.014	0.012	£8.61	£6.59
ZG1-40	40	40.00	42.00	18	6	0.014	0.013	£8.76	£6.68
ZG1-42	42	42.00	44.00	18	6	0.016	0.014	£8.84	£6.75
ZG1-43	43	43.00	45.00	18	6	0.016	0.015	£8.89	£6.81
ZG1-44	44	44.00	46.00	18	6	0.017	0.015	£8.91	£6.83
ZG1-45	45	45.00	47.00	18	6	0.018	0.016	£8.96	£6.88
ZG1-46	46	46.00	48.00	18	6	0.019	0.017	£9.00	£6.89
ZG1-47	47	47.00	49.00	18	6	0.019	0.018	£9.03	£6.90
ZG1-48	48	48.00	50.00	18	6	0.020	0.018	£9.05	£6.93
ZG1-50	50	50.00	52.00	22	8	0.022	0.020	£11.95	£9.18
ZG1-51	51	51.00	53.00	22	8	0.023	0.020	£12.13	£9.31
ZG1-52	52	52.00	54.00	22	8	0.024	0.021	£12.40	£9.45
ZG1-53	53	53.00	55.00	22	8	0.025	0.022	£12.51	£9.58
ZG1-54	54	54.00	56.00	22	8	0.026	0.023	£12.64	£9.73
ZG1-55	55	55.00	57.00	22	8	0.026	0.024	£12.84	£9.83
ZG1-56	56	56.00	58.00	22	8	0.027	0.025	£12.87	£9.85
ZG1-58	58	58.00	60.00	22	8	0.029	0.027	£13.22	£10.15
ZG1-59	59	59.00	61.00	22	8	0.030	0.028	£15.18	£11.68
ZG1-60	60	60.00	62.00	22	8	0.031	0.029	£15.39	£11.84
ZG1-61	61	61.00	63.00	22	8	0.032	0.030	£15.61	£11.95
ZG1-62	62	62.00	64.00	22	8	0.033	0.031	£15.87	£12.18
ZG1-63	63	63.00	65.00	22	8	0.034	0.032	£16.34	£12.53
ZG1-64	64	64.00	66.00	22	8	0.035	0.033	£16.62	£12.74
ZG1-65	65	65.00	67.00	22	8	0.036	0.034	£17.02	£13.04
ZG1-66	66	66.00	68.00	22	8	0.037	0.035	£17.38	£13.30
ZG1-68	68	68.00	70.00	22	8	0.039	0.037	£17.89	£13.72
ZG1-70	70	70.00	72.00	22	8	0.042	0.039	£18.27	£14.05
ZG1-72	72	72.00	74.00	22	8	0.044	0.041	£18.66	£14.28
ZG1-73	73	73.00	75.00	22	8	0.045	0.043	£19.21	£14.67
ZG1-74	74	74.00	76.00	22	8	0.046	0.044	£20.80	£15.95
ZG1-76	76	76.00	78.00	22	8	0.049	0.046	£21.09	£16.16
ZG1-78	78	78.00	80.00	22	8	0.051	0.049	£21.40	£16.41
ZG1-80	80	80.00	82.00	22	8	0.054	0.051	£21.83	£16.73
ZG1-84	84	84.00	86.00	22	8	0.059	0.056	£22.14	£16.98
ZG1-88	88	88.00	90.00	22	8	0.065	0.062	£22.64	£17.38
ZG1-90	90	90.00	92.00	26	8	0.069	0.065	£25.91	£19.89
ZG1-96	96	96.00	98.00	26	8	0.078	0.074	£28.74	£22.04
ZG1-100	100	100.00	102.00	30	10	0.084	0.080	£32.01	£24.59
ZG1-112	112	112.00	114.00	30	10	0.105	0.101	£40.11	£30.73
ZG1-120	120	120.00	122.00	40	12	0.120	0.116	£49.44	£37.94
ZG1-130	130	130.00	132.00	40	12	0.140	0.136	£60.80	£44.95
ZG1-140	140	140.00	142.00	40	12	0.162	0.158	£74.92	£59.94

TORQUE CHECK
50 teeth x 1000 rpm
variations of book TORQUE Nm. 0.70

DISCOUNTS

1 - 5	List Price
6 - 29	- 22%
30 - 99	- 44%
100 - 399	- 47%
400 - 999	- 50%
1000 - 5000	- 53%

Spur Gears Plastic MOD 1

Popular sizes in stock.
Any two part numbers of this pitch will run together.

PART NUMBER	TEETH	PCD (mm)	OD (mm)	BOSS Ø (mm)	BORE Ø (mm)	WEIGHT (kg)	ZG	ZPG	PRICE EACH 1-5
ZG1-9	9	10.00	12.00	12	4	0.001	0.001	£4.29	£3.32
ZG1-10	10	11.00	13.00	12	4	0.002	0.001	£4.33	£3.33
ZG1-11	11	12.00	14.00	12	4	0.002	0.001	£4.35	£3.37
ZG1-12	12	12.00	14.00	12	4	0.002	0.001	£4.37	£3.37
ZG1-13	13	13.00	15.00	12	4	0.002	0.001	£4.41	£3.39
ZG1-14	14	14.00	16.00	12	4	0.002	0.001	£4.45	£3.40
ZG1-15	15	15.00	17.00	12	4	0.002	0.002	£4.55	£3.49
ZG1-16	16	16.00	18.00	15	6	0.003	0.002	£4.65	£3.53
ZG1-17	17	17.00	19.00	15	6	0.003	0.002	£4.71	£3.60
ZG1-18	18	18.00	20.00	15	6	0.003	0.002	£4.83	£3.63
ZG1-19	19	19.00	21.00	15	6	0.004	0.003	£4.86	£3.74
ZG1-20	20	20.00	22.00	15	6	0.004	0.003	£5.03	£3.84
ZG1-21	21	21.00	23.00	18	6	0.005	0.003	£5.06	£3.90
ZG1-22	22	22.00	24.00	18	6	0.005	0.004	£5.12	£3.94
ZG1-23	23	23.00	25.00	18	6	0.006	0.004	£5.16	£3.95
ZG1-24	24	24.00	26.00	18	6	0.006	0.004	£5.23	£4.01
ZG1-25	25	25.00	27.00	18	6	0.007	0.005	£5.43	£4.13
ZG1-26	26	26.00	28.00	18	6	0.007	0.005	£5.66	£4.29
ZG1-27	27	27.00	29.00	18	6	0.007	0.006	£5.72	£4.41
ZG1-28	28	28.00	30.00	18	6	0.008	0.006	£5.85	£4.45
ZG1-29	29	29.00	31.00	18	6	0.008	0.007	£5.99	£4.63
ZG1-30	30	30.00	32.00	18	6	0.009	0.007	£6.18	£4.69
ZG1-31	31	31.00	33.00	18	6	0.009	0.007	£6.83	£5.23

Spur Gears Plastic MOD 1

Gears with a greater number of teeth than listed are subject to different face widths, boss and bore. Please consult Technical for sizes.

Unit 14, Foxwood Industrial Park, Foxwood Road, Chesterfield, Derbyshire S41 9RN
Telephone +44(0)1246 268080 Fax +44(0)1246 260003

- **Huco**

Dimensions and Order Codes - MODULE 1.0

	Order Code	Module	Width b	Number of Teeth	Overall Dia d _a	Pitch Dia d	Hub Dia ND	Hub Length NL	Bore B	Torque	Weight
			mm		mm	mm	mm	mm	mm	Nm	g
more	101293010	1	10	10	12	10	8	6	5	0.06	1
more	101293011	1	10	11	13	11	8	6	5	0.08	1.2
more	101293012	1	10	12	14	12	10	6	5	0.09	1.7
more	101293013	1	10	13	15	13	10	6	5	0.11	2
more	101293014	1	10	14	16	14	10	6	5	0.12	2.3
more	101293015	1	10	15	17	15	12	6	5	0.14	2.8
more	101293016	1	10	16	18	16	12	6	5	0.16	3.2
more	101293017	1	10	17	19	17	12	6	5	0.18	3.5
more	101293018	1	10	18	20	18	12	6	5	0.20	4
more	101293019	1	10	19	21	19	15	6	5	0.23	4.9
more	101293020	1	10	20	22	20	15	8	5	0.25	5.8
more	101293021	1	10	21	23	21	15	8	5	0.28	6.2
more	101293022	1	10	22	24	22	15	8	5	0.30	6.5
more	101293023	1	10	23	25	23	15	8	5	0.33	7.1
more	101293024	1	10	24	26	24	15	8	5	0.36	7.6
more	101293025	1	10	25	27	25	15	8	5	0.39	8.2
more	101293026	1	10	26	28	26	15	8	5	0.43	8.7
more	101293027	1	10	27	29	27	15	8	5	0.46	9.3
more	101293028	1	10	28	30	28	15	8	5	0.49	9.9
more	101293030	1	10	30	32	30	15	8	5	0.57	11.2
more	101293032	1	10	32	34	32	18	8	6	0.64	13.2
more	101293035	1	10	35	37	35	18	8	6	0.77	15.4
more	101293036	1	10	36	38	36	18	8	6	0.82	16.1
more	101293038	1	10	38	40	38	18	8	6	0.91	17.9
more	101293040	1	10	40	42	40	18	8	6	1.00	19.6
more	101293042	1	10	42	44	42	18	8	6	1.10	21.5
more	101293045	1	10	45	47	45	18	8	6	1.20	24
more	101293048	1	10	48	50	48	20	8	6	1.40	27.8
more	101293050	1	10	50	52	50	20	8	6	1.50	30
more	101293052	1	10	52	54	52	20	8	6	1.70	32.4
more	101293054	1	10	54	56	54	20	8	6	1.80	34.6
more	101293055	1	10	55	57	55	20	8	6	1.90	35.6
more	101293056	1	10	56	58	56	20	8	6	1.90	36.9
more	101293060	1	10	60	62	60	25	8	6	2.20	44.1
more	101293064	1	10	64	66	64	25	10	6	2.30	51.1
more	101293065	1	10	65	67	65	25	10	6	2.40	52.7
more	101293070	1	10	70	72	70	25	10	6	2.60	59.6
more	101293072	1	10	72	74	72	30	10	6	2.60	65.3
more	101293075	1	10	75	77	75	30	10	6	2.80	71.1
more	101293080	1	10	80	82	80	50	10	10	2.90	94.7
more	101293085	1	10	85	87	85	50	10	10	3.10	104.1
more	101293090	1	10	90	92	90	50	10	10	3.30	113.1
more	101293096	1	10	96	98	96	50	10	10	3.50	126.1
more	101293100	1	10	100	102	100	50	10	10	3.60	135
more	101293120	1	10	120	122	120	50	10	10	4.40	182.6

Anexo C - Propriedades do Poliacetal (Delrin)

MATERIALS DELRIN POLYACETAL 150

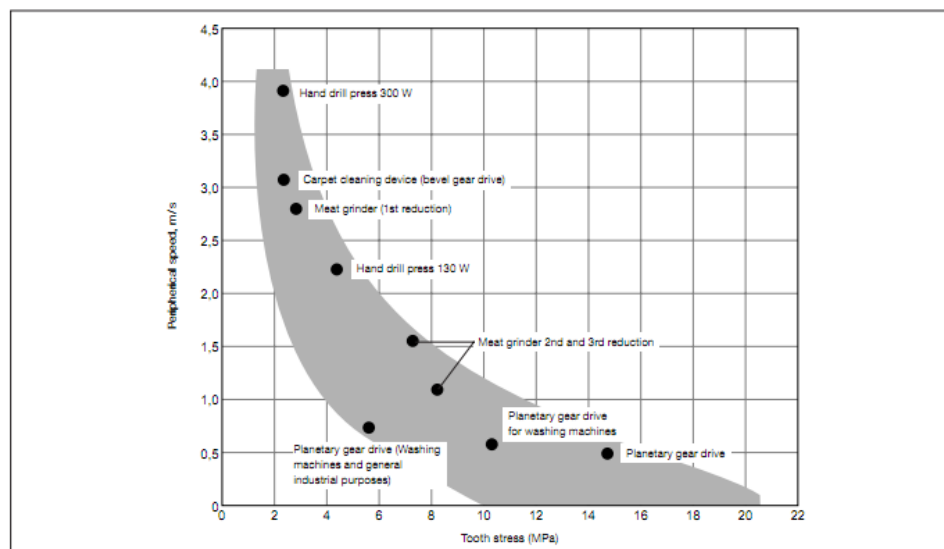
MECHANICAL PROPERTIES	ASTM TEST METHOD	VALUES	MECHANICAL PROPERTIES	ASTM TEST METHOD	VALUES
Density	D792	1.42 g/cm ³	Coefficient of dynamic friction against Steel	D1894	
Tensile strength @ yield	D638		no lubricant	-81T	0.10 - 0.30
-55°C		101 N/mm ²	water lubricated		0.10 - 0.20
-40°C		99 N/mm ²	oil lubricated		0.05 - 0.10
12°C		89 N/mm ²	against Brass		0.15
70°C		48 N/mm ²	against Aluminium		0.15
100°C		36 N/mm ²	against Polyacetal		0.35
122°C		26 N/mm ²			
Elongation @ break	D638		THERMAL PROPERTIES		
-55°C		.38 %	Melting point	D2133	175 °C
-40°C		- %	Deflection temperature under flexural load	D648	
12°C		75 %	1.8 N/mm ²		138 °C
70°C		230 %	0.5 N/mm ²		172 °C
100°C		>260 %	Thermal conductivity		0.37 W/mK
122°C		>260 %	Specific heat		1.47 kJ/kgK
Tensile E Modulus	D638	3100 N/mm ²	Coefficient of linear thermal expansion	D696	
Shear Strength	D732	86 N/mm ²	-40°C - 30°C		10.4 x10 ⁻⁶ /°C
Flexural Modulus	D790		30°C - 60°C		12.2 x10 ⁻⁶ /°C
-55°C		3650 N/mm ²	60°C - 105°C		13.7 x10 ⁻⁶ /°C
-40°C		2620 N/mm ²	105°C - 150 °C		14.9 x10 ⁻⁶ /°C
-23°C		1550 N/mm ²	Flammability	UL 94	HB
-70°C		895 N/mm ²			
-100°C		620 N/mm ²	Maximum continuous use temperature		
Flexural fatigue endurance limit	D671	32 N/mm ²	in air		90 °C
Compressive stress	D695		in water		65 °C
1% deformation		36 N/mm ²	Maximum intermittent use temperature		
10% deformation		124 N/mm ²	in air		150 °C
Isod impact strength	D256		in water		80 °C
unnotched		no break J/m	Minimum continuous use temperature		-40 °C
notched					
-40°C		96 J/m	ELECTRICAL PROPERTIES		
23°C		123 J/m	Volume resistivity	D257	10 ⁻⁴ ohm cm
Tensile impact strength	D1822	350 kJ/m ²	Surface resistivity	D257	10 ⁻⁶ ohm
Deformation under load	D621		Dielectric strength short time	D149	20 kV/mm
(14N/mm ² @ 50°C)		0.5 %	(2.3mm sheet)		
Hardness, Rockwell	D785	M94 R120	Dielectric constant 10-20HZ - 100HZ	D150	3.7
Water absorption	D570		Dissipation factor (1mm sheet)	D150	
24 hours immersion		0.25 %	100HZ		
equilibrium 50% R.H.		0.22 %	1KHZ		
equilibrium, continuous immersion		0.90 %	10KHZ		
			1MHZ		0.005

Unit 14, Foxwood Industrial Park, Foxwood Road, Chesterfield, Derbyshire S41 9RN
Telephone +44(0)1246 268080 Fax +44(0)1246 260003



GENERAL | TECHNICAL SECTION

Anexo D – Curva para determinação da tensão de flexão do dentado



Anexo E - Características do cilindro pneumático

Cilindros normalizados DSNU, ISO 6432

Especificações técnicas

Função



·N· Diâmetro
8 ... 25 mm

·T· Comprimento do curso
... 500 mm

Variante

DSNU

- Com diversas posições de instalação, detecção de posição por meio de sensores de proximidade e fixação por meio de acessórios;
- DSNU-MH: disponível com unidade de fixação direta;
- DSNU-...KP: disponível com trava de retenção e fixação através de furo passante.



Versão básica

Conexão transversal de ar comprimido MQ



Conexão axial de ar comprimido MA

Com fixação direta MH

Dados técnicos gerais						
Linha standard	DSNU					
Variantes	MA/MH/MQ, KP, Q					
Ø do cilindro	8*	10*	12**	16	20	25
Conexão pneumática	M5				5/8	
Rosca da haste	M4		M6		M8	M10x1,25
Amortecimento	Não regulável nas posições finais de curso					
	-			Regulável nas posições finais de curso		
Percurso de amortecimento ¹⁾ [mm]	-		9	12	15	17
Torque máximo na haste ²⁾	-		0,1		0,20	0,45
Folga axial máx. na haste, fixada ³⁾	0,25				0,3	
Conexão pneumática na haste, fixada ⁴⁾	M5					
Força de fixação na unidade, fixada ⁴⁾	80		180		350	

* DSNU-Q não disponível nos Ø de 8 e 10 mm.

** DSNU-Q não regulável apenas para o Ø de 12 mm.

1) Para o DSNU-Q, o curso de amortecimento se aplica apenas para os Ø de 16, 20 e 25 mm.

2) Apenas para o modelo DSNU-Q.

3) Apenas para o DSNU-...KP.

Forças [N] e energia de impacto [J]						
Linha standard	DSNU					
Variantes	MA/MH/MQ, KP, Q					
Ø do cilindro	8*	10*	12	16	20	25
Força teórica a 6 bar, no avanço	30	47	68	121	189	295
Força teórica a 6 bar, no retorno	23	40	51	104	158	247
Máx. energia de impacto nas posições finais de curso	0,03	0,05	0,07	0,15	0,20	0,30

* DSNU-Q não disponível nos Ø de 8 e 10 mm.

Anexo F – Desenhos de conjunto elaborados

