

Agradecimentos

A realização de todo este projeto apenas foi possível ao enorme trabalho de equipa e capacidade de entreaajuda de todos os setores da Quantal e entidades externas que estiveram envolvidas. Assim sendo envio especial agradecimento para o engenheiro José Vila Chá orientar do estágio, para o Engenheiro Jorge Ferro representante da empresa InMast e ao Engenheiro Tiago Soares representante da empresa Hejamara.

Manifesto um especial agradecimento aos meus colegas de departamento André Azevedo e João Marcos e um muito obrigado a todos os outros colegas que ajudaram na concretização deste projeto.

Para terminar, um grande agradecimento aos meus pais, irmão e restantes familiares pelo apoio incondicional, que permitiram criar condições à realização deste trabalho.

Um agradecimento especial para a minha namorada maravilhosa, que me ajudou todos os dias e deu apoio em todo e me ajudou a superar as dificuldades iniciais.

A todos um bem-haja.

Resumo

No âmbito do estágio integrante do Mestrado em Equipamentos e Sistemas Mecânicos, Área de Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, foi realizado um estágio na empresa Quantal SA que pertence ao Grupo Quantal. Esta empresa é especializada em corte laser 2D e 3D, soldadura e conformação de chapa.

O principal objetivo deste estágio incidiu na adaptação de um robô Fanuc 420iF para efetuar soldadura laser e ainda o estudo e desenvolvimento de parâmetros de soldadura. O robô estava equipado para efetuar soldadura por pontos, para a sua adaptação foi estudado e construído todo o sistema de proteção (cabine) e sistemas adjacentes (iluminação e segurança). Todo o trabalho desenvolvido e efetuado durante o estágio esteve relacionado com equipamentos de corte e soldadura laser. O estágio incidiu nos seguintes aspetos:

- Manutenção dos equipamentos;
- Melhorar a autonomia da equipa de manutenção nas intervenções efetuados nos equipamentos de corte laser

Palavras-chave: manutenção; soldadura laser; corte laser.

Abstract

Within the Masters in Mechanical Equipment's and Systems, Specialization in Construction and Maintenance of Mechanical Equipment and Systems, of Superior Institute of Engineering of Coimbra, a stage was held in the company Quantal SA which belongs to the Quantal Group. This company specializes in 2D and 3D laser cutting, welding and sheet metal forming.

The main aim of this internship focused on adaptation of a Fanuc Robot 420iF to perform laser welding and still studying and developing welding parameters. The robot was equipped to perform spot welding, for adaptation was studied and built the entire protection system (cabin) and adjacent systems (lighting and security).

All work carried out during the internship was related with equipment for cutting and welding with laser technology. The training focused on the following aspects:

- Maintenance of equipment;
- Improve the autonomy of the maintenance team in the interventions made in laser cutting equipment.

Keywords: maintenance, laser welding, laser cutting.

Índice

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiv
Nomenclatura	xv
Introdução	1
1.1 Âmbito de estágio	1
1.2 Plano de trabalhos	2
2 Quantal S.A.	7
2.1 História do Grupo Quantal	7
2.2 Quantal produção	8
3 Princípio do laser	15
3.1 Propagação do raio laser	16
3.2 Fonte laser	17
3.3 Tipos de laser	18
3.4 Elementos que constituem um sistema <i>laser</i>	21
3.5 Geração, transporte e aplicação do raio laser	23
3.5.1 Geração-Laser de disco	23
3.5.2 Transporte-Fibra ótica	24
3.5.3 Aplicação-Cabeçal	28
3.6 Segurança laser	31
3.7 Conceitos básicos do processamento por <i>laser</i>	33
3.8 Soldadura <i>laser</i>	36
3.8.1 Tipos de soldadura	37
3.8.2 Gás de proteção	40
3.8.3 Principais geometrias	40
3.8.4 Tipos de cordões	41
3.8.5 Qualidade do processo de soldadura	43
4 Adaptação do robô de soldadura	47
4.1 Análise e verificação do estado do robô	50

4.2 Criação da cabine para proteção do robô	52
4.3 Construção e montagem da cabine e todos os sistemas adjacentes	57
4.4 Implementação dos sistemas segurança	61
4.5 Implementação dos sistemas de comunicação entre fonte laser e robô	64
4.6 Homologação do equipamento	67
4.7 Criação de parâmetros de soldadura	68
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	69
6 Referências	71

Lista de Figuras

Figura 1.1. <i>Prima Rapido</i> , máquina de corte 3D	3
Figura 1.2. Cabeçal de corte, do lado direito processo de calibração dos eixos de rotação da máquina, lado esquerdo temos cabeçal desmontado para reparação do sensor de distância.....	4
Figura 1.3. Trumpf Trulaser 5030, máquina de corte 2D, lado direito interior da máquina, lado esquerdo exterior da máquina.....	4
Figura 1.4. Primeiras amostras, peças cortados para efetuar calibração do ponto focal	5
Figura 2.1. K50+Gearbox, 1-Cone de admissão, 2-Gear box.....	9
Figura 2.2. Diagrama de processo do cone de admissão do conjunto K50.....	9
Figura 2.3. Sector de corte laser 2D e 3D	10
Figura 2.5. parte 2 do cone de admissão após estampagem e corte 3D	10
Figura 2.4. Sector da estampagem	10
Figura 2.6. Sector soldadura.....	11
Figura 2.7. Sector Ferramentaria.....	11
Figura 2.9. suportes da estrutura do cone de admissão pronto para pintura	11
Figura 2.8. Cone de admissão apos soldadura de aro de fixação da tampa	11
Figura 2.10. Conjunto de cones de admissão apos montagem final e pronto para embalagem	12
Figura 2.11. Diamagrama do processo de fabrico do Gear Box	13
Figura 2.12. caixa do Gear box apos ter sido maquinada e pintada.....	13
Figura 2.13. Gear box após montagem final e pronto para embalagem	13
Figura 3.1. Excitação (à esquerda), emissão espontânea (ao centro) e emissão estimulada (à direita).	15
Figura 3.2. Fenómeno de amplificação da luz <i>laser</i>	15
Figura 3.3. 1 – Lanterna com lâmpada fluorescente; 2 – luz <i>laser</i>	16
Figura 3.4. 1 – espelho de reflexão elevada; 2 – energia perdida através de dissipação de calor; 3 – meio ativo; 4 – espelho de reflexão parcial (espelho de saída); 5 – raio <i>laser</i> ; 6 – energia necessária para excitação.....	17
Figura 3.5. Esquema generalizado do <i>laser</i> e seus constituintes.	22
Figura 3.6 Esquema de funcionamento de um <i>laser</i> de disco. 1 – espelho dobrável; 2 – espelho parabólico; 3 – espelho de saída; 4 – raio <i>laser</i> de saída; 5 – bomba do raio <i>laser</i> ; 6 – espelho traseiro; 7 – meio de ganho; 8 – cavidade.....	23
Figura 3.7 Constituição da fibra ótica. 1 – revestimento com malha de aço; 2 – circuito de segurança; 3 – camada protetora; 4 – fibra ótica.....	24
Figura 3.8 Fibras <i>step-index</i> . 1 – núcleo; 2 – revestimento; 3 – perfil do índice de refração, sendo n o índice de refração e r o raio.	25
Figura 3.9 Conector de entrada com reflexão total. 1 – raio <i>laser</i> ; 2 – lente de entrada; 3 – ângulo de entrada; 4 – cone de entrada; 5 – raio <i>laser</i> totalmente refletido; 6 – revestimento; 7 – núcleo.	26
Figura 1.10 Conector de entrada com reflexão parcial 1 – raio <i>laser</i> ; 2 – lente de entrada; 3 – ângulo de entrada; 4 – cone de entrada; 5 – raio <i>laser</i> não refletido; 6 – revestimento; 7 – núcleo.	27
Figura 3.11 Conetor de saída. 1 – raio <i>laser</i> ; 2 – lente de saída; α – ângulo de acoplamento de entrada e saída.	27
Figura 3.12 Reflexão interna quando a fibra ótica se encontra dobrada. 1 – reflexão interna total; 2 – reflexão interna parcial.....	28
Figura 3.15 -Cabeçal de soldadura, 1-camara de monitorização, 2-vidro de proteção, 3-gás de acabamento, 4-Crossjet, 5- <i>focus length</i> ,6 refrigeração	29

Figura 3.14 Ilustração do processo de focagem.	30
Figura 3.15 Diâmetro do focal. Z_r – comprimento <i>rayleigh</i> ; d_{of} – diâmetro focal; f – distância focal; 3 lente de focagem.....	30
Figura 3.16 Interação entre o raio <i>laser</i> e a peça de trabalho. 1 – incidência do raio <i>laser</i> ; 2 – reflexão; 3 – absorção; 4 – transmissão; 5 – peça de trabalho.	33
Figura 3.17 Princípio da soldadura por condução de calor. 1 – material fundido; 2 – cordão de soldadura; 3 – raio <i>laser</i> ; 4 – sentido da soldadura; 5 – peça de trabalho.	37
Figura 3.18 Corte transversal de cordão efetuado com soldadura por condução de calor.	38
Figura 3.19 Princípio da soldadura por penetração. 1 – <i>keyhole</i> ; 2 – material fundido; 3 – cordão de soldadura; 4 – raio <i>laser</i> ; 5 – sentido da soldadura; 6 – vapor de metal; 7 – peça de trabalho.	39
Figura 3.20 Corte transversal de cordão efetuado com soldadura com penetração.	39
Figura 3.21- Principais defeitos de um cordão de solda, 1-poros, 2-, 3-fusão incompleta, 4-crateras, 5-fendas, 6-Salpícos, 7-desalinhamento entre fases da junta.	43
Figura 4.2 Valor máximo encontrado na variação entre ponto 1 (imagem esquerda) e ponto 2 (lado direito).	51
Figura 4.3. Variações máximas encontradas ao longo da execução de uma trajetória. O máximo da variação ao longo do deslocamento em linha reta foi de 0.21 mm (imagem da esquerda). Perante uma mudança brusca de direção, ocorreu uma variação brusca entre 0.1 e 0.25 mm.	51
Figura 4.4 Remoção de toda a cablagem e canhas.	52
Figura 4.4 Área de trabalho do robô Fanuc 420 iF, esquerda vista lateral e direita vista de topo.	53
Figura 4.5 Dimensões gerais de magnético de segurança ABB.....	54
Figura 4.7 Sistema articulado proposto pela IGUS	55
Figura 4.8 Calha articulada <i>IGUS TRIFLEX</i>	56
Figura 4.9 Dimensões gerais de acessório de fixação da calha (esquerda) e elemento da calha (direita).....	57
Figura 4.10 Chapas apos terem saio do corte laser 2D, serão enviadas para a quinagem..	58
Figura 4.11 Processo de soldadura das laterais apos estas terem passado pela quinagem.	58
Figura 4.12 Pintura do robô, processo de preparação para a pintura	59
Figura 4.13 Pintura de mesa de soldadura.....	59
Figura 4.14 Imagem geral da cabine	60
Figura 4.15 início da fase da montagem.....	60
Figura 4.16 Finalização dos trabalhos de montagem	61
Figura 4.17 Esquema interna do trinco elétrico (esquerda), esquema interno dos magnéticos (direita).....	62
Figura 4.18 Esquema de ligação dos magnéticos de posicionamento das portas (lado direito), botão de reset e pre-reset	62
Figura 4.19 Esquema de contactos do autómato ABB Pluto S20	62
Figura 4.20 Diagrama de <i>ladder</i> aplicado no autómato de segurança	63
Figura 4.21 Esquema de conetores presente na fonte laser	64
Figura 4.22 Diagrama temporal das entradas e saídas necessáriaspara comunicar corretamente com fonte laser.....	65
Figura 4.23 Cabelagem para o cabeçal de soldadura, elementos que iram interligar no cabeçal de soldadura (lado esquerdo), sistema implementado para girar e proteger cablagem que ira ligar ao cabeçal de soldura (lado direito).	66

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Cronograma de estágio	2
Tabela 3.1 Principais tipos de <i>lasers</i> e a sua aplicação.	19
Tabela 3.2 Tipos de <i>lasers</i> mais utilizados em processamento de materiais.	20
Tabela 3.3 Classificação dos diferentes equipamentos que constituem um sistema <i>laser</i>	32
Tabela 3.4 Tipos de processamento a <i>laser</i> e principais características.	35
Tabela 3.5 Geometrias típicas da soldadura <i>laser</i>	41
Tabela 3.6 Cordões típicos da soldadura <i>laser</i>	42
Tabela 4.1. Descrição das diferentes fases do projeto.....	48
Tabela 4.2 – Principais entradas/saídas e respetivo conector.....	65

Nomenclatura

Abreviaturas

2D “duas dimensões”

3D “três dimensões”

Laser “*light amplification by stimulated emission of radiation*”

CE “Conformidade Europeia”

Introdução

No contexto atual de uma economia globalizada, as empresas deixaram de estar restringidas à sua cidade ou ao seu país, passando a expandir-se cada vez mais, possibilitando assim a exportação dos seus produtos para todo o mundo. Desta forma, as empresas ficam sujeitas a uma pressão de competitividade global, procurando cada vez mais aumentar a sua produtividade, rentabilizando ao máximo os equipamentos de que dispõem e procurando obter deles o maior rendimento operacional possível. No caso da empresa Quantal podemos dizer que é o nosso dia-a-dia, pois a exportação de produtos é superior a 80%. Para isso é necessário assegurar que é implementado um bom plano de manutenção.

A manutenção assume um papel determinante visto ser essencial para garantir a operacionalidade dos equipamentos utilizados nos processos produtivos, influenciando de forma significativa o nível de qualidade dos bens produzidos e os custos de produção.

Uma manutenção planeada, que atua no momento exato, maximizando os meios de produção, é por excelência o modelo ideal para a minimização dos custos de manutenção inerentes. Por um lado, maximizando a utilização dos equipamentos e, por outro, minimizando os custos causados por paragens imprevistas ou mesmo por intervenções e substituições desnecessárias.

1.1 Âmbito de estágio

O presente estágio insere-se no âmbito do Mestrado em Equipamentos e Sistemas Mecânicos do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, tendo como principal objetivo proporcionar a consolidação da formação académica e o desenvolvimento de competências técnicas e profissionais em contexto real de trabalho em ambiente fabril, contactar com diversos tipos de equipamentos mecânicos e diferentes procedimentos utilizados na sua manutenção possibilitar o desenvolvimento de competências ao nível da resolução de problemas complexos, nomeadamente através da integração nas atividades de manutenção dos equipamentos mecânicos, principalmente nos equipamentos de corte laser 2D e 3D através da integração nas atividades da empresa Quantal, S.A.

O principal objetivo deste estágio esteve relacionado com o sector do laser, pois este sector é o motor da fábrica, sendo o principal projeto de todo o estágio a adaptação do robô de soldadura.

As atividades de estágio previstas, além de permitirem o contacto com diversos tipos de equipamentos mecânicos e processos tecnológicos, possibilitaram também desenvolver competências a nível interpessoal e capacidade de comunicação.

1.2 Plano de trabalhos

O Fase 1 - Acolhimento e formação geral sobre os sistemas implementados tais como segurança e normas ISO.

Fase 2 – Acompanhamento na instalação de duas máquinas novas de corte laser 2D e 3D e respetiva formação (operador e manutenção).

Fase 3 – Estudo, projeto e adaptação de robô de soldadura.

Fase 4 – Escrita do relatório de estágio.

O Cronograma presente na Tabela 1.1 dá-mos uma visão geral da distribuição das diferentes fases ao longo de todo o período de estágio.

Tabela 1.1 – Cronograma de estágio

Mês	Nov. 12	Dez. 12	Jan. 13	Fev. 13	Mar. 13	Abr. 13	Mai. 13	Jun. 13	Jul. 13	Ago 13	Set. 13
Fase 1											
Fase 2											
Fase 3											
Fase 4											

Durante as duas semanas iniciais do estágio realizou-se quase exclusivamente a fase 1, nesta fase inicial foi efetuada uma formação direcionada para os sistemas de qualidade, segurança, higiene e saúde implementados na empresa, entre os quais todo o equipamento de proteção pessoal que deve ser usado em função da tarefa a realizar, como agir em caso de acidente, qual o grupo de pessoas responsável pela primeira intervenção em caso de acidente ou incêndio, entre outros. Ainda durante esta fase inicial foi realizada uma visita a todos os setores que constituem a empresa para um melhor entender do funcionamento da empresa,

grande parte do tempo foi dedicado a parte da produção para ficar com uma ideia geral do *layout* da empresa quais os principais equipamento e quais as suas funções

Após a introdução ao funcionamento geral da empresa começou a fase 2, esta foi constituída maioritariamente pelo acompanhamento da instalação das duas máquinas de corte laser que iriam ampliar as linhas de produção da empresa, a primeira maquina a ser instalado foi a *Prima Rápido* (**figura 1.1**), esta máquina tem o seu potencial direcionado para o corte em serie de peças de pequena espessura. Durante a instalação os procedimentos que foram acompanhados mais de perto estavam relacionados com a calibração do cabeçal de corte e eixos (**figura 1.2**) e quais os principais erros e forma de os contornar (**figura 1.2**), também foi acompanhada a formação de operador e manutenção que durou 2 semanas.



Figura 1.1. *Prima Rápido*, máquina de corte 3D

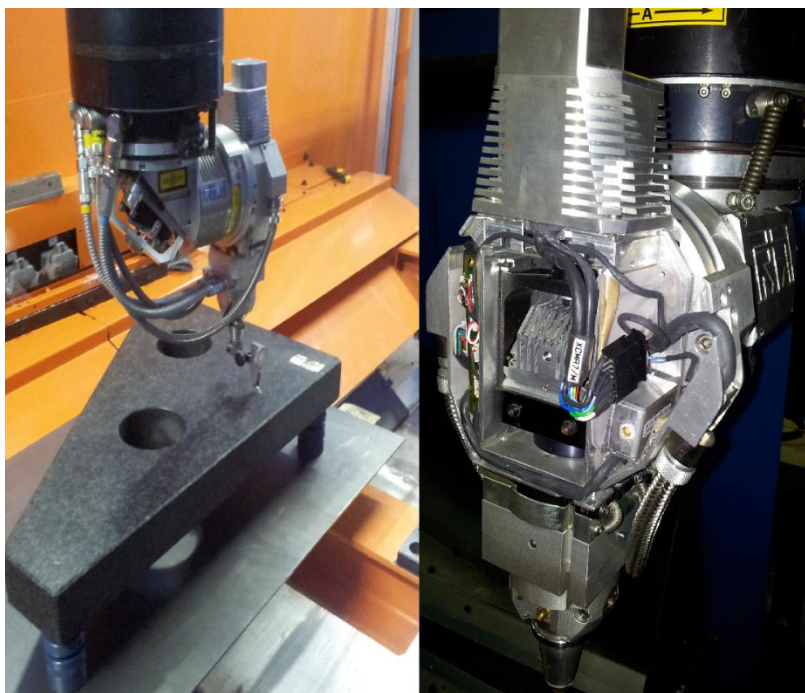


Figura 1.2. Cabeçal de corte, do lado direito processo de calibração dos eixos de rotação da máquina, lado esquerdo temos cabeçal desmontado para reparação do sensor de distância.

A segunda máquina a ser instalada foi de corte 2D *Trumpf Trulaser 5030* (**figura 1.3**), a instalação desta foi acompanhado mais de perto, desde o posicionamento de acordo com o *layout*, nivelamento, ligação dos diferentes módulos e corte das primeiras amostras (**figura 1.4**)



Figura 1.3. Trumpf Trulaser 5030, máquina de corte 2D, lado direito interior da máquina, lado esquerdo exterior da máquina

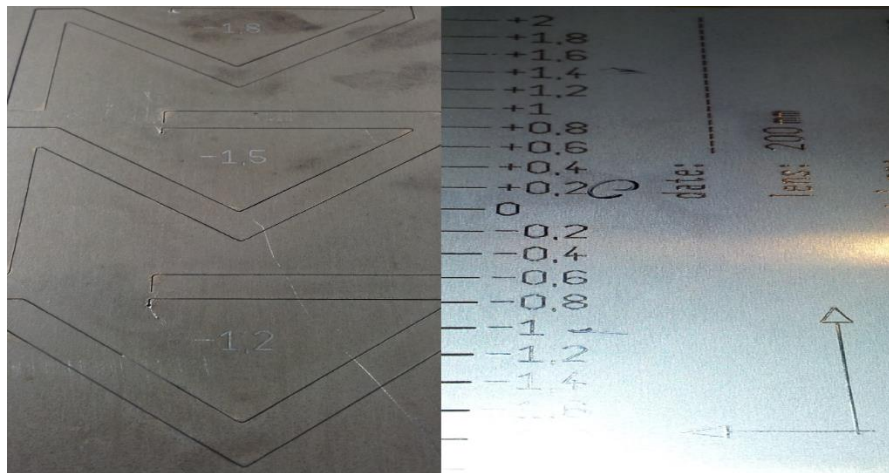


Figura 1.4. Primeiras amostras, peças cortados para efetuar calibração do ponto focal

A segunda fase terminou com a elaboração dos planos de manutenção e procedimento para ligar e desligar os equipamentos.

A fase 3 e a mais importante deste estágio contempla o projeto de adaptação do robô de soldadura *Fanuc 420 iF* e ira abranger grande parte do período de estagio. Será efetuada uma descrição com mais detalhe no capítulo principal deste relatório, ou seja capítulo 4.

2 Quantal S.A.

A Quantal é uma empresa direcionada maioritariamente para a conformação de metais, sendo especializada em protótipos e peças de serie automóvel. Esta sempre na vanguarda no que diz respeito a aquisição de equipamento com tecnologia de topo, entre os quais implementação de processos e métodos de produção do mais alto nível, sendo por exemplo a maquina de corte laser 2D *Trumpf Trulaser 5030* única em Portugal.

É uma empresa com uma elevada autonomia no que diz respeito a ter que recorrer a subcontratações para concluir o ciclo de uma peça. O sector com maior impacto no volume de produção da empresa é o corte laser tendo uma vantagem considerável sobre os restantes, como a soldadura, quinagem e ferramentaria.

2.1 História do Grupo Quantal

A empresa foi fundada em 1995 com o nome Quantal Laser Tecnologia, a sua primeira área de atividade estava relacionada com o corte laser 2D, tendo já alguma experiencia em protótipo. O mercado Espanhol foi o primeiro para o qual a empresa começou a exportar a um nível considerável. Entretanto o volume de produção estava a crescer de forma exponencial e obrigou a empresa a aumentar a área de produção para não perder capacidade de resposta ao mercado, com isto a área aumentou no espaço de dois anos de 400m² para 1350m², no meio deste processo de ampliação também foram adquiridos novos equipamentos para aumentar a capacidade de produção.

Com o aumento dos conhecimentos do mercado e das suas necessidades foi fundada em 2001 uma outra empresa Formstampa, esta surgiu com o crescente aumento da construção civil a nível nacional, a maioria do volume de negócios estava relacionado com portas de segurança, mesmo sendo uma empresa também ligada a área dos acabamentos, construção e arquitetura.

Com a evolução do volume de exportação para Espanha e a introdução a novos mercados como França e Alemanha, a Quantal vê-se novamente obrigada a aumentar a área de produção para não perder competitividade assim sendo no espaço de 5 anos a empresa aumenta quase 2000 m² a área fabril já existente.

Com todo o crescimento e aumento de consumo de recursos surge um problema para a Quantal, elevada quantidade de material excedente e sobras proveniente das duas empresas

que constituem o grupo. Com isto surgiu a possibilidade de criar uma empresa dedicada a seleção, tratamento e comercialização de materiais recicláveis, assim sendo foi criada a Traed em 2006.

Os mercados internacionais continuavam a pedir mais, com isto a Quantal abrir as portas a exportação para a Suíça, com o aumento exponencial das exportação e o setor automóvel a tornar-se cada vez mais importante para as contas da empresa, surgiu novamente a obrigação de ampliação da área fabril, com isto a empresa constrói novas instalações e passa de uma área fabril de 3000 m² para 6000 m². Quanto ao setor automóvel para conseguir dar uma resposta competitiva foi criada uma nova empresa para juntar ao grupo, assim sendo em 2007 foi fundada a Espam empresa especializada na estampagem de peças metálicas, quase exclusivamente para o setor automóvel.

Em 2008 com a aquisições de máquinas novas para o setor de corte laser, o consumo de azoto do setor tornou-se muito elevado, com isto surgiram quebras na capacidade de manter um funcionamento contínuo devido a falta de azoto, para contornar o problema e a empresa tornar-se autossustentável foi criada a Nitrox, empresa direcionada exclusivamente para a produção de azoto.

Com o aumento da competitividade e o surgimento de cliente mais exigente o grupo assume uma nova estratégia de marketing no mercado e passa a designar-se por "Quantal Group".

No presente ano de 2013 já esta em andamento um novo projeto de ampliação da área fabril para 8000m² e a implementação da norma ISO TS 16949, estando a conclusão dos projetos prevista para o ano de 2014.

2.2 Quantal produção

A produção da Quantal pode ser descrita como um conjunto de sectores que se encontram diretamente relacionados pois estão pendentos uns dos outros para dar seguimento as ordens de fabrico. O bom funcionamento e interligação de todo o sistema de produção pode ser traduzido através de uns dos conjuntos que é elaborado na empresa, este conjunto denomina-se K50, podemos visualizar na figura 2.1 o conjunto final, a sua principal função esta relacionada com medição de caudais, este tem grande aplicação na indústria alimentar, cimenteira e papeleira. Para uma melhor compreensão da forma como toda a peça

é contruída será efetuada uma separação geral entre parte 1 cone de admissão e parte 2 Gear Box.



Figura 2.1. K50+Gearbox, 1-Cone de admissão, 2-Gear box

Na figura 2.2 podemos visualizar o diagrama simplificado que traduz o processo de fabrico do cone de admissão do K50.

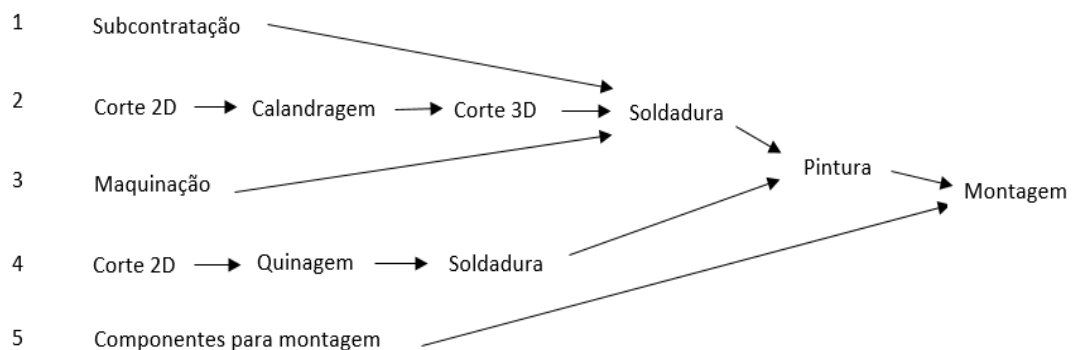


Figura 2.2. Diagrama de processo do cone de admissão do conjunto K50

Temos o ponto 2 que esta a referir-se ao corpo em cone, este é caminho principal de todo o processo de fabrico, os restantes são todos geridos em função deste. O seu processo de fabrico começa pelo sector de corte laser 2D (**figura 2.3**) de seguida a peça segue para a calandragem, onde é obtida a forma do cone final, o cone é fechado e soldado no sector da estampagem (**figura 2.4**) com o auxílio de uma prensa, apos o cone se encontrar

devidamente soldado este passa para o corte 3D onde será aberta toda a furação e será efetuado um corte dos todos para corrigir qualquer defeito acumulado no processo de fecho do cone, podemos ver na figura 2.5 o resultado apos o corte 3D.



Figura 2.3. Sector de corte laser 2D e 3D



Figura 2.4. Sector da estampagem

Figura 2.5. parte 2 do cone de admissão após estampagem e corte 3D

Apos o corte 3D o cone fica a espera das peças que estão a ser maquinadas na ferramentaria (**figura 2.7**). Conforme os componentes a ser soldados ao cone se começam a reunir no sector na soldadura (**figura 2.6**), estes começam a ser soldados, temos na figura 2.8 o cone já com o aro superior soldado. Com isto finaliza-se o cone de admissão e este será submetido a um teste de estanquicidade, onde será submetido a uma pressão durante

um determinado período de tempo, se o valor final de pressão se encontrar dentro do intervalo admissível o cone de admissão esta pronto a enviar para a pintura.



Figura 2.6. Sector soldadura



Figura 2.7. Sector Ferramentaria

Estando o cone de admissão finalizado e pronto a ser pintado apenas nos resta efetuar a construção da base de suporte do cone (**figura 2.9**), o processo de fabrico deste componente, ponto 4 do diagrama apenas se resume a três passos, corte laser 2D, quinagem e soldadura, assim sendo apenas no resta esperar que todos os componentes regressem da pintura.



Figura 2.8. Cone de admissão após soldadura de aro de fixação da tampa



Figura 2.9. suportes da estrutura do cone de admissão pronto para pintura

Em paralelo com o processo de pintura, são reunidos todos os componentes auxiliares para a montagem presentes no ponto 5 do diagrama do processo, este grupo de componentes engloba parafusos, porcas, anilhas vedantes, entre outros. Estando todo reunido passamos a fase de montagem final, temos na figura 2.10 um conjunto de cones de admissão após a montagem e pronto a serem embalados e enviados ao cliente.



Figura 2.10.Conjunto de cones de admissão após montagem final e pronto para embalagem

O componente número 2 deste conjunto final denomina-se por gear box, este será o componente principal deste conjunto e o mais importante, devido a sua função estar relacionada com uma medição, este é submetido a inúmeras horas de testes antes de estar pronto a enviar ao cliente.

A figura 2.11 traduz uma versão muito simplificada do diagrama de processo de fabrico do gear box, em que o ponto principal neste diagrama é sem dúvida a montagem.

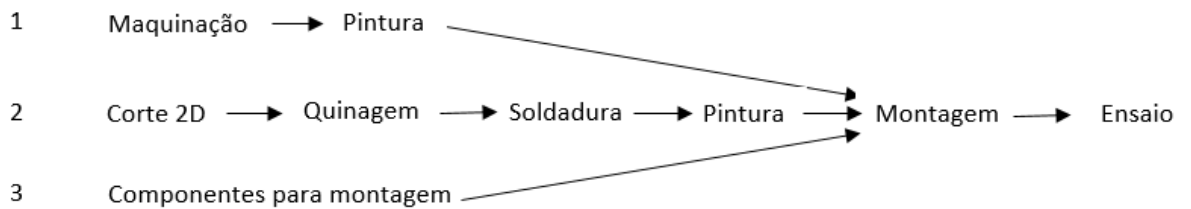


Figura 2.11. Diamagrama do processo de fabrico do Gear Box

Todo o processo resume-se a montagem dentro de uma caixa (**figura2.12**) de um conjunto de rodas dentadas onde será criada uma multiplicação do número de rotação do rotor do cone de admissão, toda a montagem e testes são efetuados em ambiente controlado para evitar oxidação dos elementos dentro da caixa, um outro ponto muito importante é a fase de testes pois cada modelo tem que ser submetido a dois teste tendo cada um uma duração de 24 horas. Dado por terminada a fase de teste do modelo, este encontra-se pronto a ser embalado (**figura 2.13**).

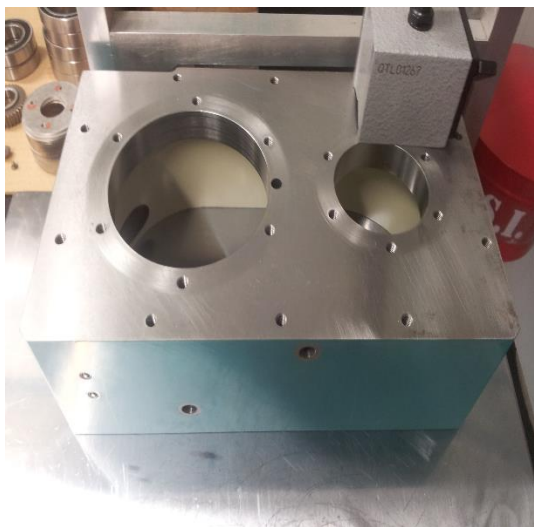


Figura 2.12. caixa do Gear box apos ter sido maquinada e pintada



Figura 2.13. Gear box após montagem final e pronto para embalagem

Assim podemos ter uma pequena mas pequena ideia da capacidade de produção da Quantal como a diversidade de setores e autonomia em todo o processo de fabrico de um produto.

3 Princípio do laser

O termo *laser* (*light amplification by stimulated emission of radiation*) foi apresentado em 1959 por Gordon Gould e desde então tem-se revelado de máxima utilidade em diversas áreas.

Num *laser* há emissão de luz estimulada: um fóton (onda de luz) colide com o átomo excitado, conduzindo à emissão de um fóton com as mesmas propriedades. **(Figura 3.1)**. No entanto, o fóton de entrada deve conter a energia necessária para que este processo se verifique.

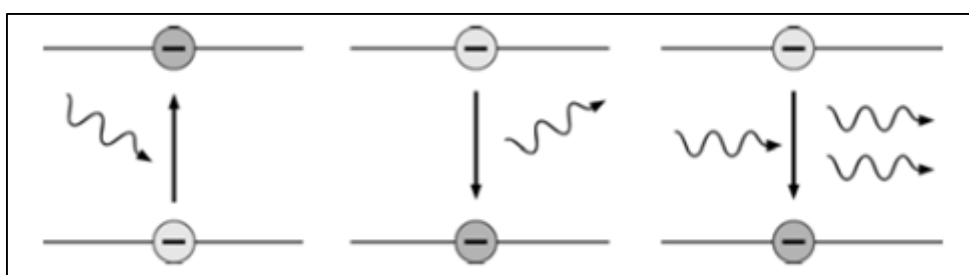


Figura 3.1. Excitação (à esquerda), emissão espontânea (ao centro) e emissão estimulada (à direita).

Após a emissão estimulada, o novo fóton tem exatamente a mesma frequência, posição e direção que a primeira fase do fóton.

O aumento do número de fótons vai proporcionar um fenómeno de amplificação: o raio de luz também vai aumentar. **(Figura 3.2)** Sempre que ocorre colisão de um fóton com os átomos excitados, estes são capazes de gerar mais fótons e, desta forma, o raio de luz vai aumentar novamente. Este fenómeno permite-nos compreender por que razão os *lasers* são também conhecidos como amplificadores de luz.

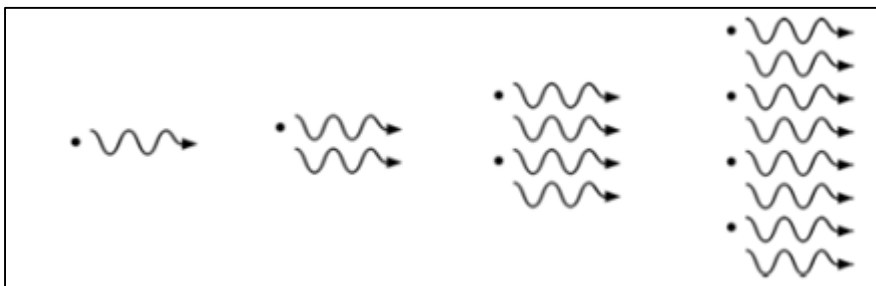


Figura 3.2. Fenómeno de amplificação da luz *laser*.

3.1 Propagação do raio laser

A luz do *laser* tem propriedades muito distintas e únicas e a forma como é gerada permite distinguir os *lasers* de outras fontes de luz, tais como as lâmpadas fluorescentes.

(Figura 3.3)

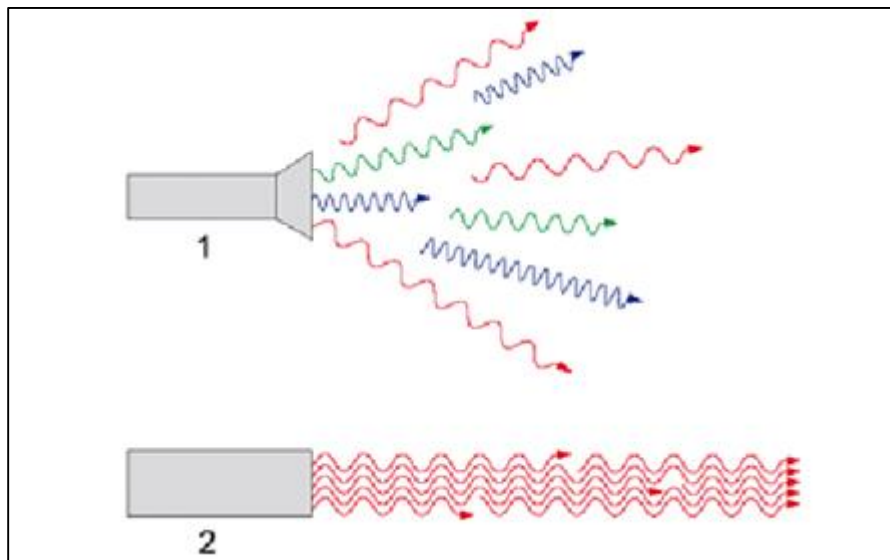


Figura 3.3. 1 – Lanterna com lâmpada fluorescente; 2 – luz *laser*.

Na lâmpada fluorescente, a luz é emitida em todas as direções e com diferentes comprimentos de onda, traduzindo a forma como a luz é produzida. Quando a eletricidade passa pelo filamento, este aquece e os átomos são excitados, emitindo posteriormente luz. Este fenómeno descrito é designado de reação espontânea.

No *laser*, a propagação da luz é consequência das suas propriedades únicas, sendo esta monocromática, dirigida e coerente. É designada monocromática porque todos os fótons emitidos apresentam o mesmo comprimento de onda, sendo determinado pelas transições de energia nas substâncias responsáveis pela emissão da luz *laser*. A coerência do raio de luz é resultado do facto de todas as ondas se encontrarem em fase, isto é, os picos das diferentes ondas são coincidentes e, por sua vez, os vales das mesmas são também eles coincidentes. A direção da propagação da luz é uma característica importante. O facto da luz *laser* ser dirigida, isto é, os fótons apresentarem todos a mesma direção, encontrando-se praticamente paralelos uns aos outros, o que permite que a luz tenha uma forma compacta que raramente desvia. Assim, a condução da luz é conseguida com facilidade, permitindo que toda a energia se foque numa zona muito pequena.

Estas características tornam o *laser* muito apelativo, tendo várias aplicações. O facto da propagação de luz ser monocromática torna-o um importante aliado no contexto de

situações em que há possibilidade de surgirem interferências do exterior quando estão em funcionamento, como por exemplo, na reprodução de um CD ou durante um processo de medição (calibração).

A capacidade da luz *laser* ser dirigida torna-a importante para o processamento de materiais, ao formar um raio compacto com elevada potência que se concentra num ponto muito pequeno. Este raio tem a capacidade de ser conduzido por longas distâncias sem que ocorra perda de potência. A densidade de energia (energia por unidade de área) no foco é dez milhões de vezes (10^7) mais elevada do que a da lâmpada fluorescente.

3.2 Fonte laser

O princípio físico para dar origem à luz *laser* é independente da potência do raio, ou seja, é o mesmo tanto no caso de uma fonte de *laser* de grande potência que é utilizada para corte, como na caneta com apontador *laser*. **(Figura 3.4)**

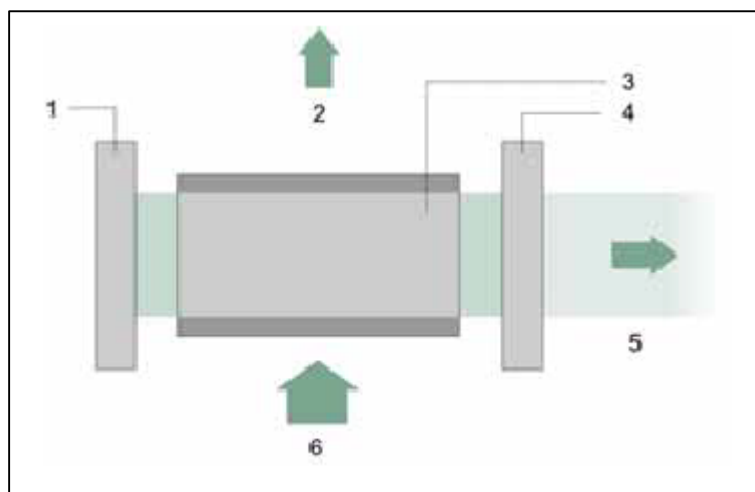


Figura 3.4. 1 – espelho de reflexão elevada; 2 – energia perdida através de dissipação de calor; 3 – meio ativo; 4 – espelho de reflexão parcial (espelho de saída); 5 – raio *laser*; 6 – energia necessária para excitação.

Meio de ganho

O meio de ganho, também designado de meio ativo, é a substância na qual a luz *laser* é produzida e amplificada. Os materiais utilizados como meios de ganho podem encontrar-se no estado gasoso, sólido ou líquido, desde que possuam a capacidade de emitir luz quando

excitados. É necessário que um meio tenha um nível de energia apropriado para suportar a ação do *laser*. Em meios gasosos, a excitação das moléculas é normalmente realizada por uma descarga elétrica através do gás. Em meios sólidos, o raio é obtido mediante radiação intensa provocada por lâmpadas de *flash* ou através de *lasers* de díodos. Em meios semicondutores, é a injeção de corrente elétrica no meio que possibilita a excitação molecular.

Ressonador

O ressonador, construído pelos espelhos em redor do meio de ganho, é responsável por guiar a luz *laser* através do meio de ganho. O espelho de reflexão elevada reflete a luz do *laser* na sua totalidade, enquanto o espelho de saída de reflexão elevada permite que parte da luz saia do ressonador.

A luz passa repetidamente pelo meio de ganho e, de cada vez que isto ocorre, há amplificação da luz e a sua direção é determinada.

Bombeamento

A emissão da luz *laser* a partir do meio de ganho requer que haja receção de energia para que o processo de excitação possa ocorrer. A energia pode chegar ao meio de ganho por via de meios óticos, meios elétricos ou químicos. A forma utilizada para enviar a energia até ao meio de ganho está dependente do tipo de *laser*.

Refrigeração

Parte da energia que é enviada para o meio de ganho para realizar a excitação do meio ativo é perdida sob a forma de calor, ou seja, o rendimento do processo de excitação está muito longe do ideal. Para evitar o sobreaquecimento dos componentes que constituem a fonte de *laser*, é utilizada uma unidade de refrigeração, a qual permite adicionalmente que o equipamento tenha um funcionamento contínuo.

3.3 Tipos de laser

Existem vários tipos de *lasers*, diferindo entre si pelo comprimento de onda e radiação emitida, e apresentando cada um múltiplas aplicações. **(Tabela 3.1)** A classificação dos *lasers* está relacionada com o meio ativo que estes utilizam.

Tabela 3.1 Principais tipos de *lasers* e a sua aplicação.

Tipo de <i>laser</i>	Meio ativo	Exemplos e comprimento de onda	Áreas de aplicação
<i>Lasers</i> gasosos	Nitrogen	0.3371	Fonte bomba ótica para dye laser
	Excimer (inert gas Halogenid laser): ArF KrF XeCl XeF	0.1931 0.2484 0.308 0.351	-Fonte bomba ótica para dye laser. -Processamento de Materiais de material plástico, vidro e cerâmica. -Espectroscopia -Medicina -Tecnologia de medição.
	Helium-Neon (He:Ne)	0.6328	-Tecnologia de medição. -Holografia -Ajuste
	Argon (Ar)+	0.3511-0.5287	-Fonte bomba ótica para dye laser. -Tecnologia de medição. -Holografia -Espectroscopia -Medicina
	Krypton (Kr)+	0.324-0.858	-Fonte bomba ótica para dye laser. -Espectroscopia -Medicina -Fotolitografia
	Carbon dioxide (CO ₂)	10.6	-Processamento de materiais. -Espectroscopia -Medicina
<i>Lasers</i> estado sólido	Rubin (Cr ³⁺ :Al ₂ O ₃)	0.694	-Medicina -Lidar

			-Processamento de materiais. Primeiro laser tecnicamente criado (1960)
	Neodymium:Glas s (Nd:Glass)	1.062	-Processamento de materiais. -Pesquisa Plasma. -Fotoquímica
	Neodymium:YAG (Nd:YAG)	1.063 1.064	-Processamento de materiais. -Medicina
	Alexandrite	0.755	-Medicina
Lasers de díodos	GaAlAs GaAs	0.635-0.910	-Fonte bomba ótica para Nd: YAG laser. -Engenharia de comunicação ótica. -A tecnologia de áudio. -Impressora a laser. -Tecnologia de medição. -Medicina -Também processamento de materiais para potências mais elevadas (na faixa kW).
	InGaAsP / InP	1.3	
	InGaAlAs	1.5	
Dye laser (laser de corante)	Corantes orgânicos em solução fortemente diluído	0.31-1.28	Medicina

Existem vários *lasers* com aplicação em processamento de materiais (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 Tipos de *lasers* mais utilizados em processamento de materiais.

Tipo de laser	Meio Ativo	Exemplos e comprimento de onda	Áreas de aplicação
Lasers Gasosos	Gases ou mistura de gases	CO2 (carbon dioxide) 10,6 μm	Corte e soldadura de metais, também pode ser

			aplicado em processos de endurecimento e marcação
Lasers estado solido	Cristal ou vidro dopado com iões ativos	Nd:YAG (neodymium:yttrium aluminum garnet) 1.064 m Yb:YAG (ytterbium:yttrium aluminum garnet) 1.03 m Yb:glass (ytterbium:glass) 1.05-1.1 m Nd:YLF (neodymium:yttrium lithium fluoride) 1.047 m	Soldadura, corte, brasagem também é aplicada em equipamentos de scanner 3D
Lasers de díodos	Semicondutores	GaInP (gallium indium phosphide) 0.67-0.68 m GaAs (gallium arsenide) 0.78-0.98 m	Endurecimento, soldadura por condução, também é usado de forma indireta para bombear laser no estado solido

3.4 Elementos que constituem um sistema *laser*

Independentemente da finalidade que se pretende dar à fonte de *laser*, seja esta corte, soldadura ou marcação, são sempre necessários outros componentes para criar um sistema *laser*.

Os sistemas *laser* podem ir desde um equipamento onde o operador segura a peça nas mãos e ativa o *laser* manualmente até um sistema totalmente automatizada de produção em série (**Figura 3.5**).

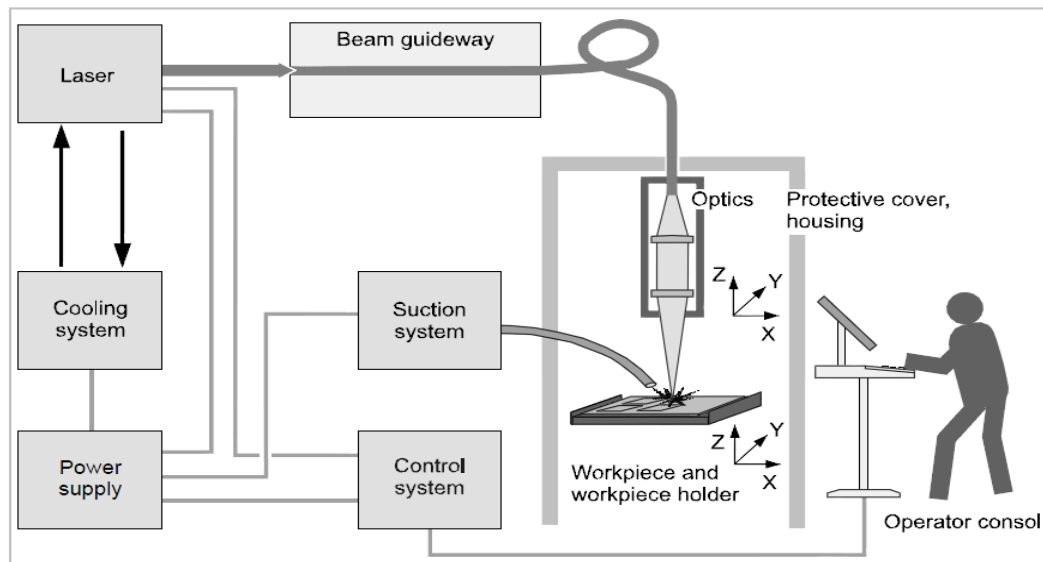


Figura 3.5. Esquema generalizado do *laser* e seus constituintes.

Fonte *laser*

A fonte laser é o núcleo de todo o sistema, estando acopladas a esta a fonte de alimentação e a unidade de refrigeração, normalmente.

Sistema de focagem

O sistema de focagem tem a função de alterar o diâmetro do raio *laser* junto à superfície de trabalho, permitindo que se proceda a ajustes de acordo com a aplicação e o tipo de material em que vai ser aplicado. A posição das lentes que constituem o sistema de focagem pode ser ajustada de forma manual, ou através do *software* que é responsável pela gestão do equipamento.

Estação de trabalho

É na estação de trabalho que está localizada a peça que se pretende soldar ou a chapa que se pretende cortar. A estação de trabalho tem também a função de proteger o operador e todo o meio envolvente dos perigos de exposição à luz e radiação *laser*. Podemos ter diferentes configurações da estação de trabalho, dependendo o índice de proteção do *laser* que será utilizado e da finalidade que pretendemos dar ao equipamento.

Seguranças

O sistema de segurança engloba desde as betoneiras de emergências aos sensores de fecho das portas. Os equipamentos mais recentes levam ao limite a tecnologia e a qualidade dos diferentes componentes que constituem os sistemas de segurança.

Sistema de controlo

O sistema de controlo é responsável pela gestão de todos os diferentes componentes que constituem o sistema *laser* desde a fonte de *laser* às óticas. É também responsável por gerir todos os sinais, tais como, erros e alarmes.

3.5 Geração, transporte e aplicação do raio laser

Todos os exemplos dados dentro deste subcapítulo, tem em conta o capítulo 4 referente ao título deste relatório.

3.5.1 Geração-Laser de disco

Os *laser* de disco TRUMPF (**Figura 3.6**) apresentam uma faixa de potência que pode chegar até aos 8 kW, com alta qualidade de raio e alta eficiência, sendo os mais indicados para o corte de metais com pequena espessura e também para soldadura.

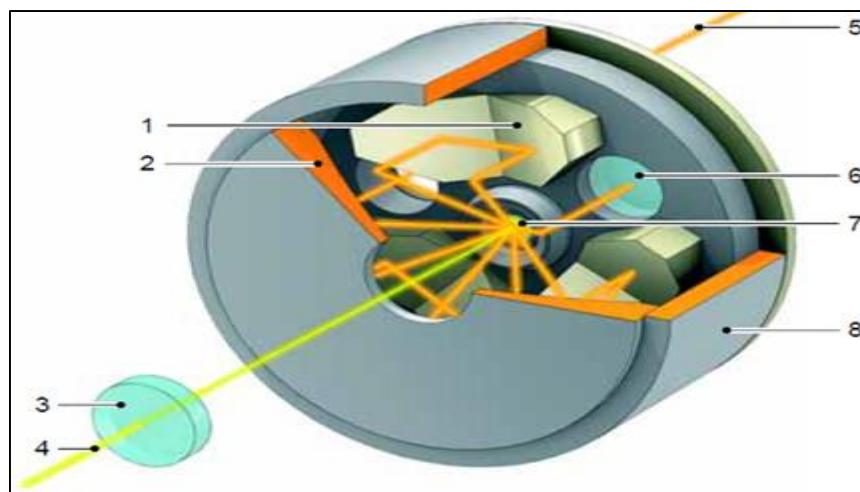


Figura 3.6 Esquema de funcionamento de um *laser* de disco. 1 – espelho dobrável; 2 – espelho parabólico; 3 – espelho de saída; 4 – raio *laser* de saída; 5 – bomba do raio *laser*; 6 – espelho traseiro; 7 – meio de ganho; 8 – cavidade.

O meio de ganho de um laser de disco é um disco cristalino feito de Yb: YAG, que apresenta cerca de 15 mm de diâmetro e 0,2 mm de espessura. O disco assenta num dissipador de calor, o qual tem a função de retirar o calor em excesso e manter o disco dentro de uma gama temperatura aceitável para que este tenha um funcionamento contínuo. O lado de trás do disco tem uma superfície refletora: reflete o raio *laser* e a luz proveniente da bomba da luz *laser* (*laser* de díodos). O raio *laser* bombeado pela fonte de díodos é focado para um diâmetro de poucos milímetros e é encaminhado para o disco. O disco é tão fino que apenas absorve uma parte da luz emitida pela bomba. Por esta razão, o raio é reencaminhado através de espelhos de modo a atravessar o disco várias vezes.

Após atravessar várias vezes o disco, o raio *laser* sai da cavidade através de um orifício situado no centro do espelho parabólico. O espelho de saída do ressonador está localizado do lado de fora da cavidade.

3.5.2 Transporte-Fibra ótica

O raio *laser* é direcionado por cabos de fibra ótica construídos em várias camadas. As diferentes camadas foram criadas para conferir proteção da alma condutora e garantir que não ocorra saída da luz *laser* para o exterior. A camada externa é constituída por um revestimento de aço, com o intuito de proteger os componentes internos do *stress* mecânico. No interior, para o caso de a fibra se partir, há um cabo para o circuito de segurança. Este tem como função desligar a fonte de *laser* de forma instantânea. Adicionalmente, existe ainda um revestimento que confere proteção à fibra ótica (**Figura 3.7**).

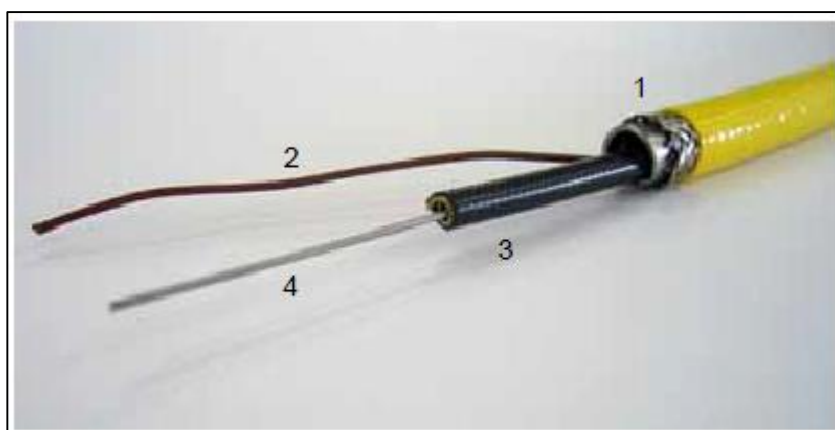


Figura 3.7 Constituição da fibra ótica. 1 – revestimento com malha de aço; 2 – circuito de segurança; 3 – camada protetora; 4 – fibra ótica.

A fibra ótica é constituída por uma fibra de sílica com duas camadas, o núcleo e o revestimento. O diâmetro da alma condutora pode variar entre 10 μm e 600 μm , em função da potência e qualidade do raio *laser* a ser transportado pelo mesmo. O revestimento que rodeia o núcleo da fibra é responsável por manter a luz *laser* no interior. Uma outra camada exterior, em plástico, em torno da fibra, protege-a de danos.

O princípio de funcionamento baseia-se na reflexão repetida do raio de luz de volta para o núcleo da fibra. Os tipos mais comuns de fibras são as *step-index* e as *graded-index*, sendo o primeiro o utilizado no trabalho que vou explicar com mais pormenor adiante.

Nas fibras *step-index*, o índice de refração diminui em função da distância ao centro de forma exponencial. Quando a luz atinge a camada de revestimento no ângulo certo, esta é totalmente refletida, voltando ao núcleo e seguindo um trajeto em ziguezague através do núcleo da fibra (**figura 3.8**).

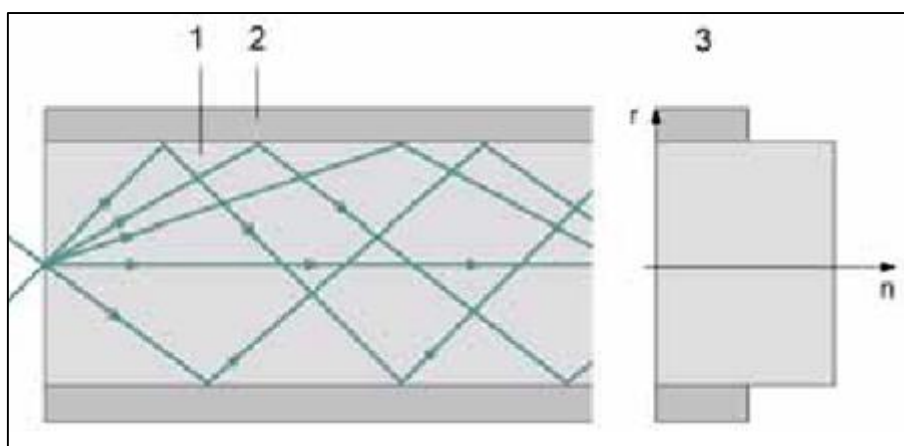


Figura 3.8 Fibras *step-index*. 1 – núcleo; 2 – revestimento; 3 – perfil do índice de refração, sendo n o índice de refração e r o raio.

A questão que se impõe é qual a melhor fibra para soldar. A distribuição da densidade nas fibras *step-index* permite efetuar cordões de soldadura com uma largura mais elevada, aumentando, desta forma, a resistência do cordão de soldadura. Em contraste, as fibras de *graded-index* permitem efetuar um diâmetro de raio mais reduzido, diminuindo a largura do cordão de soldadura, revelando-se assim vantajosas para o processo de soldadura, ao passo que as *step-index* são mais indicadas para processos de corte em que a sua principal função é obter superfícies de corte perfeitamente paralelas.

Conectores da fibra ótica

Conector de entrada

O raio *laser* quando sai pelo espelho de saída tem aproximadamente 6 a 10 mm de diâmetro e é enviado para o interior da fibra ótica através de uma lente que foca o raio próximo à sua extremidade, permitindo que o máximo possível de luz *laser* passe para dentro da alma condutora da fibra. Para que o processo ocorra com o menor índice possível de perda, é importante ter em atenção vários pontos: i) a extremidade da fibra deve ser polida, com o intuito de ficar perfeitamente limpa e lisa; ii) a extremidade da fibra deve ser polida para que esta seja perpendicular ao eixo do raio; iii) a área circundante deve estar limpa e sem poeiras; iv) o raio deve ser posicionada de modo a que esteja concêntrico com a fibra; v) o diâmetro do raio na extremidade da fibra deve ser sempre inferior ao diâmetro do núcleo; vi) o ângulo máximo de aceitação da fibra não deve ser ultrapassado.

O raio *laser*, após a sua passagem pela lente de entrada, deve estar totalmente no interior do cone de admissão da fibra. Caso isto não se verifique, não haverá reflexão total do raio, já que o cone é criado com a dimensão máxima para permitir que ocorra uma reflexão total do raio *laser* (**Figura 3.9**).

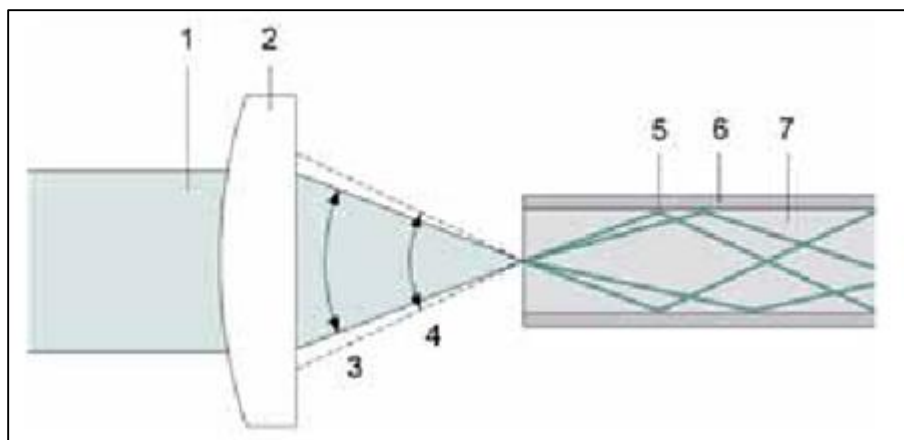


Figura 3.9 Conector de entrada com reflexão total. 1 – raio *laser*; 2 – lente de entrada; 3 – ângulo de entrada; 4 – cone de entrada; 5 – raio *laser* totalmente refletido; 6 – revestimento; 7 – núcleo.

Se o ângulo do raio laser for superior ao ângulo de reflexão máximo do núcleo condutor da fibra, parte do raio, ao atingir o revestimento, não será refletido (**Figura 3.10**). Se isto ocorrer, uma parte do raio irá penetrar o revestimento e perfurá-lo, danificando a fibra. A perfuração do revestimento da fibra leva à perda de potência e a substituição da fibra será necessária.

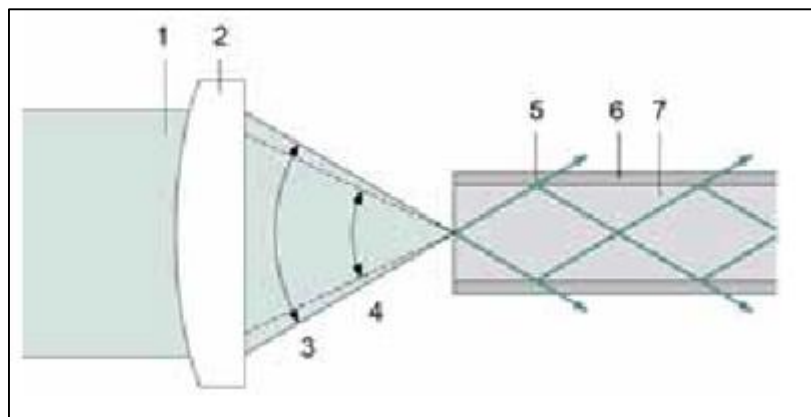


Figura 1.10 Conector de entrada com reflexão parcial 1 – raio *laser*; 2 – lente de entrada; 3 – ângulo de entrada; 4 – cone de entrada; 5 – raio *laser* não refletido; 6 – revestimento; 7 – núcleo.

Com o aumento da qualidade do raio *laser*, o diâmetro do núcleo da fibra pode ser mais reduzido. Podemos também ter diâmetros de foco mais reduzidos, sendo o ângulo do cone praticamente plano.

Conector de saída

Na outra extremidade da fibra, a saída do raio *laser* tem o mesmo ângulo de divergência. Quando as fibras *step-index* são usadas para transportar o raio *laser*, o diâmetro do núcleo e o ângulo de divergência influenciam a qualidade do raio que é obtido no conector de saída (**Figura 3.11**).

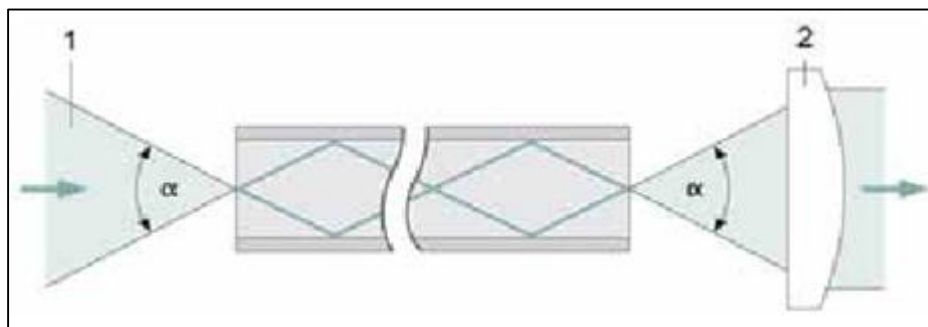


Figura 3.11 Conector de saída. 1 – raio *laser*; 2 – lente de saída; α – ângulo de acoplamento de entrada e saída.

Curvatura

A fibra óptica tem um raio mínimo até ao qual pode ser dobrada (**Figura 3.12**). Se o raio for muito pequeno, as paredes exteriores do núcleo ficam com uma determinada curvatura. Esta curvatura não permite que o raio *laser* tenha uma reflexão total, podendo ocorrer perfuração das paredes do revestimento. Normalmente o raio mínimo de curvatura está compreendido entre 200 e 250 mm. No entanto, este espectro de valores apenas é considerado

quando temos potência no interior da fibra. Para movimentos em vazio, a fibra pode estar dobrada de forma a ser obtido um raio inferior.

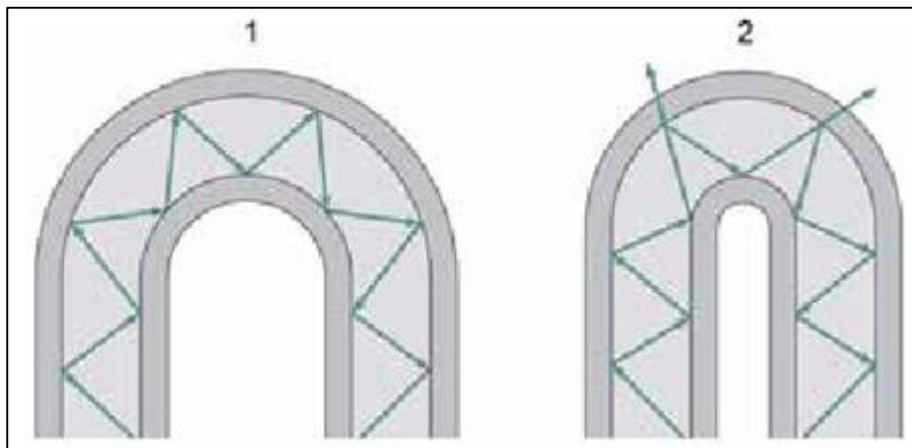


Figura 3.12 Reflexão interna quando a fibra óptica se encontra dobrada. 1 – reflexão interna total; 2 – reflexão interna parcial.

3.5.3 Aplicação-Cabeçal

Cabeçal de soldadura

O cabeçal de soldadura (**figura 3.13**) é o último componente do caminho ótico, este contém alguns acessórios que são fundamentais, entre os quais auxílio na programação e monitorização do processo, gás de acabamento, entre outros.

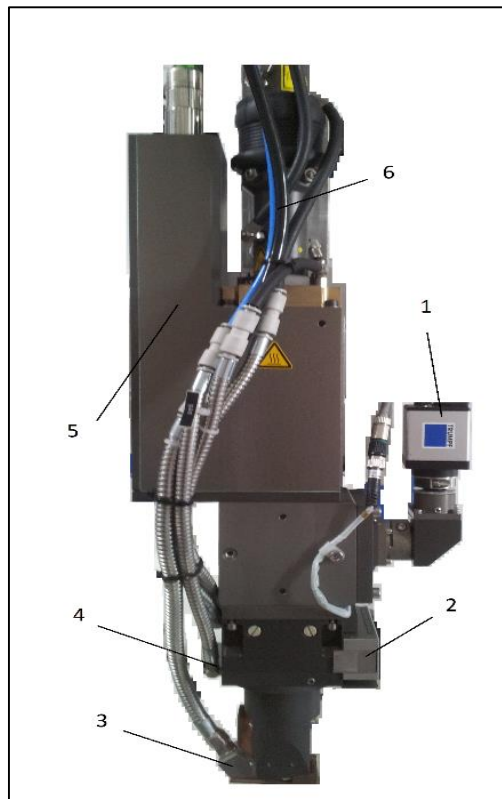


Figura 3.15-Cabeçal de soldadura, 1-camara de monitorização, 2-vidro de proteção, 3-gás de acabamento, 4-Crossjet, 5- *focus length*, 6 refrigeração

Todos os acessórios tem um papel fundamental no decorrer do processo de soldadura, alguns deles podemos dizer que são imprescindíveis, Sendo um deles a lente que faz o último ajuste do diâmetro focal do raio antes de este atingir a peça de trabalho, o *crossjet* que fornece proteção adicional contra os salpicos, este resume-se a uma cortina de ar comprimido que tem a função de proteger o vidro de proteção da lente, este vidro encontra-se dentro de um módulo apos a camara onde se encontra a lente. Temos ainda o gás de acabamento que é opcional, pois não é obrigatório estar instalado para realizar o processo. A camara de monitorização dá-mos uma vista superficial do processo de criação do cordão de solda.

Focagem

O sistema de focagem concentra o raio *laser* após a passagem deste ter pelo conetor de saída. Após passar a lente que efetua a focagem, este vai ficando com um diâmetro progressivamente mais reduzido e, após atravessar o ponto do foco, volta a expandir (**Figura 3.14**).

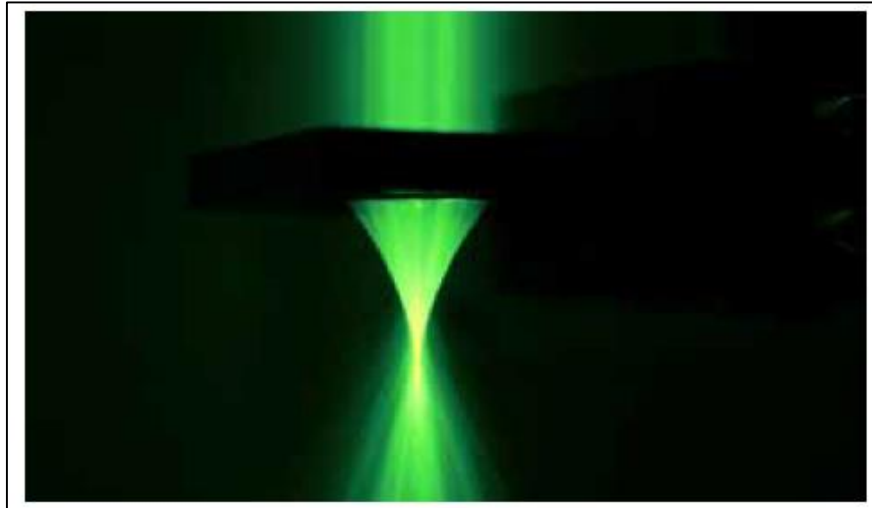


Figura 3.14 Ilustração do processo de focagem.

As propriedades que apresentam maior na qualidade final da soldadura ou do corte são o diâmetro focal, densidade, comprimento *rayleigh*, distância focal e o *standoff* (Figura 3.15).

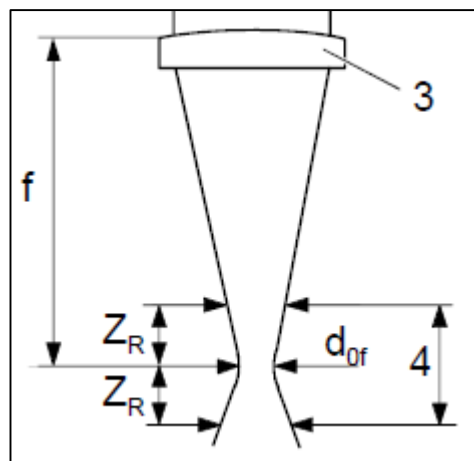


Figura 3.15 Diâmetro do focal. Z_R – comprimento *rayleigh*; d_{0f} – diâmetro focal; f – distância focal; 3 lente de focagem.

O diâmetro focal é medido no ponto onde o diâmetro do raio é mais pequeno após a passagem pela lente. Quanto menor o diâmetro focal, maior a densidade de potência. É importante ter sempre em consideração que a densidade de potência varia muito entre os diversos processos de fabrico e entre o tipo de material com que vamos trabalhar.

O comprimento *rayleigh* é obtido pela medição feita desde o ponto focal até a secção transversal onde a área corresponde ao dobro da secção transversal onde se localiza o ponto focal. A soma do comprimento *rayleigh* acima do ponto focal e abaixo, ou seja, o dobro do comprimento *rayleigh* é normalmente denominado de profundidade de campo. Com o aumento do comprimento *rayleigh*, verifica-se uma diminuição da divergência do raio depois do ponto focal.

3.6 Segurança laser

Os *lasers* YAG dão origem a uma luz invisível intensa, situada próximo da gama do espectro infravermelho. Esta luz pode constituir um perigo para os olhos, pelo que se torna importante definir medidas preventivas para a sua manipulação. As medidas preventivas mais importantes para a manipulação de luz *laser* foram definidas no regulamento para a prevenção de acidentes em vigor em cada região. Neste caso, as normas vigentes são as definidas pela Europa. Este regulamento para prevenção de acidentes refere-se a norma EN 60825 "Segurança de instalações laser" que existe como norma internacional harmonizada.

Um aspeto importante das prescrições é a classificação das instalações *laser* em diferentes classes, de acordo como perigo proveniente do sistema *laser* acoplado ao equipamento em causa.

Uma explicação mais detalhada das diferentes classes *laser* pode ser consultado na EN 60825. Os pontos que se seguem fazem uma descrição simples de cada classe *laser*:

- i) Classe 1 significa que do equipamento *laser* não representa nenhum perigo em funcionamento normal. Se existir um possível perigo durante a observação com instrumentos óticos, o *laser* é classificado como classe 1M;
- ii) Classe 2 significa que a radiação *laser* apresenta uma gama de comprimento entre os 400 e 700 nm, ou seja, é classificada como onda visível. A radiação não constitui perigo para os olhos humanos, contudo deve-se evitar olhar diretamente para o raio. Se se verificar um possível

perigo durante a observação com instrumentos óticos, o *laser* é classificado como classe 2M;

- iii) Na classe 3, podemos distinguir como 3R ou 3B. A classe 3R inclui a radiação *laser* cujo comprimento de onda se situa entre os 106 e os 302,5 nm. Olhar diretamente no raio pode ser perigoso, mas o risco é inferior ao dos *lasers* classe 3B. A classe 3B significa que o raio direto ou refletido é perigoso. Normalmente não há perigo em observar reflexos difusos;
- iv) Classe 4 incluiu a luz *laser* que se revela perigosa tanto para os olhos como para a pele. Durante a utilização de equipamentos com este tipo de luz, é imprescindível garantir o cumprimento de medidas de segurança adequadas, dando ênfase à proteção dos olhos através de óculos de proteção especiais para *lasers*.

Os equipamentos *laser* da TRUMPF inclui *lasers* classe 1, com adequada utilização de coberturas de proteção. Quando se realizam trabalhos de manutenção ou de assistência técnica com as tampas de proteção abertas e é efetuado um shunt ao sensor de segurança, o equipamento passa a denominar-se de classe 4.

Cada um dos diferentes equipamentos que constituem o sistema *laser* tem uma classificação (**Tabela 3.3**).

Tabela 3.3 Classificação dos diferentes equipamentos que constituem um sistema *laser*.

Equipamento/componente	Classe <i>laser</i>
Equipamento laser com cobertura fechada	1
Equipamento laser com cobertura aberta	4
Cabo de fibra ótica	1
Máquina laser com cobertura de proteção	1
Maquina laser sem cobertura de proteção	4
<i>Laser</i> piloto	2

3.7 Conceitos básicos do processamento por *laser*

A interação entre o raio *laser* e a peça de trabalho é o foco de todo o trabalho, garantir que o objetivo principal possa ser cumprimento: criação dos equipamentos (**Figura 3.16**). A qualidade de interação entre estes dois está dependente das suas propriedades. Os fatores que demonstram ser mais relevantes no processo de interação são a reflexão, a absorção e a transmissão. Uma parte do raio *laser* é absorvida pela peça de trabalho, enquanto outra parte é refletida e uma terceira parte do raio atravessa a peça de trabalho sem que ocorra interação (transmissão).

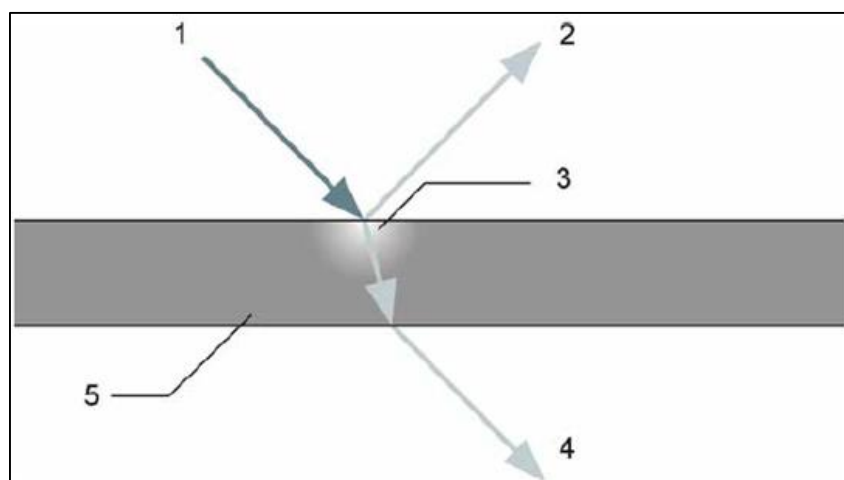


Figura 3.16 Interação entre o raio *laser* e a peça de trabalho. 1 – incidência do raio *laser*; 2 – reflexão; 3 – absorção; 4 – transmissão; 5 – peça de trabalho.

A relação entre a absorção, a reflexão e a transmissão depende do tipo de material: se pertencer ao grupo dos metais, a taxa de energia que é perdida através de transmissão é praticamente nula.

Quanto maior for a taxa de absorção do material maior será a energia disponível para a execução da tarefa pretendida. A energia que a peça de trabalho absorve vai despoletar um aumento de temperatura. A condutividade térmica do material em causa tem uma influência preponderante no decorrer do processo, podendo esta pode ser positiva ou negativa dependendo do processo que está a ser aplicado. Se o processo em causa for um de corte, é conveniente que o material nunca atinja valores de temperatura muito elevados, pois pode conduzir a alterações das propriedades do material na região de corte. Em contraste, a maioria dos processos de soldadura, o aumento da temperatura até valores muitos elevados

é benéfico, uma vez que despoleta o aumento da velocidade de soldadura e diminui a energia depositada por unidade de área.

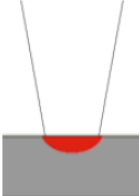
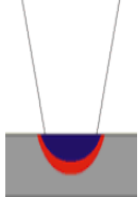
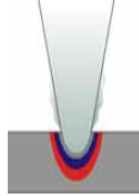
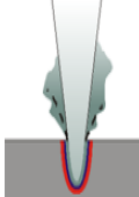
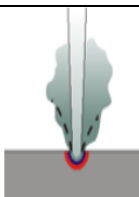
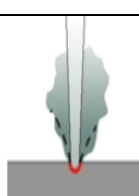
Existem diversos processos de fabrico que beneficiam das características térmicas do raio *laser*, nomeadamente, o endurecimento através do aquecimento do material, o corte ou soldadura através da fundição do material e a perfuração ou estruturação através da vaporização ou de alterações das propriedades químicas.

O estado físico dos materiais é passível de ser alterado (para líquido ou gasoso) em função da potência do *laser*. O tempo e a potência necessários para que o estado pretendido seja atingido vai depender das propriedades químicas dos materiais a processar.

Existem outro tipo de materiais como os polímeros, por exemplo, em que não se verifica o mesmo fenómeno quando submetidos à ação da radiação *laser*. A estruturação é um processo que tem por base a capacidade do raio *laser* de proporcionar um aumento de temperatura até valores muito elevados de forma quase instantânea em alguns tipos de materiais. Assim sendo, o metal poderá sofrer evaporação sem entrar no estado líquido, passando, portanto, diretamente ao estado gasoso. Este processo é designado sublimação.

Num processo de maquinação, há intervenção de diferentes parâmetros. No entanto, existem dois que assumem uma importância clara: a densidade de potência e o tempo de interação entre o *laser* e a peça. A associação destes dois parâmetros dita a quantidade de energia transferida por unidade de área e por unidade de tempo. Através da variação da potência *laser* e do diâmetro do foco, é possível incutir uma variação direta na densidade de potência. O tempo de interação pode variar entre trabalho contínuo, como por exemplo, em perfurações, e trabalho por pontos em processos de corte de contornos ou soldadura com penetração, por exemplo.

Tabela 3.4 Tipos de processamento a *laser* e principais características.

Diagrama	Processo	Efeito principal	Concentração de energia	Tempo de interação
	Endurecimento	Aquecimento	30W/mm^2	Segundos
	Soldadura por condução de calor	Fusão	1KW/mm^2	Milissegundos
	Soldadura com penetração e corte	Fusão e vaporização	10KW/mm^2	Milissegundos
	Perfuração	Vaporização	1MW/mm^2	Milissegundos
	Gravação	Vaporização e ionização	10MW/mm^2	Nano segundos
	Estruturação	Sublimação	10GW/mm^2	Pico segundos

zona vermelha - material sofre alterações da sua estrutura química devido a temperatura a que foi sujeito; zona azul - material durante o processo aplicado com alteração do seu estado.

3.8 Soldadura *laser*

A soldadura *laser* surgiu com a introdução do *laser* de estado sólido por impulsos. Em 1970 começaram a ser utilizados nas indústrias e as aplicações a que estava associado incluía componentes elétricos de precisão como, por exemplo, monitores e geradores de raio.

Atualmente, já existe o *laser* de estado sólido de elevada potência, com o qual é possível obter emissão do raio *laser* por impulsos e de modo contínuo. Atendendo à existência destas distintas opções do modo de emissão, o sistema *laser* pode ser aplicado em tipos de soldadura diferentes: soldadura por condução de calor e soldadura de penetração profunda. Assim sendo, a aplicação pode ir desde estruturas de navios, chassis de automóveis, cordões muito finos e com elevada precisão aplicados no *pacemaker* cardíacos, entre outros.

Os metais – aço, aço inoxidável, titânio e alumínio e também alguns metais não ferrosos e preciosos – são os materiais mais indicados para serem alvo de soldadura com este tipo de fonte *laser*.

A variedade de máquinas e sistemas que pode ser encontrado no mercado é bastante ampla, podemos encontrar sistemas para efetuar soldadura manual, sistemas de soldadura 3D automatizados e sistemas mais flexíveis como as integrações com robôs. Existem também algumas aplicações onde temos a máquina *laser* integrada numa linha de produção ou até mesmo incorporada em outra máquina em que o *laser* assume uma função secundária. Estamos a assistir a grandes avanços em sistemas de soldadura *laser* remota, onde os robôs são combinados com sistemas de visão artificial – digitalização ótica.

A soldadura *laser* quando comparada com os sistemas de soldadura convencionais oferece inúmeras vantagens:

- i) a energia transmitida à peça de trabalho pode ser aplicada numa área muito pequena, permitindo, desta forma, obter uma zona afetada termicamente muito reduzida, bem como baixo *stress* térmico e uma distorção extremamente baixa;
- ii) é possível obter cordões de soldadura com uma secção reduzida e com um elevado grau de acabamento superficial, reduzindo assim a o tempo despendido em trabalhos posteriores de acabamento ou pintura, ou até mesmo eliminando a necessidade destes;
- iii) elevada flexibilidade e capacidade de integração com outros sistemas de produção, tais como, perfuração, flexão ou alinhamento;
- iv) o sistema fica operacional em segundos e permite começar a maquinar instantaneamente, reduzindo o tempo de maquinação;

- v) os sistemas de soldadura *laser* são fáceis de integrar com sistemas de controlo e automação;
- vi) é fácil obter uma elevada qualidade do processo e acabamento através da introdução de sistemas de monitorização e controlo (posicionamento).
- vii) a soldadura ocorre sem nunca existir contacto mecânico com a peça de trabalho ou aplicação de pressão sobre a mesma.

3.8.1 Tipos de soldadura

Por condução de calor

O raio *laser*, quando entra em contacto com a peça de trabalho, vai conduzir à fusão do material e, consoante o raio *laser* vai progredindo, o material vai solidificando. A profundidade de material que fundiu por ação do calor transmitido à peça pelo raio *laser* varia apenas entre décimas de milímetro até um milímetro (**Figura 3.17**).

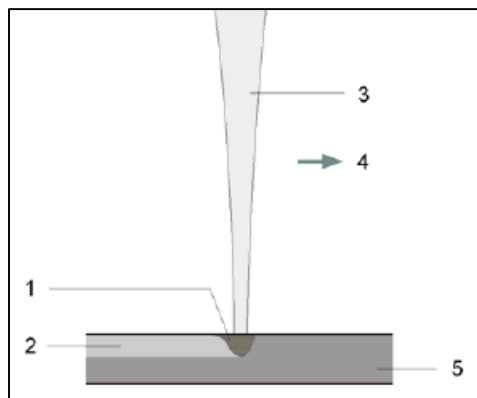


Figura 3.17 Princípio da soldadura por condução de calor. 1 – material fundido; 2 – cordão de soldadura; 3 – raio *laser*; 4 – sentido da soldadura; 5 – peça de trabalho.

A soldadura por condução de calor que utiliza a fonte de *laser* em estado sólido tem grande aplicação em peças de parede muito finas para efetuar soldadura de rebordos (**Figura 3.18**), como é o caso das carcaças das pilhas ou dos *pacemakers*.

O raio *laser* origina uma costura suave e arredondada que não requer qualquer retificação ou acabamento extra.

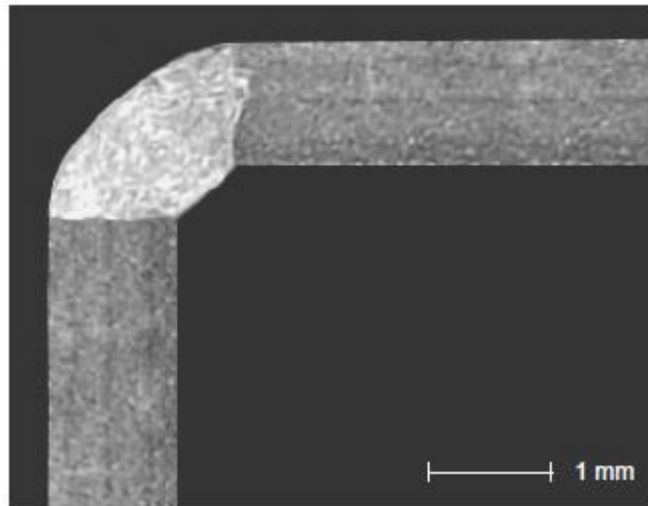


Figura 3.18 Corte transversal de cordão efetuado com soldadura por condução de calor.

A soldadura por condução de calor em alguns tipos de materiais é extremamente difícil. Esta dificuldade é explicada pela condutividade térmica dos materiais: quando o calor transmitido à peça não é dissipado de forma rápida, este irá acumular-se e a temperatura a que o material chega pode ultrapassar o valor limite de vaporização. Assim, ocorrerá a formação de vapor a partir do material e a penetração aumenta rapidamente, passando assim a um processo de soldadura com penetração.

Soldadura com penetração

Para se efetuar soldadura com penetração já é necessário ter uma densidade de energia superior a 10kW/mm^2 . Desta forma, a fonte *laser* tem que apresentar potência mais elevada e secção do foco mais reduzida. Neste tipo de soldadura, devido à concentração de energia, é criada uma bolha de vapor proveniente da fundição do metal. Com o decorrer da soldadura, o vapor exerce pressão sobre o material fundido, criando uma deslocação do mesmo. A energia vai sendo progressivamente absorvida pelo metal e, paralelamente, o material vai continuar a derreter, surgindo na peça um orifício estreito e profundo denominado *keyhole*, devido à forma semelhante a um buraco de fechadura. Assim sendo, vamos ter, no sentido em que está a decorrer a soldadura, material à frente da *keyhole* que se está a fundir e que solidifica após a sua passagem (**Figura 3.19**).

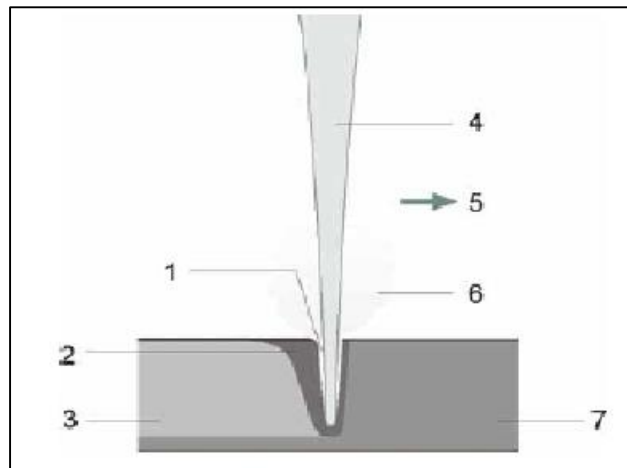


Figura 3.19 Princípio da soldadura por penetração. 1 – *keyhole*; 2 – material fundido; 3 – cordão de soldadura; 4 – raio *laser*; 5 – sentido da soldadura; 6 – vapor de metal; 7 – peça de trabalho.

O cordão de soldadura é estreito e profundo, podendo a profundidade do cordão ser até dez vezes superior à sua largura (Figura 3.20).



Figura 3.20 Corte transversal de cordão efetuado com soldadura com penetração.

Na soldadura com penetração, o raio *laser* é refletido várias vezes pelas paredes do *keyhole*. A penetração da soldadura aumenta enquanto existir raio *laser* para ser absorvido pelo material que se está a fundir junto as paredes do *keyhole*. Assim sendo, podemos caracterizar a soldadura com penetração como sendo um processo de elevada eficiência e elevada velocidade de processamento. Uma vez que a velocidade da síntese do cordão é elevada, a zona afetada pelo calor é muito pequena e a distorção obtida também é mínima. Podemos então dizer que este tipo de soldadura é adequado para trabalhos que requerem elevadas penetrações ou para soldar várias camadas de material em simultâneo.

3.8.2 Gás de proteção

Para além do raio *laser* como interveniente principal no processo de soldadura, também existem outros que assumem um papel secundário mas em grande parte dos casos são indispensáveis, como o gás de proteção e os materiais de adição. Para efetuar a soldadura de alguns materiais é necessário a utilização de gás de proteção durante o processo, com o intuito de evitar que o material fundido entre em reação química (oxidação) com alguns elementos que constituem o ar ambiente, como por exemplo, o oxigénio e o dióxido de carbono.

O gás é introduzido no cordão de soldadura através de um sistema auxiliar constituído por tubos. O sistema é estudado de forma a criar uma corrente laminar de forma a produzir uma cortina de proteção. Por vezes, o sistema é composto por vários tubos em paralelo para garantir que o cordão também está protegido durante a fase mais crítica (início da solidificação). Em função do material utilizado podemos ter o hélio (He), argon (Ar), azoto (N₂) ou uma mistura de gases como gás de proteção.

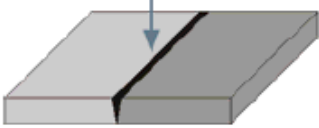
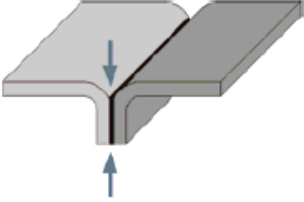
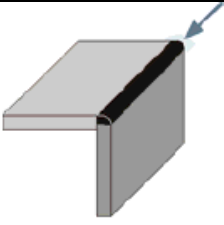
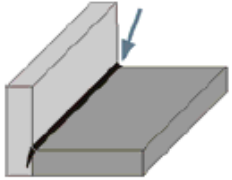
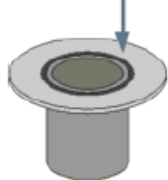
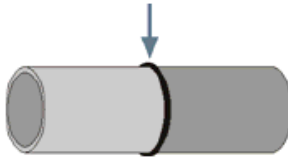
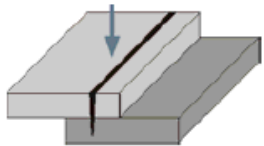
Quando falamos de soldadura *laser* com fonte de estado sólido, o gás não tem sempre a função de proteção. Por vezes é utilizado um processo de acabamento do cordão de soldadura. Com a aplicação de diferentes tipos de gás podemos obter cordões de soldadura com acabamento e cor diferentes.

3.8.3 Principais geometrias

Quando é feito o desenho e o estudo de uma peça que terá que passar pelo processo de soldadura laser, deve ter-se em consideração a geometria das juntas. A geometria descreve a forma como as peças se encaixam.

Quando o tipo de soldadura em causa tem como fonte um *laser* de estado sólido, é importante seguir algumas geometrias padrão para simplificar o processo e obter um cordão de soldadura com a qualidade pretendida (**Tabela 3.5**).

Tabela 3.5 Geometrias típicas da soldadura *laser*

Junta de topo	Junta flange	Junta de canto
		
Junta interior	Junta circular	Junta tubular
		
Junta sobreposta		
		

3.8.4 Tipos de cordões

Os cordões de soldadura podem ter formas muito distintas: desde uma linha a pontos sobrepostos, até mesmo círculos, se necessário (**Tabela 3.6**). O tipo de cordão que deve ser aplicado numa determinada junta tem sempre como fatores primários de dimensionamento a tensão a que ira estar sujeito e a quantidade de calor que pode ser transferida a peça sem alterar as suas propriedade.

Tabela 3.6 Cordões típicos da soldadura *laser*

Tipo de solda	Aparência	Descrição
Linha		Cordão padrão para soldadura em CW. Quando a peça é solicitada a tração, a tensão mecânica é superior no início e no fim do cordão. O cordão é impermeável quando suscetível a pressão de gás ou água
Costura		Quantidade de calor aplicada a peça é bastante inferior quando comparada com um cordão contínuo. A penetração é inferior no início e no fim de cada secção do cordão.
Onda		Cordão padrão para laser pulsado. A temperatura que a peça atinge é inferior pois existe tempo de arrefecimento no intervalo de cada ponto. O cordão pode ser impermeável ao gás e líquido, está pendente da taxa de sobreposição de cada ponto.
Pontos		Cordão típico do laser pulsado. Mais utilizado em componentes eletrónicos, cordão permeável.
Forma livre		Surge quando utilizamos soldadura remota, a forma do cordão está relacionada com o tipo de tensões que podem estar presentes na peça.

3.8.5 Qualidade do processo de soldadura

O principal objetivo de qualquer processo de controlo de qualidade é garantir que a peça está de acordo com as especificações e requisitos apresentados pelo cliente e que a mesma irá desempenhar a função para o qual está projetada sem apresentar problemas. Na soldadura, o ponto crítico é sempre o cordão de soldadura. Um cordão de soldadura deve cumprir sempre dois requisitos básicos. O primeiro considera que a largura e profundidade do cordão devem estar de acordo com o especificado, pois a secção transversal do cordão está dependente destes, bem como a resistência do cordão está diretamente relacionada com a secção transversal. O segundo requisito é a qualidade metalúrgica e estrutura interna do cordão de soldadura que deve ser o mais uniforme possível, sendo muito importante ter especial atenção com a porosidade.

As normas técnicas especificam muitos outros critérios e tipos diferentes de defeitos de soldadura (**figura 3.21**). É feita distinção entre defeitos internos e externos.

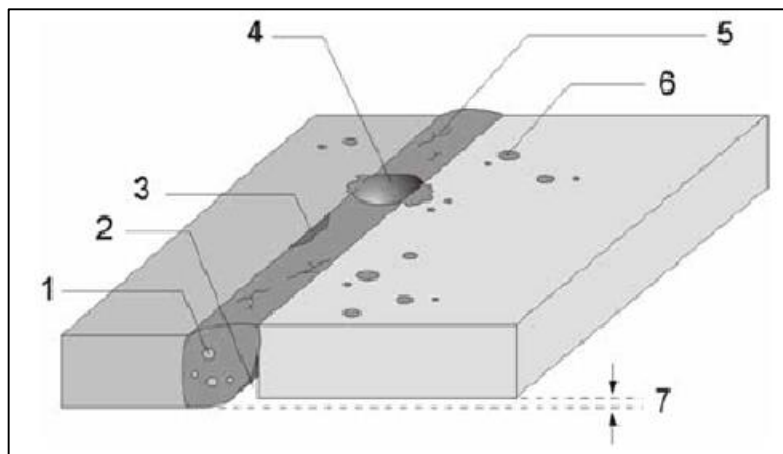


Figura 3.21- Principais defeitos de um cordão de solda, 1-poros, 2-, 3-fusão incompleta, 4- crateras, 5-fendas, 6-Salpícos, 7-desalinhamento entre fases da junta.

Defeitos internos

- fusão incompleta - Não se fundiu material suficiente para preencher a junta por completo.
- poros- São pequenas bolhas de gás ou ar que ficam presos no cordão de solda.
- fendas- Surgem por vezes na superfície da solda e também entre o cordão e a peça (zona termicamente afetada).

Defeitos externos

-defeitos de acabamento- fendas que surgem na supercílio do cordão de solda, dão um aspeto pouco agradável.

-material fundido expelido – o material que é expelido do cordão como impurezas da origem a crateras que reduzem a resistência do cordão e tornam a solda porosa.

- Desalinhamento – quando as fases da junta não estão devidamente alinhadas, podemos ter zonas em que a secção transversal do cordão é inferior ao previsto.

- Oxidação – a oxidação do cordão pode ocorrer durante o processo de soldadura devido a exposição do material fundido, como consequência podemos ter uma redução da resistência a corrosão.

- Salpicos - sobre a peça de trabalho ou na superfície da solda, leva a que seja necessário rebarbar e dar novo acabamento a peça.

Potência térmica e distorção

Podem surgir alguns problemas de distorção (empeno) durante o processo de soldadura, isto devido ao calor que é proveniente do processo de fusão. O calor transmitido ao restante material da peça pode levar a que esta sobre empenos devido as expansões e contrações térmicas. É importante assegurar que o calor resultante pode dissipar facilmente.

Há três estratégias para fazê-lo:

-Substituir cordões contínuos por traços permite gerar um curto intervalo para dissipação de calor.

-Soldar em modo pulsado.

- Se a peça é constituída por diferentes pontos a ser soldados, estes devem, ser organizados de forma a criar uma sequência que permita um aquecimento da peça de forma uniforme

Parâmetros

Para a correta utilização de *laser* para soldar, é necessário ter em atenção os seguintes parâmetros:

- i) a potência do *laser* depende do material, do processo e geometria da soldadura. Juntando aço inoxidável por condução de calor, a soldadura requer menos energia do que as soldaduras de penetração profunda em aço carbono;
- ii) a velocidade de soldadura no modo CW determina qual a quantidade de energia absorvida pelo material ao longo da cordão de soldadura (entrada de calor). Isso influencia a profundidade e forma de soldadura;
- iii) a velocidade de soldadura é dada pelo pulso frequência e a sobreposição local da junta . O poder de pulso e duração do pulso determina a quantidade de energia acoplada no material;
- iv) a determinação do raio diâmetro sobre a peça, influencia, assim, a largura e a profundidade da soldadura;
- v) a densidade de potência tem de ser suficientemente elevada para ultrapassar a transformação limite para o processo específico a ser utilizado. Um processo de soldadura com penetração requer densidades de energia mais altas do que o calor soldadura de condução.
- vi) O foco duplo pode produzir melhores resultados de soldadura em certas aplicações.

4 Adaptação do robô de soldadura

O projeto de adaptação do robô de soldadura *Fanuc 420 iF* (**Figura 4.1**) surgiu como um desafio dado pela direção da empresa, tendo como principal intuito dar nova utilidade ao robô de soldadura por pontos que, anteriormente, tinha como função soldar portas de segurança numa das empresas do grupo. A execução da soldadura a laser cuja fonte laser TruDisk 3001 provém de uma das máquinas já instaladas na empresa: a *TruLaser 5030* constituiu o objetivo primordial deste projeto.

Para a concretização deste desafio, foi comprado um *kit* de adaptação, o qual era composto por fibra ótica, cabeçal de soldadura, novo caminho ótico para a fonte de laser e acessórios para integração e para o sistema de comunicação. Posteriormente, foi então iniciado o estudo de todo o processo necessário para a correta adaptação do robô e implementação do mesmo.



Figura 4.1. Robô de soldadura por pontos
Fanuc 420 iF.

Fases de adaptação do robô de soldadura

No presente capítulo, as diferentes fases de adaptação do robô são apresentadas com o maior detalhe que me é permitido, tendo em consideração a limitação imposta pelo tempo de pesquisa e a componente económica implicada.

Durante o processo de adaptação do robô é possível distinguir 7 diferentes fases:

(i) Fase 1: Início da análise e verificação do estado do robô para a nova aplicação prevista;

(ii) Fase 2: Projeção da cabine para proteção do robô e acessórios para implementação de sistemas de iluminação, segurança e monitorização;

(iii) Fase 3: Construção e montagem da cabine e partes adjacentes.

3.1-Pintura do robô e mesa de trabalho.

(iv) Fase 4: Aplicação de toda a parte elétrica, segurança e respetivos sistemas de comando;

(v) Fase 5: Aplicação dos sistemas comunicação entre a fonte laser e o robô e teste dos mesmos;

(vi) Fase 6: Homologação do equipamento (elaboração do manual da máquina);

(vii) Fase 7: Criação de parâmetros de soldadura.

A seguinte tabela (**Tabela 4.1**) contém as principais etapas que constituem cada fase do projeto, bem como a entidade que esteve envolvida na sua execução.

Tabela 4.1. Descrição das diferentes fases do projeto.

Fases	Entidade responsável pela execução
Fase 1	
Verificação do estado de funcionamento do robô	Quantal (Manutenção)
Verificação se robô apresenta boa estabilidade durante movimentos rápidos e mudança de direção	Quantal (Manutenção)
Verificação se o robô consegue apresentar valores de repetibilidade dentro do admitido para este tipo de soldadura	Quantal (Manutenção)
Verificação se o robô consegue apresentar valores de repetibilidade dentro do admitido para este tipo de soldadura	Quantal (Manutenção)
Fase 2	
Atribuição das dimensões gerais da cabine tendo em conta a área de trabalho do robô	Quantal (Manutenção)

Estudo do sistema de segurança a implementar para criação de sistemas de fixação e afinação dos mesmos	Quantal (Manutenção) + InMast + IGUS
Desenho da cabine e calhas para ligação da fonte laser ao robô	Quantal (Engenharia)
Fase 3	
Corte do planificado de todas as diferentes peças, após corte passam a quinagem (apenas as que estão sujeitas a este processo), algumas peças requerem soldadura.	Quantal (Laser) Quantal (Quinagem) Quantal (Soldadura)
Pintura do robô, mesa para a fixação dos gabaris e quadro elétrico do robô.	Quantal (Manutenção)
Montagem da estrutura principal.	Quantal
Fase 4	
Colocação de toda a cablagem para a ligação dos circuitos de segurança, comando e monitorização.	Quantal (Manutenção)
Fixação e ligação sensores de segurança.	Quantal (Manutenção)
Efetuar interligação entre sistema de segurança e autómato que faz a gestão do mesmo.	InMast
Fase 5	
Fixação de caminho que cabo que será utilizado para transporte de todos os elementos de conexão da fonte de laser ao cabeçal de soldadura e robô.	Quantal (Manutenção)
Implementação de sistema articulado para passar a cablagem que conecta ao cabeçal de soldadura.	Quantal (Manutenção)
Passagem de cabos para comunicação entre fonte e robô.	Quantal (Manutenção)
Passagem de fibra ótica.	Quantal (Manutenção)
Passagem de tubos de refrigeração e gás de corte.	Quantal (Manutenção)
Efetuar ligação entre fonte de laser e controlador de robô.	InMast
Teste de potência a saída do cabeçal de soldadura.	Trumpf

Teste dos sinais a enviar para a fonte de laser e sinais a receber.	InMast + Trumpf
Efetuar Ensaio de soldadura e teste de todos os equipamentos em funcionamento simultâneo.	Quantal (Manutenção) + Trumpf + InMast
Fase 6	
Homologação do equipamento pela entidade responsável.	Quantal (Manutenção)
Criação do manual geral da máquina contendo toda a informação sobre o equipamento, entre os quais manutenção do equipamentos, como agir em caso de emergência entre outros.	EQS
Fase 7	
Efetuar soldadura de amostras, serão tomados por base parâmetros de uma aplicação semelhante.	Quantal (Manutenção)
Criação de tabelas com os parâmetros para os materiais que estão previstos soldar.	Quantal (Manutenção)

4.1 Análise e verificação do estado do robô

A primeira fase deste projeto consiste na análise do estado de funcionamento do robô e na verificação da sua capacidade de manter os parâmetros segundo os quais foi projetado.

Uma vez que este tipo de robô não é o mais indicado para a aplicação que se pretende implementar, o primeiro passo consistiu na análise do robô. Os valores de repetibilidade apresentados pelo fabricante estão muito próximos do limite máximo exigido para efetuar a soldadura laser. Adicionalmente, o robô já tem alguma idade e esteve sempre associado a processos com cargas elevadas.

Todos os ensaios foram realizados com uma carga acoplada à cabeça com aproximadamente 100Kg, de forma a garantir que os ensaios possam refletir o verdadeiro estado do robô, já que a carga máxima com que este modelo pode trabalhar é de 120Kg.

O ensaio de repetibilidade foi efetuado em dois pontos opostos existindo uma variação de 180° do eixo J1 entre os dois pontos. Estes dois pontos auxiliaram a verificar se com a variação do centro de massa do robô os diferentes eixos do robô não tinham folgas elevadas que pudessem refletir na sua capacidade de repetição. Contudo, atendendo à falta de aparelhos de medição, a capacidade de repetibilidade do robô apenas foi medida segundo

o plano XZ. O ensaio de repetibilidade foi efetuado a velocidade de avanço máxima, tendo o valor máximo registado sido aproximadamente $\pm 0.03\text{mm}$ (**Figura 4.2**).



Figura 4.2 Valor máximo encontrado na variação entre ponto 1 (imagem esquerda) e ponto 2 (lado direito).

Foi também realizado um segundo ensaio com o objetivo de analisar a capacidade do robô manter a estabilidade quando está a percorrer uma trajetória. Este ensaio, ao testar o comportamento dos eixos quando a trajetória apresenta uma variação direta de 90%, foi executado com o auxílio do comparador e de uma pedra de mármore retificada. O máximo da variação encontrado ao longo do deslocamento em linha reta foi de 0.21 mm. Após uma mudança brusca de direção, ocorreu uma variação brusca compreendida entre 0.1 e 0.25 mm (**Figura 4.3**).



Figura 4.3. Variações máximas encontradas ao longo da execução de uma trajetória. O máximo da variação ao longo do deslocamento em linha reta foi de 0.21 mm (imagem da esquerda). Perante uma mudança brusca de direção, ocorreu uma variação brusca entre 0.1 e 0.25 mm.

Após os testes de verificação do estado do robô terem sido bastante conclusivos quanto ao bom estado dos eixos do robô, todos os componentes que eram de utilização exclusiva da aplicação anterior foram removidos e colocados de parte. A estrutura principal do robô e quadro elétrico foram desmontadas para trabalhos posteriores de pintura e manutenção (Figura 4.4).



Figura 4.4 Remoção de toda a cablagem e canhas.

4.2 Criação da cabine para proteção do robô

Após a realização de todos os ensaios e testes para averiguar a capacidade do robô para executar o novo processo de fabrico pretendido, foi possível concluir que este é ainda capaz de manter todos os parâmetros apresentados pelo fabricante. Assim sendo, foi iniciada uma segunda fase, a qual se desenvolveu em torno do desenho e estudo de todos os componentes necessários para assegurar a proteção e interligação de todos os componentes a ser implementados.

A criação de uma cabine de proteção para o robô em torno de toda a área de trabalho do mesmo revelou-se da máxima importância para garantir uma proteção altamente eficaz, limitando o risco de fuga de radiação para o exterior da cabine e, desta forma, eliminando o risco para a saúde dos vários colaboradores que trabalham em torno do equipamento. A implementação deste método de proteção permite ao equipamento ser classificado como classe 1.

Esta fase foi acompanhada por um técnico da *Trumpf*, responsável pela orientação em vários passos importantes relativos à construção e à seleção dos materiais a utilizar na cabine de proteção. Adicionalmente, o auxílio de um técnico da *InMast* e de um comercial da *IGUS* foram igualmente de grande importância. O primeiro, na definição das dimensões gerais e considerações a ter em consideração nos componentes relacionados com a fixação dos sistemas de segurança e o segundo na implementação de sistemas articulados para proteção da fibra ótica e elementos de comunicação com o cabeçal da soldadura.

Durante a execução do projeto para a construção da cabine de proteção do robô, a avaliação de todas as dimensões atribuídas à estrutura geral da proteção teve em consideração a área de trabalho do robô, cujo raio é aproximadamente 3000 mm e a altura é 3000 mm. O valor da largura e do comprimento da cabine pode ser coincidente com o do raio, sendo possível, desta forma, garantir a segurança de todos os equipamentos acoplados à cabeça do robô. Relativamente ao valor a atribuir à altura da cabine de proteção, este pode ter uma variante, sendo possível obter uma área de trabalho situada abaixo do nível da base do robô, criando-se assim, uma base para elevar o robô e obter benefício de toda a área de trabalho admitida pelo robô (**Figura 4.4**). De acordo com o já explicado, as dimensões gerais atribuídas à cabine foram de 6000x6000x4000 mm.

O estudo e desenho da estrutura foram da responsabilidade do departamento de engenharia.

S-420i F

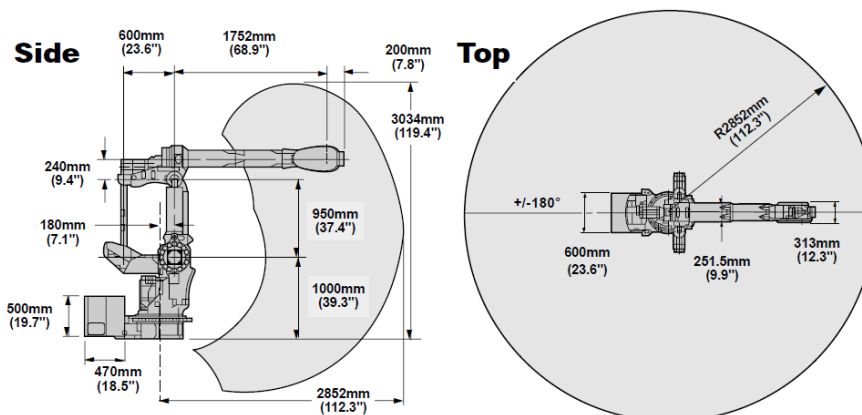
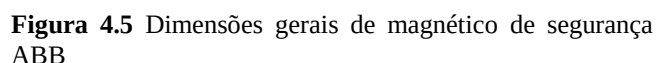


Figura 4.4 Área de trabalho do robô Fanuc 420 iF, esquerda vista lateral e direita vista de topo.

A escolha dos sistemas de segurança a implementar teve em consideração primeira e principalmente as normas de segurança associadas a esta classe de equipamento, mas também a função pretendida para estes sistemas. Para a concretização deste processo, foi

A escolha do sistema de segurança e os seus componentes será explicado de forma mais pormenorizada durante a fase 4 deste projeto. A sua referência deve-se aos trabalhos de desenho dos sistemas de fixação dos mesmos (**figura 4.5**).



Após todas as calhas de transporte da fibra e da restante cablagem estarem desenhados entre a fonte laser e a cabine, encontramos o maior desafio da fase de projeto e desenho: como transportar a fibra até ao cabeçal de soldadura. Atendendo a isto, foi solicitado o auxílio da *IGUS* para estudar uma possível aplicação que solucionasse o nosso problema. A primeira solução encontrada consistia num sistema articulado que iria trabalhar em

simultâneo com toda a estrutura do robô. Contudo, a problemática do raio de curvatura mínimo admitido pela fibra voltou a surgir.

Para ser possível aplicar um sistema articulado semelhante ao apresentado na figura 4.7, seria necessário fazer inúmeras restrições em todos os eixos do robô. Esta solução, por garantir uma boa proteção contra toda a cablagem que passasse no seu interior e garantir uma proteção acrescida contra movimentos mecânicos como tração e torção, foi estudada sob diferentes perspectivas. A grande problemática desta solução surgiu ao nível do eixo J1, ou seja, todas as variantes da canha aplicada que permitissem uma rotação do robô de aproximadamente 270°, apenas permitiam um raio máximo de 140 mm. Assim sendo, esta proposta foi excluída.

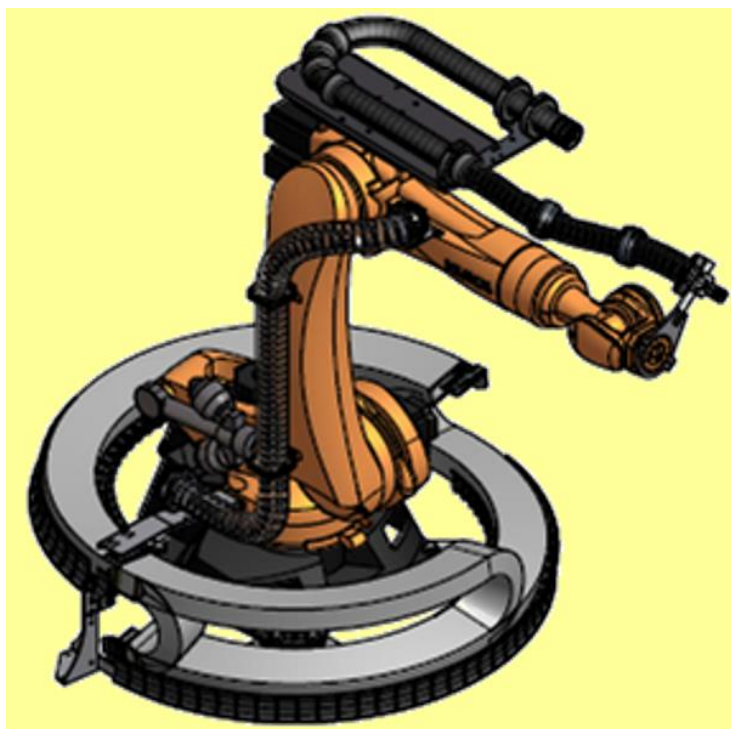


Figura 4.7 Sistema articulado proposto pela IGUS

A solução encontrada passou por se revelar muito simples: a fibra irá entrar pelo teto e será guiada até ao cabeçal através de uma calha articulada *Igus Triflex* (**Figura 4.8**). Este tipo de canha articulada é construído através da repetição de um elemento (**Figura 4.9, direita**). A forma de conexão entre os elementos limita o ângulo máximo de curvatura e torção.

Os pontos principais de fixação da canha são o teto e as costas do robô. A canha articulada deverá ser deixada com a folga necessária para que o robô possa efetuar todos os movimentos sem restrições. Com isto surgiu um problema: o comprimento que era

necessário deixar de canha entrava na área de trabalho quando o robô efetuava movimentos perto da repouso. Para evitar que entrasse em contacto com o robô e até mesmo com as mesas de trabalho foi colocada a possibilidade de implementação de um esticador. Este esticador acompanharia todos os movimentos do robô e, através de um ponto de fixação intermédio, e com o auxílio de um acessório (**Figura 4.9, esquerda**), a calha conseguiria então manter-se acima da área de trabalho.

Figura 4.8 Calha articulada *IGUS TRIFLEX*



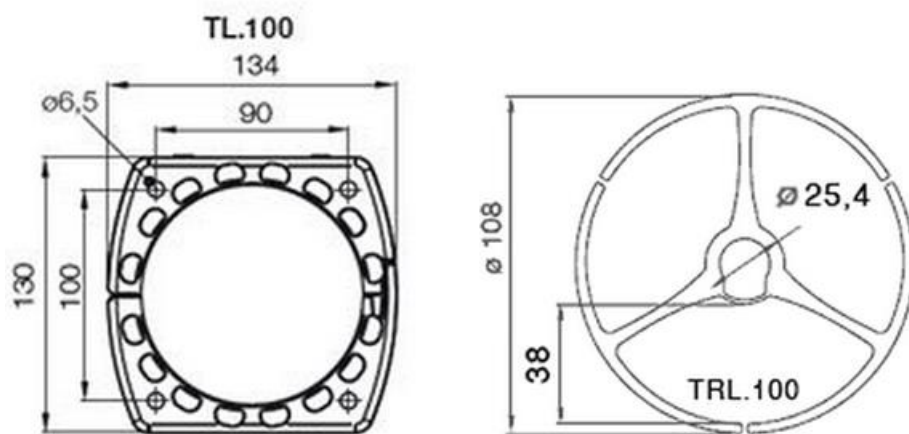


Figura 4.9 Dimensões gerais de acessório de fixação da calha (esquerda) e elemento da calha (direita)

A conclusão do desenho da estrutura ficou em torno do estudo de uma forma de passar toda a cablagem interna, interligando todos os sistemas secundários que serão implementados, tais como sistemas de segurança, iluminação do ar comprimido, entre outros. Com este intuito, decidiu-se implementar uma canha acima do nível das portas, a qual seria interligada com os pilares da estrutura situados nos quatro cantos.

4.3 Construção e montagem da cabine e todos os sistemas adjacentes

Todos os componentes metálicos que constituem a cabine foram produzidos internamente: desde o processo de corte, quinagem e soldadura. Apenas na parte final de pintura é que foi necessário recorrer a subcontratação (**Figuras 4.10 e 4.11**).



Figura 4.10 Chapas após terem saído do corte laser 2D, serão enviadas para a quinagem.



Figura 4.11 Processo de soldadura das laterais após estas terem passado pela quinagem.

Atendendo à visível deterioração da pintura do robô e das mesas de soldadura, decidiu-se pintar todos os equipamentos adjacentes ao robô

Devido a detioração da pintura do robô e das messas de soldadura, com isto foi tomada a decisão de pintar todos os equipamentos adjacentes ao robô, bem como o próprio robô (**Figuras 4.12 e 4.13**).



Figura 4.12 Pintura do robô, processo de preparação para a pintura



Figura 4.13 Pintura de mesa de soldadura

Após a conclusão da pintura e de todos os elementos extras como aninhas, porcas, parafusos, entre outros, estarem reunidos, deu-se início à fase de montagem. Esta fase consistiu primeiramente no posicionamento do robô, passo fundamental uma vez que a montagem da cabine é realizada em função da posição do robô, o qual terá que ficar centrado (**Figuras 4.14, 4.15 e 4.16**).

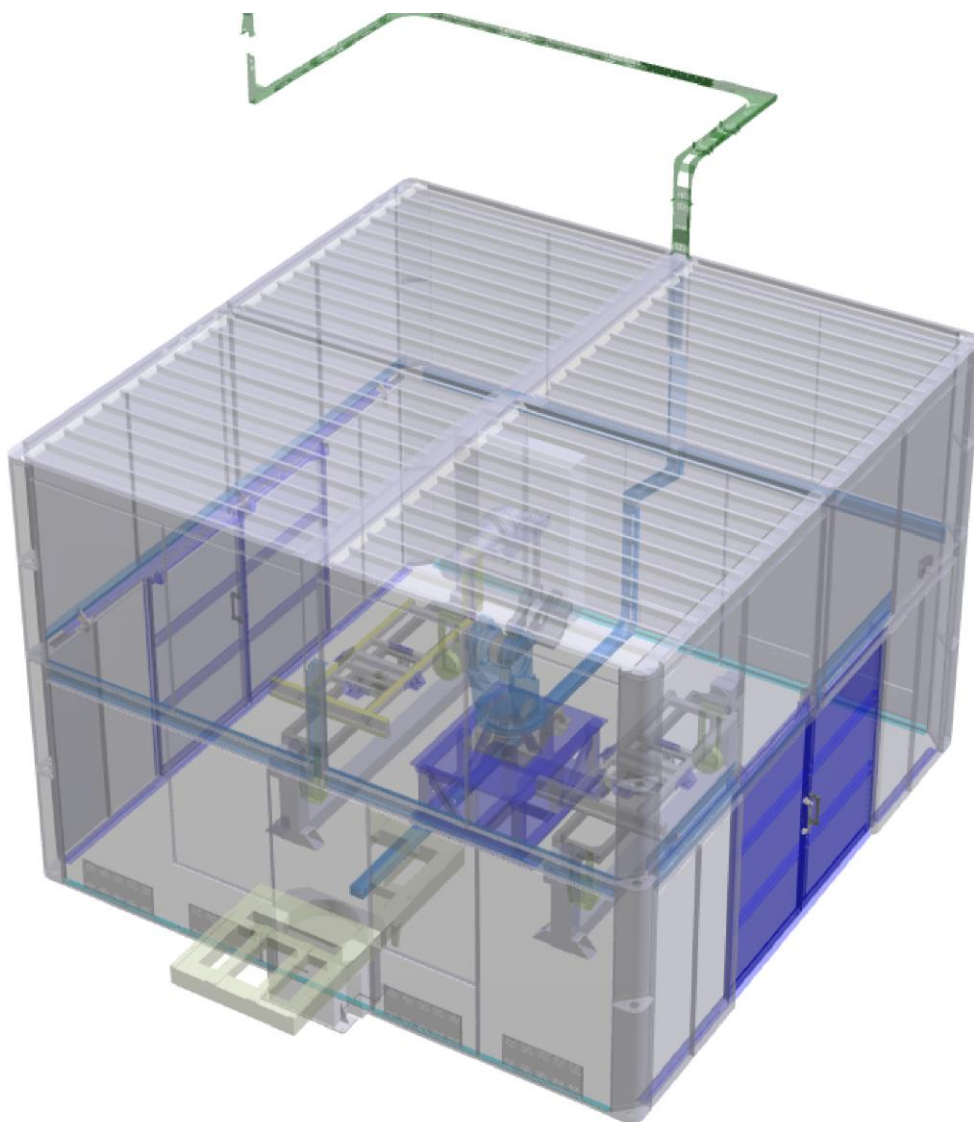


Figura 4.14 Imagem geral da cabine



Figura 4.15 início da fase da montagem



Figura 4.16 Finalização dos trabalhos de montagem

4.4 Implementação dos sistemas segurança

A quarta fase deste projeto e a mais importante é a implementação dos sistemas de segurança. Apesar dos sistemas a implementar serem bastante simples, a segurança de todo o sistema é o fator que maior peso representa na aprovação do equipamento por uma identidade certificadora, uma vez que é fundamental para garantir a segurança do operador do equipamento e de todas as pessoas que o rodeiam e trabalham na área em que este está implementado. Assim sendo, é necessário garantir que o sistema é fiável e robusto.

O principal objetivo do sistema de segurança a implementar será garantir que a fonte de laser recebe, através de duas linhas seguras, a indicação de que o laser pode ser ligado. Contudo, isto apenas poderá ser possível se a cabine de proteção estiver vazia e com as portas trancadas. Para garantir que a informação que chega a fonte laser é 100% fiável foram implementados vários sistemas de segurança que irão funcionar como um todo. Por exemplo, em cada uma das portas foi implementado um magnético para garantir a posição das mesmas e ainda dar segurança adicional caso o trinco ou o batente se danifiquem. Na imagem (**Figura 4.17**) que se segue podemos ver o esquema interno do magnético e do trinco elétrico utilizado para a segurança aplicada nas portas.

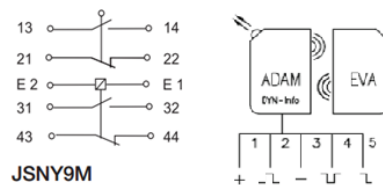


Figura 4.17 Esquema interno do trinco elétrico (esquerda), esquema interno dos magnéticos (direita)

Para garantir que o espaço se encontra vazio no momento em que é dada a indicação para que ocorra o encerramento das portas, foi implementado um botão de pressão no interior e outro no exterior das portas. O botão interior deverá ser pressionado quando o operador está a sair do interior da cabine. O operador tem 10 segundo para pressionar o segundo botão (o botão exterior). Após este último botão ser pressionado, as portas encerram automaticamente. Desta forma, é garantido que ninguém entra na cabine durante o tempo após o botão ser pressionado.

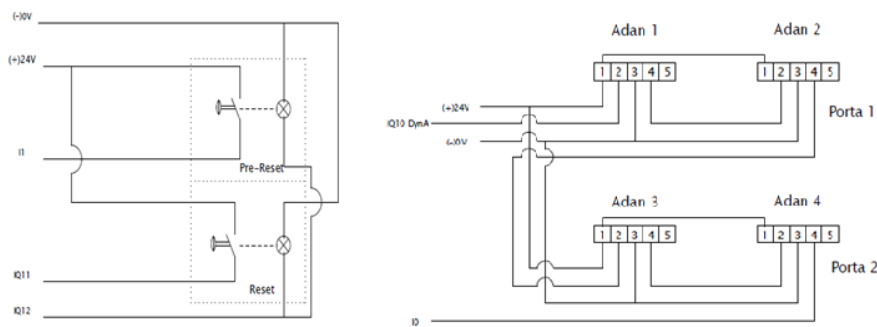


Figura 4.18 Esquema de ligação dos magnéticos de posicionamento das portas (lado direito), botão de reset e pre-reset

Todos os sensores de segurança, betoneiras de emergência e sistema de *Reset* irão ser geridos por um autómato *ABB Pluto S20*. O autómato foi selecionado em função do número de entradas e saídas necessárias para se efetuar a gestão correta do sistema (**Figura 4.19**).

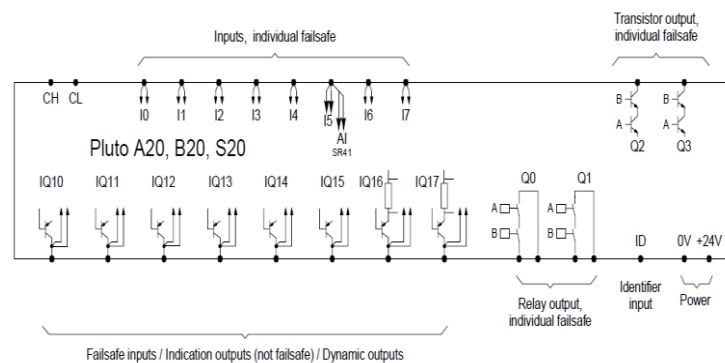


Figura 4.19 Esquema de contactos do autómato ABB Pluto S20

O autômato, por defeito, não está configurado. Este tem que ser configurado de acordo com a aplicação que se pretende implementar. Na figura 4.20 podemos observar parte do diagrama de *ladder* que foi carregado para o autômato. O diagrama começa por receber o sinal do botão de pré-reset após pressionado. Existe um intervalo de 10 segundos para pressionar o botão de *reset*. Caso as portas não estejam fechadas e todos os sensores da mesma não estejam a emitir o devido sinal, todo o ciclo terá de ser reiniciado, e o diagrama de *ladder* continua para a verificação de emergências entre outros sinais. A informação à fonte de laser é transmitida através de duas saídas seguras e apenas ocorre quando tudo está confirmado. No entanto, uma vez que o autômato apenas apresenta duas saídas seguras e uma delas é utilizada para dar indicação ao robô de que a cabina já se encontra encerrada, foi necessário implementar um rele de segurança auxiliar que, através de apenas uma saída segura do autômato, envia dois sinais para a fonte laser.

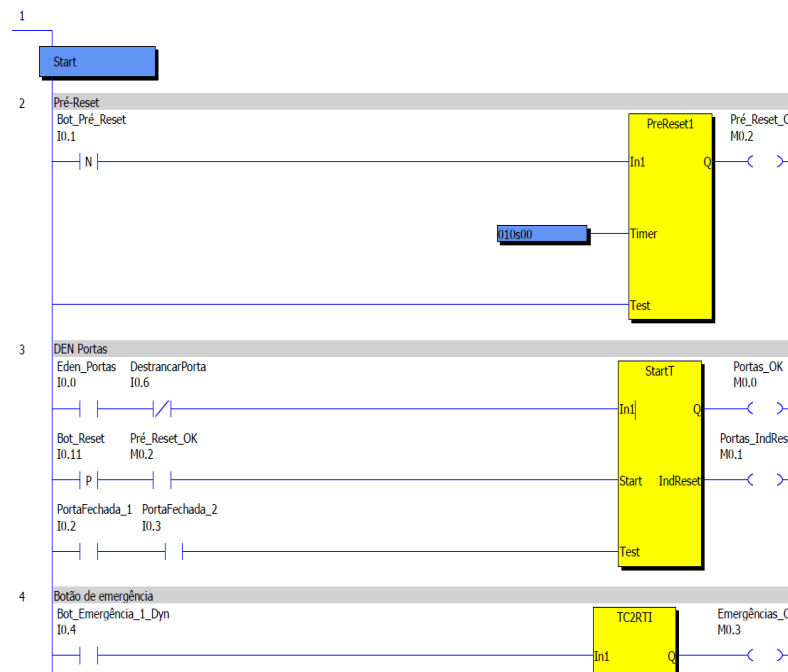


Figura 4.20 Diagrama de *ladder* aplicado no autômato de segurança

A fase 4 termina, no caso do nosso projeto, sem apresentar nenhuma dificuldade uma vez que, tal como pudemos confirmar, todo o sistema é bastante simples e de fácil interpretação. A principal preocupação assentou em garantir que o sistema seria capaz de proteger o operador de qualquer perigo inerente à exposição da radiação laser e aos movimentos mecânicos do robô e mesa de apoio da soldadura. O sistema foi testado na sua

totalidade inúmeras vezes e submetido a diferentes situações para averiguar a sua capacidade de resposta adequada perante qualquer situação.

4.5 Implementação dos sistemas de comunicação entre fonte laser e robô

Após a conclusão da implementação e teste da fase 4 referente à segurança, a fase 5, fase predominante de todo o projeto, teve início.

A comunicação entre os dois equipamentos principais desta adaptação, o *Robot Fanuc 420 iF* e a fonte laser *Trudisk*, tornou-se num desafio, uma vez que o robô teria que ser capaz de enviar vários sinais à fonte de laser e, atendendo à idade do robô, este apenas possui um protocolo de comunicação IO, isto é, é gerido por um conjunto de sinais de entrada e saída que sucedem sequencialmente (uns após os outros). Como consequência, a opção da integração seguindo apenas este caminho foi a estratégia.

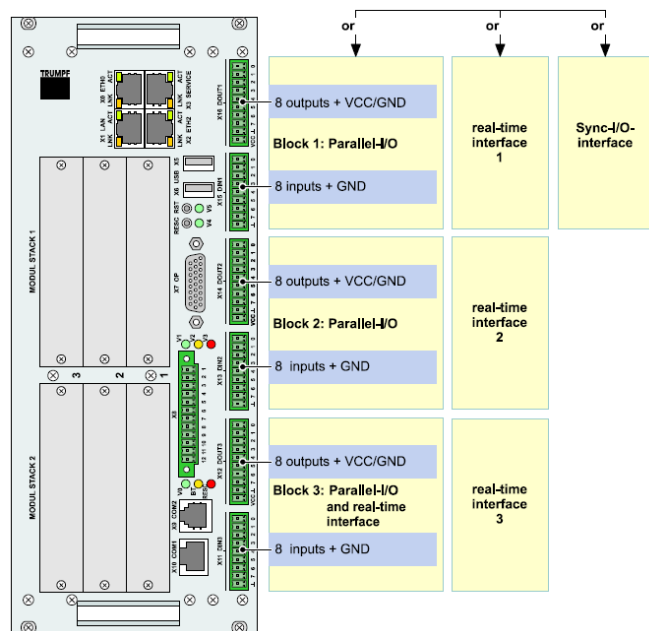


Figura 4.21 Esquema de conectores presente na fonte laser

Na figura 4.21 podemos observar o esquema de conectores presente na fonte de laser que nos permitirá ligar toda a cablagem necessária para efetuar a comunicação com a fonte. Assim sendo, temos os conectores X11, X13 e X15, os quais apenas permitem a ligação de *inputs*, e os conectores X12, X14 e X16 que contêm os *outputs*. Surge então a necessidade

de definir quais os sinais de entrada e saída necessários para garantir uma correta comunicação com a fonte laser.

Tendo por base o diagrama presente na figura 4.22, o qual traduz uma aplicação de soldadura dinâmica em que definimos quando temos raio *on* e *off* através de um impulso associado ao *Pstart_static* e ao *Prog_stop*.

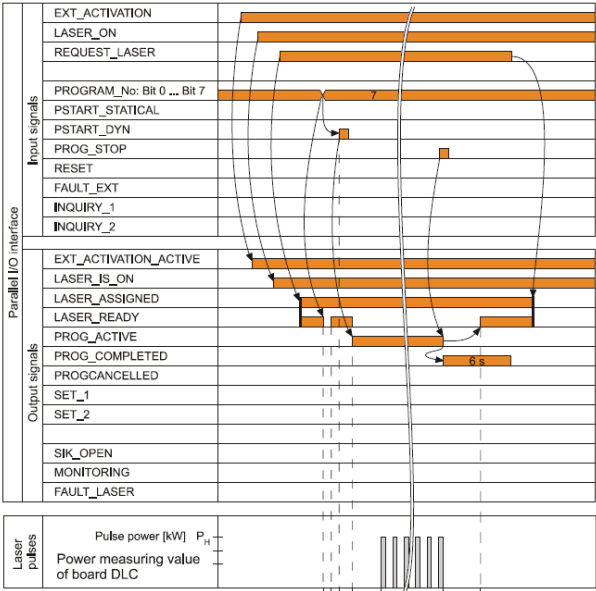


Figura 4.22 Diagrama temporal das entradas e saídas necessárias para comunicar corretamente com fonte laser

Após efetuado o levantamento de todos os sinais necessários, procedemos à análise dos conectores da fonte de laser com o intuito de avaliar quais os que seriam necessários e, conseqüentemente, obter o número de condutores necessários para efetuar a interligação.

Os sinais que necessitam de ser transportados até ao robô e, a partir deste, novamente até à fonte, provêm de diferentes conectores, em virtude da placa de conectores da fonte de laser já se encontrar pré-configurada.

Na tabela 4.2 é possível visualizar alguns dos sinais necessários e os respectivos conectores. Uma vez que cada conetor apresenta a sua própria tensão de referência e ligação, é necessário um elevado número de condutores para o efeito.

Tabela 4.2 – Principais entradas/saídas e respetivo conector

Entrada/Saída	Conector
<i>Ext_activation</i>	X15
<i>Laser_On</i>	X15

<i>Request_laser</i>	X13
<i>Program No. Bit</i> <i>0...4</i>	X15/X13
<i>Psart_Dyn</i>	X15
<i>Prog_stop</i>	X15
<i>Reset</i>	X15
<i>Ext_activation_acive</i>	X14
<i>Laser_is_on</i>	X14
<i>Prog_active</i>	X16

Os trabalhos de campo da fase 5 iniciaram-se pela colocação de toda a cablagem necessário para o efeito, bem como do sistema de refrigeração entre a fonte laser e o cabeçal de soldadura. Adicionalmente, foi também colocado o ar comprimido para refrigeração do vidro de proteção do cabeçal, o comando e a potência do ajuste do ponto local, entre outros.

Desde a fonte laser até à cabine de soldadura, toda a cablagem foi guiada por um caminho de cabos. Após alcançar a cabine, os elementos que seguiram diretamente para o cabeçal de soldadura, como por exemplo a fibra ótica, foram guiados por uma canha articulada como ilustrado na Figura 4.25 (lado direito). Do lado esquerdo da figura 4.25 é possível observar alguns dos elementos que irão ser ligados ao cabeçal de soldadura, como por exmplo, tubos de refrigeração, sistema de monitorização, cabo de controlo e potência do sistema de ajuste focal.



Figura 4.23 Cabelagem para o cabeçal de soldadura, elementos que iram interligar no cabeçal de soldadura (lado esquerdo), sistema implementado para girar e proteger cablagem que ira ligar ao cabeçal de soldura (lado direito).

Com a conclusão da implementação da cablagem, efetuou-se a ligação de todos os cabos necessários para a realização de um teste de potência à fibra ótica, com o objetivo de averiguar a sua integridade e funcionamento. Paralelamente a estes testes de avaliação da fibra ótica, foram efetuadas as ligações de todos os sistemas necessários para a comunicação do robô com a fonte laser, tendo sido acrescentadas novas cartas analógicas ao robô. Esta adição permitiu aumentar o número de saídas de sinais disponíveis, bem como ampliar os circuitos elétricos do robô.

Ao aproximarmo-nos da fase final de avaliação dos sinais, em que todos os sinais à saída do robô que deveriam estar presentes na fonte de laser e vice-versa foram testados um por um, surgiu um problema. A entrada de *laser_on* no conector X15 que se encontrava em utilização pelo equipamento principal de corte laser 2D não permitia qualquer reconfiguração ou troca para outro pino de reserva, ou seja, a sequência de sinais necessária para obter um funcionamento correto da comunicação com a fonte laser estava impedida devido à impossibilidade da fonte aceitar a entrada do sinal *Laser_on*. Este fenómeno condicionou a concretização da fase 5 do projeto, obrigando a uma paragem para que se pudesse repensar todo o sistema de comunicação. Após vários estudos de todo o sistema de comunicação e partilha de conhecimentos com o fabricante do equipamento, concluiu-se que a comunicação através das portas *Parallel IO* não seria possível. Assim sendo, impôs-se a necessidade de realizar uma adaptação em todo o sistema de comunicação do robô que permitiu a comunicação com a fonte laser em tempo real e possibilitou a entrada num nova fase do projeto: fase 6.

Não obstante, neste momento o novo sistema ainda não se encontra em funcionamento, consequência da falta de confirmações e detalhes que não foram ainda devidamente esclarecidos pelo fabricante.

4.6 Homologação do equipamento

A fase 6 do processo de adaptação do robô está diretamente relacionada com a obtenção da marcação *CE* do conjunto final criado pela fonte laser e robô, sendo o equipamento classificado como Classe 4. Esta classificação deve-se às propriedades do raio laser proveniente da fonte. A maioria das questões de segurança giram em torno da classe do laser e da obrigação de tornar o equipamento num equipamento classe 1 quando se encontra em funcionamento.

A metodologia que será aplicada até ao equipamento se encontrar devidamente certificado e aplicada a marcação *CE* como sendo um equipamento que cumpre as normas a que se encontra sujeito passa pelos seguintes pontos:

- Levantamento normativo;

- Análise de riscos e emissão de listas de verificação que garantem a adequação do equipamento com as normas europeias aplicáveis;

- Avaliação da proteção da cabine de proteção do laser;

- Ensaio de potência sonora e emissão do respetivo certificado;

- Elaboração do manual de instruções;

- Emissão do modelo de declaração *CE* de conformidade.

- Homologação do equipamento pela entidade responsável

Após a análise de todos os pontos e qual o papel a desempenhar por cada umas das entidades, ficou ao cargo da Quantal a criação do manual do equipamento e a instrução de ligar e desligar o equipamento.

A criação do manual do equipamento ficou dividida em manual do operador e esquemas dos circuitos do equipamento entre os quais elétrico, pneumático e hidráulico. Para a criação do manual foi efetuado um levantamento e compilação da informação existente referente a fonte laser e ao robô, tendo sido acrescentado um novo capítulo referente à cabine e aos novos sistemas de comando e como os utilizar. Quanto a planos de manutenção e informações gerais apenas foi acrescentado um novo plano referente à cabine e criado um mapa de manutenção geral

4.7 Criação de parâmetros de soldadura

A sétima e última fase deste trabalho girará em torno da criação de parâmetros de soldadura. Atendendo ao fato de ser necessária a aprovação de todo o equipamento e a atribuição da marcação *CE* para iniciar esta fase, os quais não existem ainda, esta fase não foi iniciada.

Para a criação dos parâmetros de soldadura de forma viável, será necessário ter todo o sistema de comunicação com a fonte laser completamente operacional. Neste momento apenas é possível soldar em modo manual, ou seja, desde a função ligar/desligar o laser à regulação de potência. Isto leva a que, mesmo que todo equipamento esteja devidamente aprovado e conforme as normas para este tipo de aplicação, não seja possível avançar para a fase 7 desde projeto, já que ainda não temos um controlo completo sobre a fonte laser.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Quanto a soldadura laser posso concluir que é uma área que já se encontra no mercado a algum tempo, mas sem grande sucesso isso devido aos custos dos equipamentos e falta de confirmação da sua qualidade. Nos últimos anos este tipo de processo de fabrico tem crescido, isto devido ao aparecimento dos laser de comprimento de onda 1064nm o que tornou possível conduzir por fibra ótica e de alta potência (superior a 3000W), o fato de o laser poder ser conduzido por fibra ótica levou a adaptação da soldadura laser com a robótica tornando-a muito versátil. Contudo o preço elevado desta tecnologia continua a ser o grande obstáculo o que leva a que muitas empresas como o caso da Quantal invistam em soluções internas em que tiram proveito das capacidades dos sistema de produção que possuem, como a Quantal existem outras empresas em Portugal a investir centenas de milhares de euros em investigação e desenvolvimento de equipamentos associados a tecnologia laser, não só soldadura mas também corte 2D e 3D.

Todo o trabalho realizado em torno do projeto da adaptação do robô de soldadura juntamente com o trabalho de pesquisa levou a concluir que todos os projetos associados a tecnologia laser estão a crescer de forma exponencial em qualidade e tipo aplicações.

6 Referências

- TI Laser machining solid state lasers, Trumpf Documentation
- TI Laser processing CO2 Lasers, Trumpf Documentation
- Tru Disk 3001 Laser interface, Trumpf Documentation
- S 420i Mechanical Unit Maintenance, Fanuc Documentation
- R J2 HandlingTool Setup, Fanuc Documentation