

Conversão de um processo de soldadura manual em soldadura automática

João Francisco de Oliveira Almeida

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Professora Doutora Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte

Coorientador na FEUP: Engenheiro Miguel Augusto Vigário de Figueiredo

Orientador na Quantal S.A.: Engenheiro Alfredo Barbosa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro 2018

Resumo

Este estudo consiste numa avaliação experimental e económica de dois processos de soldadura da empresa Quantal S.A., culminando numa avaliação da rentabilidade do processo em função da qualidade de soldadura obtida. Um dos processos trata-se de soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*), executada manualmente por um operador, e o outro consiste em soldadura laser, executado através de um braço robótico de 6 eixos. A comparação foi realizada através do estudo de dois conjuntos de peças. Um conjunto em aço inoxidável com peças de grandes dimensões e outro conjunto de aço carbono com peças de pequenas dimensões.

O estudo, de carácter experimental e económico, levou à confirmação de que se torna rentável a automatização do processo de soldadura TIG manual, passando os dois conjuntos de peças a soldar para o robot de soldadura laser. Esta rentabilidade revelou-se tanto a nível de qualidade de soldadura, como de preço por unidade produzida. A qualidade de soldadura foi avaliada através de ensaios de dobragem das juntas de soldadura e de ensaios metalográficos do interior dos cordões de soldadura. Destes ensaios concluiu-se que as juntas soldadas suportam cargas mais elevadas quando sujeitas a soldadura laser e que a penetração obtida neste caso é também mais elevada. A análise económica permitiu concluir que a automatização do processo se torna mais rentável a partir da produção de 204 unidades do conjunto em aço inoxidável e de 185 unidades do conjunto em aço carbono.

Foi proposto pela secção de Engenharia/I&D da Quantal S.A. que o estado da arte desta dissertação tivesse especial incidência sobre o princípio e funcionamento do laser e da respetiva tecnologia que lhe está associada na indústria. Levada a cabo pela falta de informação existente no meio empresarial em questão, esta pesquisa bibliográfica terá utilidade no futuro como método de transmitir conhecimento a novos colaboradores e estagiários da Quantal S.A. acerca da tecnologia presente nesta empresa, bem como o funcionamento, de forma generalizada, da mesma.

O projeto foi desenvolvido no âmbito de dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em parceria com a empresa Quantal S.A.

Conversion of a manual welding process into automatic welding

Abstract

This study comprises an experimental and economic evaluation of two welding processes into the company Quantal S.A., culminating in evaluation of the profitability function of the welding quality obtained. One of the processes is TIG (Tungsten Inert Gas) welding, manually performed by a professional welder, and the other consists on laser welding, executed through a 6-axis robotic arm. The comparison was made through the study of two sets of parts. A stainless-steel set with large parts and another set of low alloy carbon steel with small parts.

The experimental and economical study led to the confirmation that the automatization of the TIG welding process becomes profitable, passing the assemblies to be welded on the laser welding robot. This profitability was revealed both in the welding quality and in the price per unit produced. The weld quality was evaluated through compression tests of the weld joints and metallographic tests on the inside of the weld beads. From these tests it was concluded that the welded joints support higher loads when subjected to laser welding and that the penetration obtained in this case is also higher. The economic analysis allowed to conclude that the automatization of the process makes it more profitable from the production of 204 units of the stainless-steel assembly and 185 units of the carbon steel assembly.

It was proposed by the Engineering/R&D section of Quantal S.A. that the state of the art of this thesis had special attention on the working physical principle of the laser and its associated technology regarding industry. Carried out by the lack of information in the business environment in question, this bibliographic research will be useful in the future to inform the new employees and trainees of Quantal S.A. about the technology present in this company, as well as the general operation of the same.

The project was developed within the scope of the dissertation to obtain a Master's degree in Mechanical Engineering by the Faculty of Engineering of the University of Porto, in partnership with the company Quantal S.A.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à Quantal S.A. por me ter proporcionado a possibilidade de realizar a dissertação de mestrado em ambiente empresarial. Um agradecimento especial ao colaborador Rui Carvalho do setor da soldadura, por toda a dedicação, empenho e interesse que demonstrou em ajudar na obtenção de amostras.

A toda a equipa de Engenharia da Quantal S.A., agradeço o apoio e ajuda na realização de projetos para a empresa e a forma como me acolheram, facilitando a integração em ambiente empresarial.

Agradeço também a todos os colaboradores da Quantal S.A., dos diversos setores, que contribuíram para este trabalho, sem os quais a conclusão não seria possível.

Agradeço à Professora Teresa Duarte pela orientação desta dissertação, disponibilidade demonstrada para esclarecimento de dúvidas, pelo acompanhamento e sugestões que contribuíram para uma significativa melhoria deste trabalho.

Ao Engenheiro Miguel Figueiredo, agradeço a partilha de conhecimento de carácter científico, especificamente ligado à área da soldadura, e a sugestão e orientação relativa à parte experimental e análise de resultados.

À minha família por me possibilitar a obtenção de um grau académico de nível superior, por todo o apoio demonstrado e aconselhamento ao longo do meu percurso enquanto estudante. Um agradecimento especial à minha irmã, Carolina Almeida, por ser a pessoa que sempre me apoiou em todas as decisões que tomei ao longo do meu percurso académico.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	Quantal S.A. e Quantal Group	1
1.3	Objetivos	3
1.4	Metodologia	3
1.5	Estrutura da dissertação.....	4
2	Revisão bibliográfica	5
2.1	Soldadura TIG	5
2.1.1	Enquadramento da soldadura TIG nos processos de soldadura.....	5
2.1.2	Princípio do processo de soldadura TIG	7
2.2	Enquadramento e princípio da emissão laser	9
2.2.1	Perspetiva histórica.....	9
2.2.2	Funcionamento do laser.....	11
2.2.3	Caraterísticas de um feixe laser	13
2.3	Tecnologia laser	16
2.3.1	Funções do laser na indústria	16
2.3.2	Classificação.....	17
2.3.3	Parâmetros caraterísticos da radiação laser	18
2.3.4	Tipos de laser.....	18
2.3.5	Tecnologia disponível na Quantal S.A.	27
2.4	Soldadura Laser.....	27
2.4.1	Funcionamento	27
2.4.2	Soldadura laser como processo de fabrico	28
2.4.3	Gases de proteção e método de aplicação	31
2.4.4	Efeito das propriedades dos materiais	32
2.4.5	Ocupação de mercado a nível industrial.....	35
3	Projeto, Metodologia e Obtenção de Amostras	37
3.1	Seleção do projeto	37
3.1.1	Peças consideradas e rejeitadas	38
3.1.2	Peças consideradas e aprovadas	41
3.2	Materiais utilizados	43
3.3	Equipamento utilizado.....	44
3.3.1	Soldadura TIG	44
3.3.2	Soldadura laser	46
3.3.3	Corte das amostras soldadas.....	49
3.4	Plano experimental.....	50
3.4.1	Soldadura TIG manual	52
3.4.2	Projeto de gabarits	53
3.4.3	Soldadura laser	57
3.4.4	Corte de provetes e ensaios a realizar.....	58
4	Descrição dos Ensaios, Resultados e Discussão	61
4.1	Ensaios de dobragem de cordões de soldadura	61
4.1.1	Resultados do conjunto 0657664 para soldadura TIG.....	63
4.1.2	Resultados do conjunto 0657664 para soldadura laser.....	64
4.1.3	Resultados do conjunto 0657669/670 para soldadura TIG	66
4.1.4	Resultados do conjunto 0657669/670 para soldadura laser.....	68

4.2	Ensaios metalográficos.....	71
4.2.1	Análise das amostras 0657664 por soldadura TIG	71
4.2.2	Análise das amostras 0657664 por soldadura laser	73
4.2.3	Análise das amostras 0657669/670 por soldadura TIG.....	76
4.2.4	Análise das amostras 0657669/670 por soldadura laser	78
5	Análise Económica	81
5.1	Análise económica para soldadura TIG	81
5.2	Análise económica para soldadura laser	83
5.3	Análise económica comparativa entre soldadura TIG e soldadura laser.....	86
6	Conclusões e sugestões de trabalhos futuros	91
6.1	Conclusões	91
6.2	Trabalhos futuros	92
	Referências	94
	ANEXO A: Desenhos de conjunto das peças.....	97
	ANEXO B: Desenhos de conjuntos dos gabarits de soldadura laser	104
	ANEXO C: Desenhos de conjunto de elementos acessórios.....	107

Siglas

FEUP “Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto”

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

LOSER “*light oscillation by stimulated emission of radiation*”

MASER “*microwave amplification by stimulated emission of radiation*”

Nd-YAG “*neodymium-doped yttrium aluminum garnet*”

TEM “*transverse electric magnetic*”

TIG “*tungsten inert gas*”

Yb-YAG “*ytterbium-doped yttrium aluminum garnet*”

ZAC “zona afetada pelo calor” (HAZ “*heat affected zone*”)

Índice de Figuras

Figura 1 - Instalações da Quantal Group inauguradas em 2007 [1]	2
Figura 2 - Cronograma das tarefas realizadas durante o período de elaboração da dissertação.	4
Figura 3 – Projeção do arco elétrico sobre o material base [3]	6
Figura 4 – Representação esquemática do princípio do processo TIG [4].....	7
Figura 5 – Aspetto da soldadura TIG realizada com material de adição [5]	8
Figura 6 – Soldadura TIG utilizada para modificação da geometria de um tubo de escape automóvel [26].....	9
Figura 7 - Charles Townes, Jim Gordon e o laser de amónia [7]	9
Figura 8 - Theodore Maiman e o laser de rubi, uma das maiores invenções tecnológicas da década de 60 [8].....	10
Figura 9 – Aplicações da tecnologia laser no mercado mundial em 2016 (adaptado de [10]).	10
Figura 10 – Fenómenos de absorção estimulada (esquerda), absorção espontânea (centro) e emissão estimulada (direita) [27]	11
Figura 11 - Espetro eletromagnético (adaptado de [28]).....	12
Figura 12 - Elementos necessários à geração do feixe laser (adaptado de [29]).....	12
Figura 13 - Gráficos de comparação de comprimento de onda monocromático e policromático [16]	13
Figura 14 – Emissão de radiação sob a forma de luz em fonte normal e fonte laser [16].....	13
Figura 15 - Fonte de luz coerente e não coerente, representação das formas ondulatórias (adaptado de [16]).....	14
Figura 16 - Ângulo de divergência de um feixe laser [16].....	14
Figura 17 - Exemplos de modos transversos que podem ser utilizados para processamento de materiais [30].....	15
Figura 18 – <i>Laser metal deposition</i> , um dos processos de fabrico aditivo mais recentes da atualidade com recurso a tecnologia laser [31]	16
Figura 19 - Representação gráfica do modo contínuo (a) e diferentes modalidades de modo pulsado (b, c e d) [16].....	17
Figura 20 - Fonte laser com arrefecimento de fluxo axial rápido (adaptado de [22]).....	20
Figura 21 – Fonte laser tipo slab arrefecido por difusão (adaptado de [11]).....	21
Figura 22 – Fonte laser com arrefecimento transversal (adaptado de [32])	21
Figura 23- Constituição e funcionamento esquemático do laser He-Ne (adaptado de [33])....	22
Figura 24 - Laser de Nd:YAG com excitação por díodos (adaptado de [34]).....	22
Figura 25 - Fonte laser Yb-YAG com díodos de bombardeamento à direita [35]	23
Figura 26 – Interior do gerador laser de uma fonte laser de disco (adaptado de [19]).....	24
Figura 27 - Interior de um laser de fibra ótica (adaptado de [36])	24
Figura 28 – Faturação mundial da tecnologia laser com representação da ocupação percentual do laser de díodos (adaptado de [10]).....	25

Figura 29 – Princípio físico de funcionamento do laser de díodos (adaptado de [14]).....	26
Figura 30 - Soldadura laser do tipo <i>keyhole</i> (adaptado de [37]).....	28
Figura 31 – Gráfico de relacionamento da penetração com a velocidade de soldadura em função da potência do laser para aço inoxidável 304 (AISI 304) [23].....	29
Figura 32 – Representação do ponto focal e lentes do sistema ótico (adaptado de [11]).....	30
Figura 33 – Penetração de soldadura obtida utilizando hélio ou argon como gás de proteção, para um laser de potência 1,75 kW [23].....	32
Figura 34 – Aplicação usual do gás de proteção em soldadura laser, com ângulo inferior a 90° [38]	32
Figura 35 – Porosidade interior (esquerda) e exterior (direita) evidente num cordão de soldadura [39].....	33
Figura 36 - Fratura de cordão de soldadura pelo eixo central [25].....	34
Figura 37 – Aplicações da tecnologia laser para processamento de materiais em 2016 (adaptado de [10]).....	36
Figura 38 - Código de identificação de produtos na empresa Quantal S.A.....	37
Figura 39 - Referência 4449F36.....	38
Figura 40 - Referência 0657703	38
Figura 41 - Referência 0657696	39
Figura 42 - Referência 0657693 (108x40x20 mm)	39
Figura 43 – Referência 0657723 (108x40x20 mm).....	40
Figura 44 - Referências 4079C72 (360x360x1761 mm) e 4079C78 (760x760x1166).....	40
Figura 45 - Referência 4273994 (96x92,3x47,6 mm)	41
Figura 46 - Referências 0657669 e 0657670 (205x34x26 mm).....	42
Figura 47 - Referência 0657664 (1167x220x50 mm)	42
Figura 48 - Equipamentos de soldadura TIG utilizados para soldar amostras na empresa Quantal S.A. Fronius Transtig 1700 (esquerda), MagicWave 2200 (centro), MagicWave 3000 (direita)	45
Figura 49 – Sistema TruLaser Robot 5020 na empresa Quantal S.A.....	46
Figura 50 - Unidade de posicionamento TruLaser Robot 5020 com identificação dos eixos de movimentação.....	46
Figura 51 – Fonte laser HL 3306D (Trumpf) na Quantal S.A.	47
Figura 52 – Identificação dos eixos de rotação do robot Kuka KR30HA da empresa Quantal S.A.	48
Figura 53 - Representação das dimensões de movimentação (em mm) dos eixos do robot Kuka KR30HA	49
Figura 54 - Serrote Shark 330 HH, fabricante MEP, na empresa Quantal S.A. (esquerda); lubrificação durante operação de corte (direita)	50
Figura 55 - Diagrama do plano experimental.....	51
Figura 56 – Identificação do tipo de juntas de soldadura presentes nos conjuntos a soldar para obtenção de amostras (adaptado de [40])	51

Figura 57 - Soldadura TIG manual do conjunto 0657664.....	52
Figura 58 – Soldadura TIG manual dos conjuntos 0657669/0657670.....	53
Figura 59 - Operação de acabamento (rebarbagem) da peça 0657669A.....	53
Figura 60 – Gabarit de soldadura laser para referência 0657664.....	54
Figura 61 – Máscaras para soldadura laser 0657664.....	54
Figura 62 - Programação <i>online</i> do trajeto efetuado pelo robot de soldadura laser	55
Figura 63 - Gabarit de soldadura laser para os conjuntos 0657669 e 0657670.....	55
Figura 64 - Visualização detalhada do posicionador e do batente no gabarit de soldadura laser para a referência 0657669 e 0657670.....	56
Figura 65 - Posicionamento dos conjuntos 0657669 e 0657670 no mesmo gabarit de soldadura laser.....	56
Figura 66 - Posicionamento dos conjuntos de peças no respetivo gabarit de soldadura (0657664: esquerda; 0657670: direita).....	57
Figura 67 - Soldadura laser automática do conjunto 0657664 (a cor e desfocagem devem-se ao facto de a imagem ter sido captada através do vidro de proteção da cabine do robot).....	58
Figura 68 – Provetes cortados do conjunto 0657669/0657670 (esquerda) e do conjunto 0657664 (direita)	59
Figura 69 – Marcação das zonas de corte no conjunto 0657664.....	59
Figura 70 – Marcação das zonas de corte nos conjuntos 0657669 e 0657670.....	60
Figura 71 - Máquina servo-hidráulica MTS 810 com célula de carga de 10 kN (esquerda); <i>setup</i> utilizado nos ensaios(direita).....	62
Figura 72 - Dimensões, em milímetros, do comprimento de aba dos provetes dos conjuntos 0657664 (esquerda) e 0657669/670 (direita).....	62
Figura 73 – Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RC1, RC2 e RC3 para soldadura TIG do conjunto 0657664.....	63
Figura 74 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RT1, RT2 e RT3 para soldadura TIG do conjunto 0657664	64
Figura 75 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RC1, RC2 e RC3 para soldadura laser do conjunto 0657664.....	65
Figura 76 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RT1, RT2 e RT3 para soldadura laser do conjunto 0657664	66
Figura 77 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RC1, RC2 e RC3 para soldadura TIG do conjunto 0657669/670.....	67
Figura 78 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RT1, RT2 e RT3 para soldadura TIG do conjunto 0657669/670	68
Figura 79 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RC1, RC2 e RC3 para soldadura laser do conjunto 0657669/670.....	69
Figura 80 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RT1, RT2 e RT3 para soldadura laser do conjunto 0657669/670	70
Figura 81 – Tipo de resina e endurecedor para realizar a mistura (esquerda); vazamento da mistura para o suporte de solidificação (direita)	71

Figura 82 – Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MC1 (a), MC2 (b) e MC3 (c) do conjunto 0657664 por soldadura TIG de canto.....	72
Figura 83 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MT1 (a), MT2 (b) e MT3 (c) do conjunto 0657664 por soldadura TIG topo a topo	73
Figura 84 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MC1 (a), MC2 (b) e MC3 (c) do conjunto 0657664 por soldadura laser de canto.....	74
Figura 85 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MT1 (a), MT2 (b) e MT3 (c) do conjunto 0657664 por soldadura laser topo a topo	75
Figura 86 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MC1 (a), MC2 (b) e MC3 (c) do conjunto 0657669/670 por soldadura TIG de canto.....	76
Figura 87 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MT1 (a), MT2 (b) e MT3 (c) do conjunto 0657669/670 por soldadura TIG topo a topo	77
Figura 88 - Porosidade exterior nos cordões de soldadura do conjunto 0657669/670.....	78
Figura 89 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MC1 (a), MC2 (b) e MC3 (c) do conjunto 0657669/670 por soldadura laser de canto.....	79
Figura 90 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MT1 (a), MT2 (b) e MT3 (c) do conjunto 0657669/670 por soldadura laser topo a topo	80
Figura 91 – <i>Break-even analysis</i> e representação do <i>break-even point</i> para o conjunto 0657664.....	87
Figura 92 - <i>Break-even analysis</i> e representação do <i>break-even point</i> para o conjunto 0657669/670	88
Figura 93 - <i>Break-even analysis</i> e representação do <i>break-even point</i> para o conjunto 0657664, otimizado	89

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Classificação dos processos de soldadura de acordo com a fonte de calor utilizada [3]	6
Tabela 2 – Métodos de arrefecimento de fontes de laser CO ₂ e principais características [21]	20
Tabela 3 - Tecnologia laser existente na empresa Quantal S.A.	27
Tabela 4 - Primeiro potencial de ionização de gases de proteção e metais comuns em soldadura laser [18]	31
Tabela 5 - Características de diferentes metais utilizados em soldadura laser [23]	33
Tabela 6 - Suscetibilidade à fratura e composição de alguns materiais utilizados em soldadura laser [18]	34
Tabela 7 - Qualidade de soldadura para combinações de elementos químicos mais frequentes [18]	35
Tabela 8 – Dimensões, certificação, fabricante e propriedades mecânicas dos materiais utilizados.....	43
Tabela 9 – Composição química dos materiais utilizados.....	44
Tabela 10 – Características gerais dos equipamentos de soldadura TIG	45
Tabela 11 – Dados técnicos unidade posicionamento TruLaser Robot 5020 (Trumpf).....	47
Tabela 12 – Dados técnicos fonte laser HL3306, fabricante Trumpf.....	47
Tabela 13 – Dados técnicos robot Kuka, modelo KR30HA.....	48
Tabela 14 - Dimensões, alcance e ângulos rotação dos eixos do robot Kuka KR30HA.....	49
Tabela 15 - Dados técnicos serrote Shark 330 HH, fabricante MEP	50
Tabela 16 – Intensidade de corrente utilizada nos diferentes tipos de soldadura TIG manual	52
Tabela 17 – Parâmetros utilizados na soldadura laser	58
Tabela 18 – Parâmetros de corte dos provetes para ensaios.....	60
Tabela 19 – Resumo da informação recolhida nos ensaios de dobragem	70
Tabela 20 - Custo de fabrico e processamento do conjunto 0657664 por soldadura TIG	81
Tabela 21 – Custo de fabrico e processamento dos conjuntos 0657669 e 0657670 por soldadura TIG	82
Tabela 22 – Custos da matéria-prima necessária à produção de cada conjunto.....	82
Tabela 23 – Custo do material de adição utilizado para soldar cada conjunto por soldadura TIG	82
Tabela 24 - Somatório de custos associados à produção unitária de cada conjunto por soldadura TIG	82
Tabela 25 – Custo de fabrico e processamento do conjunto 0657664 por soldadura laser	83
Tabela 26 – Custo de fabrico do gabarit de soldadura laser para o conjunto 0657664.....	83
Tabela 27 - Custo dos elementos acessórios utilizados no gabarit de soldadura laser 0657664	84
Tabela 28 - Custo de fabrico e processamento das máscaras de soldadura laser para o conjunto 0657664.....	84

Tabela 29 – Custo da matéria-prima para produção das máscaras de soldadura laser para o conjunto 0657664	84
Tabela 30 – Custo de fabrico e processamento dos conjuntos 0657669 e 0657670 em soldadura laser	84
Tabela 31 – Custo de fabrico do gabarit de soldadura laser para os conjuntos 0657669 e 0657670	85
Tabela 32 - Custo dos elementos acessórios utilizados no gabarit de soldadura laser 0657669/0657670	85
Tabela 33 – Custo da matéria-prima associada à produção de gabarits	85
Tabela 34 – Somatório de custos associados à produção unitária de cada conjunto por soldadura laser	85
Tabela 35 – Custos fixos e variáveis a considerar para realizar <i>break-even analysis</i> dos conjuntos de peças	87
Tabela 36 – Análise comparativa de custo e tempo de produção por soldadura TIG e soldadura laser para lote de 1000 unidades	90
Tabela 37 – Processo de soldadura mais favorável em cada grupo de resultados obtidos na dissertação	91

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

A elaboração da presente dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, na especialização de Produção, Conceção e Fabrico, foi realizada em parceria com a empresa Quantal S.A. para integração em ambiente empresarial e aquisição de objeto de estudo e experimentação de um problema real da indústria atual.

O tema proposto para a dissertação foi “Conversão de um processo de soldadura manual em soldadura automática”, em que o termo conversão se destina à adaptação de um processo de soldadura TIG manual para soldadura laser automática por intermédio de um robot de 6 eixos.

A evidente vantagem em automatizar processos de fabrico na indústria atual aliada à existência de equipamento para o conseguir, que não se encontra em utilização regular, na empresa Quantal S.A. levou à proposta deste tema. Desta forma, conseguir-se-ia implementar um processo de fabrico mais produtivo de peças ou conjuntos para certos clientes que realizam encomendas regulares, de elevado número, levando à produção automatizada em série.

Desenvolvido no departamento de Engenharia/I&D em conjunto com o setor da soldadura, pertencente ao departamento da Produção, na empresa Quantal S.A., o projeto foi acompanhado por colaboradores de outros departamentos, para além dos mencionados, até à sua conclusão.

1.2 Quantal S.A. e Quantal Group

A Quantal foi a primeira empresa do grupo a que pertence (Quantal Group). Fundada em 1995 foi pioneira no desenvolvimento da tecnologia laser em aplicações industriais. O grupo Quantal é atualmente constituído pelas empresas Quantal S.A. (1995), Formstampa (2001), Espam (2007) e Growstamp (2011). O grupo Quantal está presente no mercado da indústria metalomecânica em Portugal, Espanha, França, Alemanha, Inglaterra, Suíça, Holanda, Noruega, Suécia, Dinamarca, Mali e Senegal. O maior volume de negócios está no fabrico de peças por corte laser e conformação plástica, sendo a área de especialização a produção de protótipos e peças de série automóvel.

Fundada em 1995 com o nome Quantal Laser Tecnologia Lda., a sua primeira área de atividade foi o corte laser 2D, havendo já alguma experiência no fabrico de protótipos. O mercado espanhol foi o primeiro a ser conquistado a nível internacional, havendo já no primeiro ano da empresa um volume de exportações considerável. O crescimento do volume de exportações levou ao aumento da área de produção, para obtenção de capacidade de resposta ao mercado. Assim, em 1997 a fábrica aumentou de 450 m² para 900 m² e em 1999 de 900 m² para 1350 m².

Com a aquisição de novos conhecimentos do mercado e das respetivas necessidades, fundou-se em 2001 a segunda empresa que viria a fazer parte do grupo, a Formstampa. A necessidade de criação surgiu com o crescente aumento da construção civil a nível nacional, sendo que o maior volume de negócios estava ligado a portas de segurança, na área de arquitetura, construção e acabamentos.

A introdução de novos mercados como a França, em 2002, e a Alemanha, em 2005, aliados ao aumento do volume de negócios com o mercado espanhol, leva novamente à ampliação da fábrica para 2400 m² em 2003 e para 3000 m² em 2004. O aumento da área da fábrica foi fundamental para não perder competitividade no mercado da altura, resultando assim num acréscimo de cerca de 2000 m² ao espaço existente em 5 anos.

Associado ao crescimento está o aumento do consumo de recursos, que faz surgir o problema da elevada quantidade de material excedente resultante da produção das duas empresas que faziam parte do grupo. Para solucionar este problema, foi criada, em 2006, a Traed, empresa dedicada à seleção, tratamento e comércio de materiais recicláveis.

Face ao contínuo crescimento da Quantal e à abertura de novos mercados, como por exemplo as exportações para a Suíça, em 2007, foram inauguradas nesse ano as atuais instalações da empresa (figura 1), em Rio Mau, pertencente ao concelho de Vila do Conde. Com a construção de novas instalações, a área da fábrica aumentou de 3000 m² para 6000 m². Ainda em 2007, foi criada a Espam, empresa especializada em estampagem metálica, com 85% da sua produção em série direcionada ao setor automóvel, para dar resposta ao crescente aumento deste setor no mercado.



Figura 1 - Instalações da Quantal Group inauguradas em 2007 [1]

Com a aquisição de novas máquinas para o setor de corte laser, o consumo de gases de assistência ao corte tornou-se mais elevado, levando a quebras na capacidade de manter o funcionamento contínuo das máquinas, principalmente por falta de azoto. Para fazer face a este problema, foi criada em 2008 a Nitrox, empresa direcionada exclusivamente para a produção de gases em aplicações industriais e na medicina.

O crescimento das empresas existentes até à data ainda viria a aumentar. Em 2009 a Formstampa conquista mercado em África, no Senegal. Em 2011 foi fundada a Growstamp, empresa dedicada à produção de equipamentos agrícolas e industriais, operando principalmente no mercado nacional.

Um ano mais tarde, em 2012, a Quantal empreende uma nova estratégia de marketing e muda o seu nome para Quantal Group, passando a anterior Quantal Laser Tecnologia a ser designada por Quantal S.A. [1].

1.3 Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo a conversão de um processo de soldadura manual, através da substituição por um processo de soldadura automática. Inerentes a esta automatização estão os objetivos da redução do custo e tempo de fabrico, sendo obrigatória a obtenção de propriedades de soldadura análogas ou superiores às que já são previamente obtidas por soldadura manual.

O trabalho experimental centra-se na soldadura de peças pelo processo de fabrico manual e automático, fazendo uma análise comparativa das propriedades mecânicas e da qualidade de soldadura pela realização de ensaios metalográficos e ensaios de dobragem de cordões de soldadura.

Pretende-se ainda fazer um levantamento de todos os custos associados a ambos os processos de soldadura. Com a recolha destes dados, poderá ser efetuada uma análise económica comparativa entre os dois processos de soldadura, levando à obtenção de conclusões relativas à viabilidade da automatização do processo.

Um objetivo secundário, sugerido pelo departamento de Engenharia/I&D da Quantal S.A., trata-se do desenvolvimento de uma pesquisa bibliográfica, a apresentar no estado da arte da dissertação, do princípio físico de funcionamento do laser e da tecnologia existente para aplicações industriais. Com este documento, poderá ser dado a conhecer a futuros estagiários e colaboradores da empresa o princípio de funcionamento geral das máquinas que recorrem a tecnologia laser para processamento de materiais.

1.4 Metodologia

A metodologia adotada passou inicialmente pela aquisição de conhecimentos nas áreas relevantes para a dissertação, através da integração em ambiente empresarial e aprendizagem relativa ao método de trabalho da empresa.

Seguidamente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica acerca do laser, princípio físico de funcionamento e tecnologia existente, com aplicação a nível industrial de interesse para a dissertação e para os atuais e futuros colaboradores e estagiários da empresa Quantal S.A., para ser utilizada como método de conhecimento da tecnologia existente na empresa.

Com o avanço do estágio, consolidação da teoria acerca da tecnologia existente e entendimento do funcionamento da empresa, tomou lugar a seleção das peças a estudar e recolha de amostras de soldadura. Durante a recolha de amostras, foi realizado o estudo relativo aos materiais a soldar, o registo de duração das operações de soldadura, a projeção de meios de fixação das peças para soldadura automática e a aquisição de conhecimentos de programação na área da robótica para levar a cabo ambos os processos de soldadura.

A realização de ensaios nas amostras obtidas pelos dois processos de soldadura, marcou a conclusão da parte experimental da dissertação. Deste modo, foi possível a obtenção de material de estudo para fazer a respetiva avaliação da soldadura executada na empresa Quantal S.A. e uma análise comparativa de dois processos de soldadura para efeitos de estudo.

Como forma de conclusão de todo o trabalho desenvolvido ao longo do semestre, foi dedicado um capítulo exclusivamente à análise económica, envolvendo todos os custos associados ao processamento de materiais e restantes recursos utilizados por parte da empresa.

Na figura 2 pode ser consultado o cronograma das tarefas realizadas durante as semanas em que a dissertação foi elaborada. Apenas estão identificados os principais marcos usados no controlo da evolução da dissertação e os principais resultados a atingir em cada fase.

CRONOGRAMA	
DATA	TAREFAS A EXECUTAR
18-09-2017	Semana 1: Integração em ambiente empresarial na empresa Quantal S.A.
25-09-2017	Semana 2: Decisão do tema de trabalho. Início da revisão bibliográfica proposta pela empresa.
02-10-2017	Semana 3: Elaboração da revisão bibliográfica. Desenvolvimento e análise do processo de fabrico mais adequado nos trabalhos em curso da equipa de engenharia da empresa.
09-10-2017	Semana 4: Aprendizagem relativa ao método de trabalho da empresa. Acompanhamento de produção e reconhecimento da tecnologia existente.
16-10-2017	Semana 5: Conclusão da revisão bibliográfica. Investigação de equipamentos de adição de material para robot de soldadura laser.
23-10-2017	Semana 6: Estudo da inexistência de equipamento e <i>know how</i> para soldadura com adição de material. Pesquisa de peças para adaptar a soldadura laser.
30-10-2017	Semana 7: Estudo do tempo de operação manual e análise de peças fora do custo de orçamento. Recolha de amostras soldadas manualmente das peças escolhidas.
06-11-2017	Semana 8: Desenvolvimento da metodologia e apresentação do problema. Projeção de gabarits soldadura laser.
13-11-2017	Semana 9: Conclusão da projeção de gabarits de soldadura laser.
20-11-2017	Semana 10: Elaboração dos programas a executar pelo robot de soldadura laser.
27-11-2017	Semana 11: Análise e validação dos parâmetros das máquinas e ajustes na peça.
04-12-2017	Semana 12: Recolha de amostras soldadas automaticamente no robot de soldadura laser.
11-12-2017	Semana 13: Realização de cortes para ensaios metalográficos.
18-12-2017	Semana 14: Análise dos provetes cortados (realização de ensaios metalográficos, ensaios de dureza e compressão de cordões de solda).
25-12-2017	Semana 15: Análise dos ensaios metalográficos para validar a respetiva conformidade do produto
01-01-2018	Semana 16: Recolha de dados para balanço económico das operações. Comparação e análise económica dos dois processos.
08-01-2018	Semana 17: Entrega da versão provisória da dissertação.
15-01-2018	Semana 18: Elaboração das conclusões acerca da análise de resultados. Proposta de trabalhos futuros.
22-01-2018	Semana 19: Revisões finais e conclusão do documento escrito. Entrega da versão final da dissertação para ser submetida à avaliação do juri.
29-01-2018	Semana 20: Conclusão da dissertação e estágio.

Figura 2 - Cronograma das tarefas realizadas durante o período de elaboração da dissertação

As tarefas apresentadas na figura 2 foram executadas nas instalações da Quantal S.A. à exceção dos ensaios metalográficos e ensaios de dobragem de juntas de soldadura. A realização de ensaios para obtenção de resultados experimentais teve lugar no laboratório do DEMec-FEUP.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, lógica e sequencialmente organizados para dar a conhecer o estudo e respetivos objetivos, o projeto em questão, os resultados obtidos e o conhecimento adquirido a partir dos mesmos.

O primeiro capítulo consiste no enquadramento, motivação e objetivos do projeto, no qual se inclui também uma breve apresentação da empresa Quantal S.A. de contexto histórico, industrial e comercial.

No segundo capítulo, efetua-se uma abordagem teórica da soldadura TIG, do princípio de funcionamento do laser, da tecnologia laser existente no mercado para a indústria atual e do funcionamento e parâmetros da soldadura laser, dada a relevância que esta tem para a dissertação.

O terceiro capítulo explica o método de seleção do projeto, o problema em análise e os procedimentos e parâmetros para levar a cabo a preparação e execução da parte experimental da dissertação.

No quarto capítulo, estão demonstrados os resultados obtidos e a respetiva análise comparativa entre os dois processos de soldadura. Encontra-se também uma referência à análise dos resultados obtidos comparativamente ao que seria esperado.

A análise económica de todos os processos e materiais utilizados nesta dissertação é realizada no quinto capítulo, sendo o objetivo fazer o levantamento de todos os custos e tempo de soldadura associados a elevadas cadências de produção para os conjuntos estudados.

O último capítulo destina-se a expor as conclusões retiradas de todo o trabalho desenvolvido ao longo da dissertação, a mencionar outros subprojectos que poderiam ter interesse para desenvolvimento em paralelo, mas que se revelaram de impossível realização, devido à limitação de tempo para conclusão da dissertação, e a abordar perspetivas de trabalhos futuros relativamente a este tema.

2 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica desta dissertação consiste numa abordagem de carácter científico aos processos de fabrico utilizados para obtenção de amostras. No primeiro subcapítulo encontra-se o enquadramento e uma breve descrição do processo de soldadura TIG. Nos restantes subcapítulos desenvolve-se o estado da arte proposto pela Quantal S.A., acerca dos princípios da emissão laser e do enquadramento da soldadura laser no estudo desenvolvido.

2.1 Soldadura TIG

2.1.1 Enquadramento da soldadura TIG nos processos de soldadura

Um processo de soldadura trata-se de uma união permanente entre duas peças, através da união atómica das duas superfícies em contacto, de forma a obter uma junta com propriedades mecânicas análogas ou superiores às do metal base, mantendo a continuidade metálica através da ligação obtida. O ideal seria obter uma continuidade total entre os elementos a ligar, para que fosse impossível distinguir a junta dos elementos ligados. Isso é, no entanto, praticamente impossível [2].

Qualquer processo de construção metálica aditivo, como é o caso da soldadura, parte de peças simples, que requerem montagem, para dar origem a um produto de geometria mais complexa. As juntas produzidas por soldadura são inamovíveis e permanentes, ultrapassando normalmente a resistência do material base.

De um modo geral, a soldadura poderá recorrer a dois processos de base relativamente simples para poder ser realizada. O primeiro será fusão, através de energia fornecida por via eléctrica ou por combustão de um gás, dando origem à união pela mistura dos metais fundidos (material base e material de adição). No outro caso, tem-se soldadura através de energia mecânica, recorrendo ao atrito ou ao impacto para atingir os objetivos pretendidos. Este segundo caso é frequentemente auxiliado pelo calor, provocando um caldeamento do material.

A aplicabilidade de um processo de soldadura está restrita a alguns materiais, não podendo ser utilizado de forma universal. A espessura do material base também condiciona a aplicação de alguns processos. As restrições mencionadas têm como fatores condicionantes a temperatura de fusão e a condutividade térmica do material.

Existindo uma enorme variedade de processos de soldadura, é fundamental classificar os mesmos. Os processos de soldadura poderão ser divididos tendo em conta diversos fatores, nomeadamente o estado dos materiais de base e de adição, o modo de proteção de soldadura ou a fonte de calor utilizada. Na tabela 1 é feita uma classificação de alguns processos de soldadura segundo a fonte de calor utilizada.

Tabela 1 – Classificação dos processos de soldadura de acordo com a fonte de calor utilizada [3]

Eletricidade	Gás	Mecânica
Eléctrodo revestido	Oxi-Acetilénica	Fricção
MIG-MAG	Brasagem Forte	Explosão
Fio Fluxado		Indentação
TIG		Ultrassons
Arco Submerso		
Plasma		
Resistência		
Laser		
Feixe de Electrões		
Brasagem Fraca		

Quando se pretende fusão intensa dos materiais de base e de adição, utiliza-se, em grande parte dos casos, como fonte de calor, um arco eléctrico gerado pela passagem da corrente eléctrica, através de um meio gasoso situado entre o cátodo (eléctrodo negativo) e o ânodo (eléctrodo positivo). O arco eléctrico é muito utilizado por ser um meio prático de gerar a energia necessária à soldadura. Os equipamentos apresentam custos aceitáveis, o controlo do processo é relativamente simples e o risco para a saúde dos operadores é relativamente baixo.

O arco eléctrico produzido irá transformar energia eléctrica em energia calorífica. A energia é transmitida à peça através da projecção do arco sobre a peça, dependendo da área de contacto entre a extremidade do arco e da peça. No entanto, dependendo do material de base, o calor difunde-se no material (figura 3), dificultando a soldadura de determinados casos. É importante que o calor fornecido pela fonte de alimentação se processe a uma taxa bastante superior à de dissipação do mesmo, para que se produza o efeito de fusão pretendido.

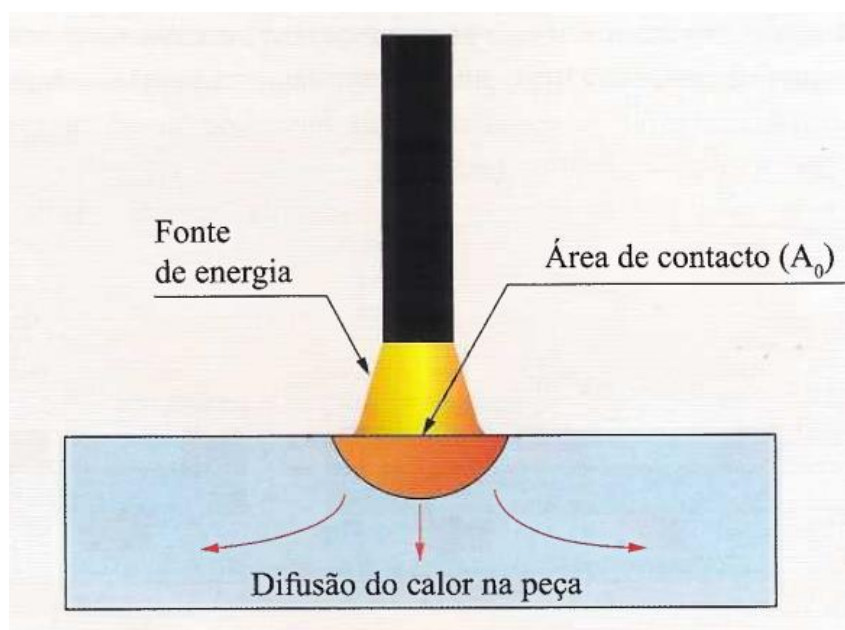


Figura 3 – Projecção do arco eléctrico sobre o material base [3]

Existem particularidades de cada processo relativamente ao arco elétrico, pois as diferentes condições de operação traduzem-se em efeitos diferentes no arco. Alguns processos de soldadura por arco utilizam elétrodos consumíveis (elétrodo revestido, MIG-MAG, fio fluxado e arco submerso) no qual o arco está a ser estabelecido por um elétrodo que se está a fundir e a transferir para a junta. Outros processos, como o TIG ou plasma, usam um elétrodo apenas para conduzir a corrente, o qual não é consumível, embora se desgaste. Alguns processos obtêm a proteção sob a forma de fluxo gasoso (MIG-MAG, TIG, plasma), enquanto outros utilizam uma barreira sólida (arco submerso) como proteção, com propriedades diferentes no que diz respeito à condução da corrente elétrica e capacidade de ionização. Há ainda processos de soldadura que geram a proteção durante o processo (elétrodo revestido e fio fluxado) [3].

2.1.2 Princípio do processo de soldadura TIG

Soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*) é um processo de soldadura no qual se produz um arco elétrico entre um elétrodo não consumível e a peça numa atmosfera de gás inerte (figura 4). O calor desenvolvido pelo arco é suficiente para fundir a peça, formando um banho de fusão ao qual se pode juntar material de adição para completar a soldadura. A proteção do metal fundido é feita pela atmosfera de gás inerte [4]. O processo gás inerte na maioria dos casos e assenta num elétrodo de tungsténio não consumível para estabelecer e manter o arco necessário à soldadura. É um processo que, quando devidamente utilizado, proporciona elevados níveis de qualidade e soldaduras com um aspeto bastante característico [3].

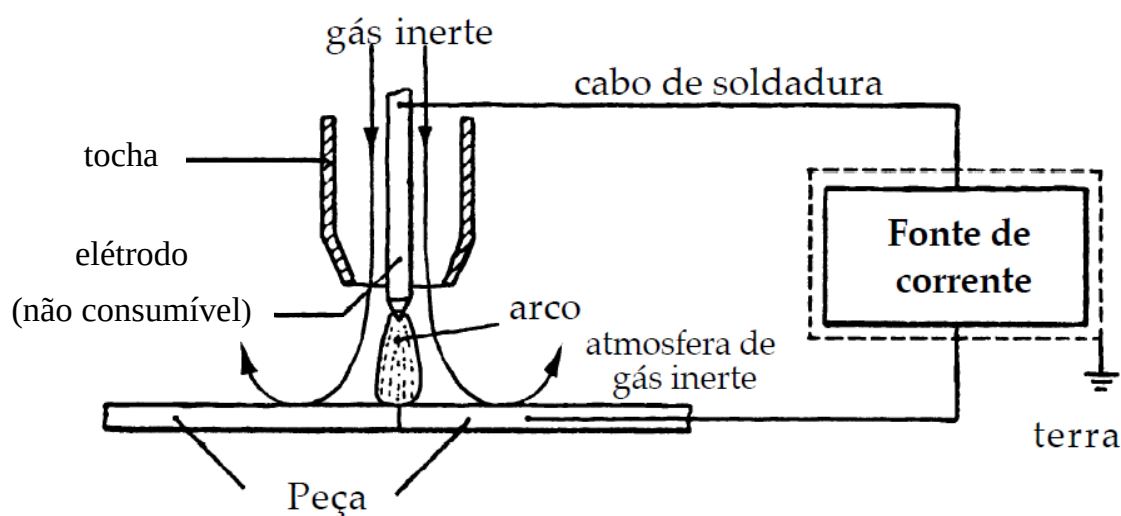


Figura 4 – Representação esquemática do princípio do processo TIG [4]

Existem alguns aspetos do processo de soldadura TIG que o distinguem de outros processos baseados no arco elétrico. O elétrodo de tungsténio, apelidado de elétrodo não consumível, serve única e exclusivamente para conduzir a corrente elétrica até à formação do arco, permitindo o seu estabelecimento e manutenção. O material de adição pode ou não ser utilizado, dado que para espessuras relativamente baixas se pode efetuar soldadura sem material de adição. Quando se utiliza material de adição, este é adicionado ao processo quase sempre de forma manual, através de uma vareta, que é inserida na zona do arco e vai sendo fundida. Em soldadura TIG só se utiliza gás inerte ou gás inerte com uma pequena percentagem de gás ativo como proteção.

O calor intenso, desenvolvido no processo, apenas permite a utilização de velocidades de soldadura relativamente baixas. Em certas aplicações, normalmente espessuras inferiores a 2 mm, o processo TIG não requer material de adição, recorrendo apenas à fusão do metal base

para união dos componentes. Para espessuras superiores a 8 mm, são utilizados normalmente outros processos, visto que este deixa de ser competitivo.

O arco elétrico produz-se pela passagem da corrente elétrica através de um gás inerte ionizado. Para além de assegurar o calor necessário à fusão dos materiais, o arco tem também a função de proceder à limpeza da superfície do banho de fusão e do material de base adjacente. O tungsténio é o material utilizado para constituição dos elétrodo pela elevada temperatura de fusão que apresenta, reduzindo assim o desgaste, e pela sua elevada emissividade, facilitando o escorvamento e a ionização. O gás de proteção deverá ser obrigatoriamente inerte, para evitar a contaminação do elétrodo de tungsténio.

A técnica operatória inerente a este processo, principalmente quando utilizado material de adição, provoca um aspeto característico da soldadura, como se pode observar na figura 5. Cada gota de material fundido a partir da vareta forma um círculo quando chega ao banho de fusão, misturando-se neste, mas houve já início de solidificação da gota anterior, devido ao intervalo de tempo que separa a deposição de duas gotas consecutivas. Por este motivo, o aspeto da soldadura TIG com material de adição pode indicar alguma descontinuidade, no entanto, há que salientar que mesmo nestas condições a soldadura possui características mecânicas excelentes [3].

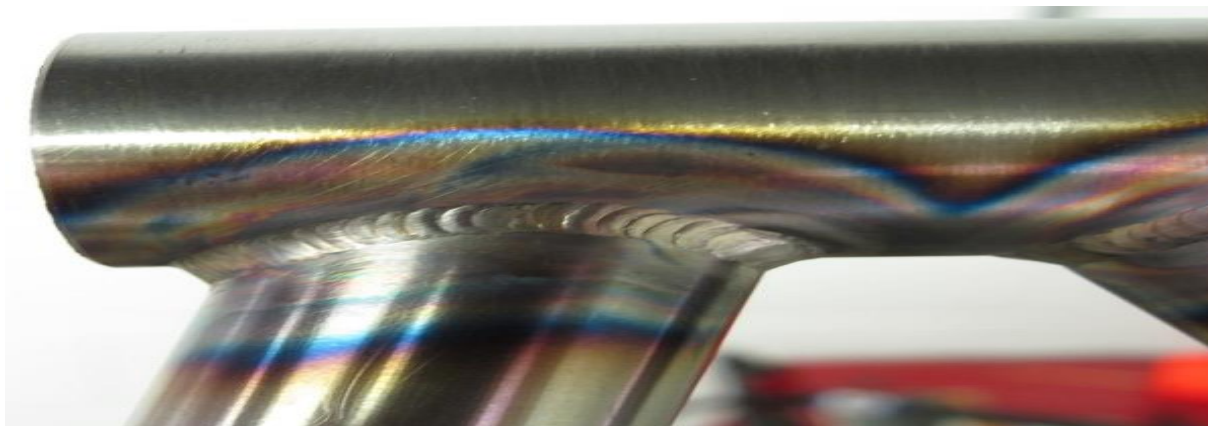


Figura 5 – Aspeto da soldadura TIG realizada com material de adição [5]

O processo caracteriza-se por uma elevada entrega térmica, exigindo especificações especiais para o bocal da tocha. Apesar da elevada entrega térmica, os cordões de soldadura produzidos são geralmente mais finos do que noutros processos, como é o caso da soldadura MIG-MAG ou de elétrodo revestido. A regulação da zona afetada pelo calor (ZAC) depende da velocidade de soldadura e dos restantes parâmetros. Entre os principais parâmetros que governam a soldadura TIG, encontram-se:

- Tipo da fonte de alimentação de corrente
- Tensão (diferença de potencial) à saída da fonte de alimentação
- Intensidade e tipo de corrente
- Composição do elétrodo
- Geometria da extremidade do elétrodo
- Gás de proteção
- Material de adição [3].

Soldadura TIG pode ser utilizada na soldadura de praticamente todo o tipo de metais por operação manual ou automática. Na indústria atual, é maioritariamente utilizada na soldadura de ligas de alumínio e aço inoxidável, casos em que a integridade da soldadura é o

mais importante. As áreas de aplicação mais usual envolvem indústria nuclear, química, aeronáutica e automóvel (figura 6), passando também por outros de menor relevância como a indústria alimentar [5].

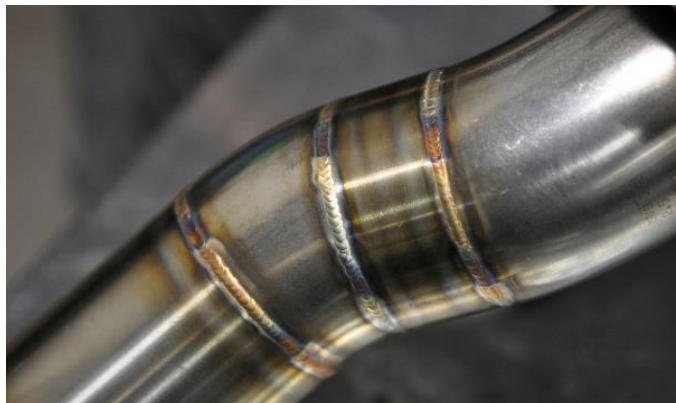


Figura 6 – Soldadura TIG utilizada para modificação da geometria de um tubo de escape automóvel [25]

2.2 Enquadramento e princípio da emissão laser

2.2.1 Perspetiva histórica

Em 1704 Isac Newton argumentou que a luz seria uma corrente de partículas. Cerca de um século mais tarde, em 1803, devido à experiência da interferência de Young e com a descoberta da polaridade da luz, foi identificado o comportamento ondulatório da luz. Maxwell caracterizou a luz, segundo a sua teoria eletromagnética, como a vibração rápida de um campo eletromagnético devido à oscilação de partículas carregadas, teoria que viria a ser desacreditada pela descoberta do fenómeno da radiação do corpo negro (início do século XX) [6].

Einstein introduz, em 1905, o conceito de *Quanta*. Mais tarde, concluiu-se que a luz é composta por partículas individuais, designadas por fotões. A principal contribuição de Einstein para a tecnologia laser foi em 1917, ao introduzir o conceito de transições quânticas, nomeadamente absorção, emissão espontânea e estimulada da luz. Foi previsto por Einstein que caso ocorresse inversão de população entre os níveis energéticos superior e inferior de um átomo, seria possível tirar partido deste estado para dar origem a radiação estimulada amplificada.

O precursor do laser foi o *maser*, acrónimo de *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Basov e Prokhorov (USSR) e Charles Townes (EUA) desenvolveram o conceito independentemente. Gordon, Zeiger e Townes constroem o primeiro *maser* de amónia operacional em 1954 (figura 7). Em 1957, Gordon Gould batizou o *maser* ótico de laser [7].

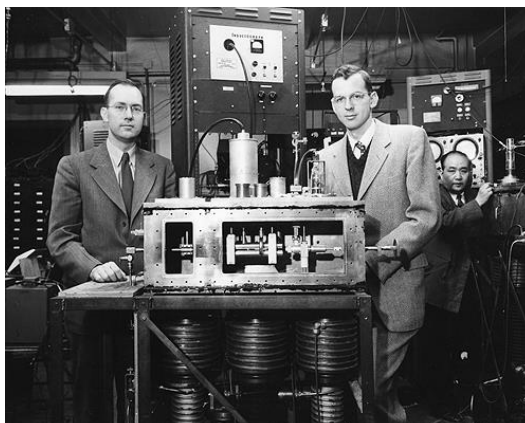


Figura 7 - Charles Townes, Jim Gordon e o laser de amónia [7]

Theodore Maiman construiu, em 1960, o primeiro laser ao qual deu o nome de *loser*, acrónimo de *Light Oscillation by Stimulated Emission of Radiation*. O *loser* era um laser de estado sólido com um rubi que funcionava em modo pulsado e emitia um feixe de cor vermelha (figura 8).



Figura 8 - Theodore Maiman e o laser de rubi, uma das maiores invenções tecnológicas da década de 60 [8]

Desde a invenção do primeiro laser, a evolução foi relativamente contínua entre 1960 e 1980, período no qual se desenvolveram a maioria dos lasers. Atualmente existem lasers de estado sólido, líquido e gasoso, cada um deles com diferentes características e áreas distintas de aplicação [8].

Com respeito a aplicações no mercado atual, o processamento de materiais é a segunda área mais importante, dado que representa maior volume de negócios, logo após a utilização de tecnologia laser no setor das telecomunicações (figura 9) [9], [10].

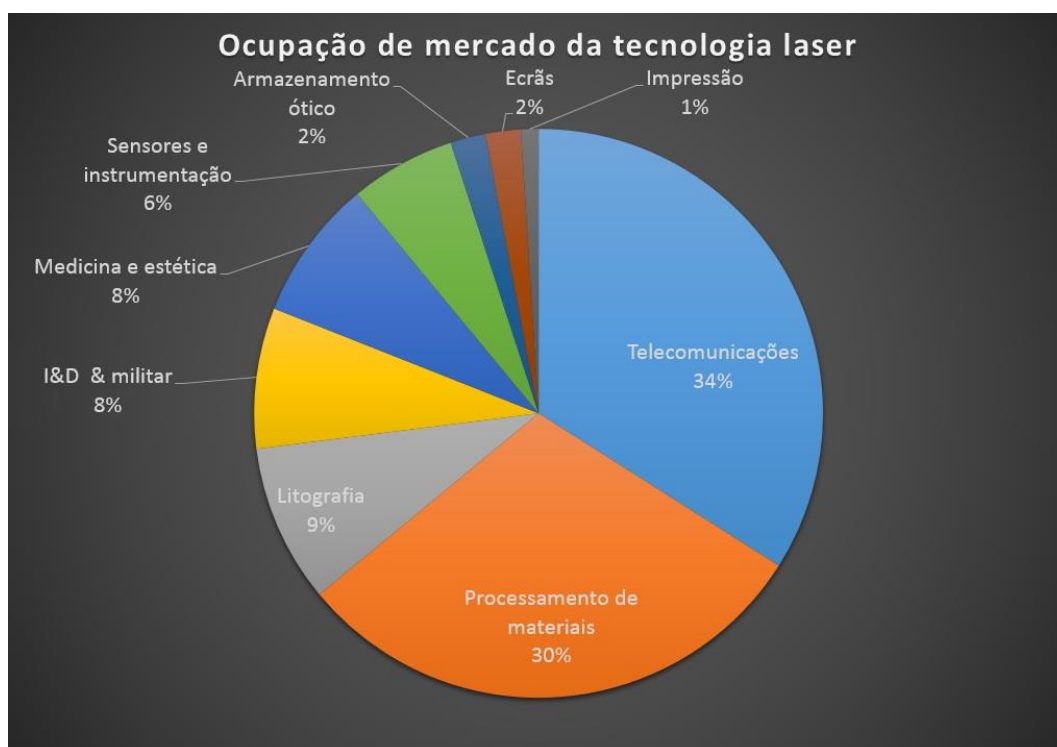


Figura 9 – Aplicações da tecnologia laser no mercado mundial em 2016 (adaptado de [10])

2.2.2 Funcionamento do laser

Átomos são constituídos por um núcleo, positivamente carregado, com um ou mais elétrons, negativamente carregados, que se movem ao seu redor em órbitas estáveis.

A transição de um elétron de uma órbita de um determinado nível energético para uma órbita de nível energético superior, é causada pela absorção de uma quantidade de energia perfeitamente definida pela lei de Planck [11] (equação 2.1) [12]:

$$E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

Onde:

E , é a energia absorvida, em Joule [J]
 E_1, E_2 , são a energia de transição, em Joule [J], correspondente aos níveis de órbitas 1 e 2
 h , é a constante de Planck em Joule segundo [J.s], em que $h=6,626 \times 10^{-34}$ [J.s], e
 ν , é a frequência de transição do elétron, em Hertz [Hz]

Este fenómeno pode ocorrer através da excitação elétrica do átomo, ou por emissão direcionada de um *flash* ótico, sendo neste segundo caso designado por absorção estimulada.

Quando um elétron se encontra num nível energético superior, tende a regressar naturalmente ao seu estado fundamental, libertando um fóton, designação científica para partícula de luz, cujo valor de energia pode ser determinado através da lei de Planck (equação 2.1). A este fenómeno dá-se o nome de emissão espontânea.

Quando um fóton, de energia definida pela lei de Planck (equação 2.1), é utilizado para provocar a excitação de um elétron localizado numa órbita de nível energético superior, de modo a que este regresse ao estado fundamental, é libertada energia sob a forma de um segundo fóton com a mesma frequência, direção e fase do fóton incidente, transferindo assim a energia para a luz transmitida (figura 10). Isto constitui a designada emissão estimulada. Por este motivo, a origem da palavra laser é o acrónimo “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” [11].

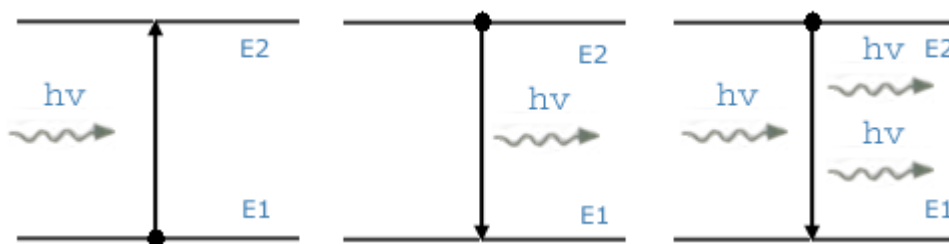


Figura 10 – Fenómenos de absorção estimulada (esquerda), absorção espontânea (centro) e emissão estimulada (direita) [26]

Após esta contextualização, e de acordo com a literatura existente, pode definir-se o laser, de modo generalizado, como um dispositivo ou ferramenta que gera e amplifica luz, sendo possível a comparação a um transistor que gera e amplifica sinais elétricos a frequências áudio, rádio ou micro-ondas. Atendendo a que os lasers correspondem a uma gama de radiação com comprimentos de onda pertencentes a um intervalo que abrange radiação de infravermelhos até ultravioleta, chegando aos comprimentos de onda mais elevados da radiação X, torna-se necessário entender a luz e o espectro eletromagnético amplamente [11]. Quando se tratam de comprimentos de onda referentes à radiação laser é necessário notar que se está a fazer referência a um intervalo do espectro eletromagnético (figura 11) muito mais abrangente do que a zona correspondente à luz visível. Para efeitos de quantificação de comprimentos de onda, essa zona está aproximadamente compreendida entre 150 e 11000 nm [13].

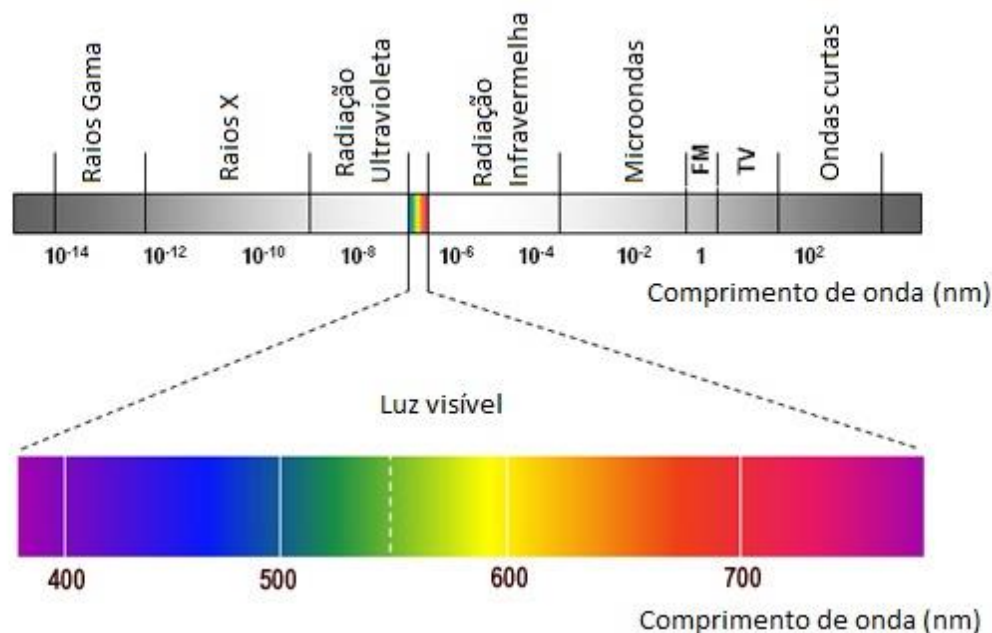


Figura 11 - Espectro eletromagnético (adaptado de [27])

Todos os lasers são constituídos por um conjunto de elementos sem os quais seria impossível gerar o feixe laser. São eles o meio ativo (átomos ou moléculas de determinada matéria), a fonte de bombardeamento ou excitação (responsável pela emissão de fótons) e o dispositivo de amplificação (cavidade ótica), como se pode observar na figura 12. O meio ativo é posicionado dentro da cavidade ótica constituída por dois tipos de espelhos, sendo um deles, através do qual é emitido o feixe laser, parcialmente transparente. O meio ativo é sujeito a emissão estimulada através do bombardeamento de fótons, levando a que seja libertado um fóton cada vez que um elétron é posicionado numa órbita de nível energético inferior. Este é o designado processo de excitação ou bombardeamento [11].

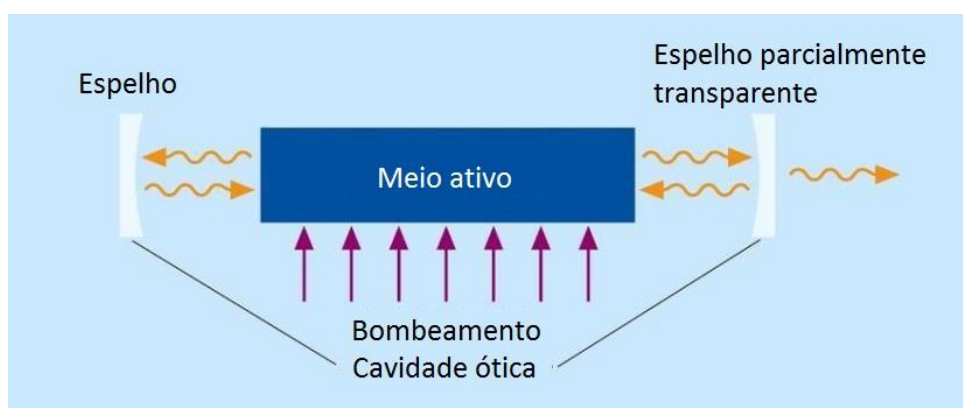


Figura 12 - Elementos necessários à geração do feixe laser (adaptado de [28])

A ocorrência do fenómeno descrito no parágrafo anterior só é possível quando a órbita de nível energético superior se encontra povoada com maior número de eletrões do que a órbita de nível energético imediatamente abaixo. Quando começa a excitação, ou bombardeamento, dá-se uma inversão na distribuição dos eletrões pelos níveis energéticos em questão e são emitidos fótons espontaneamente em todas as direções. A amplificação é posteriormente obtida na direção do eixo de propagação da cavidade ótica devido às múltiplas reflexões da luz dentro dos espelhos que a constituem. O feixe laser abandona a cavidade através do espelho parcialmente transparente. Caso não se verificassem estas condições, o meio ativo iria absorver a energia emitida, distribuindo eletrões apenas pelo nível energético acima, sem emissão de qualquer partícula essencial à geração do feixe laser [14].

2.2.3 Características de um feixe laser

Neste subcapítulo serão abordadas e descritas as características do feixe laser mais relevantes, nomeadamente a monocromaticidade, direccionalidade, coerência, baixa divergência, alta intensidade, modo transverso e polarização.

Monocromático, proveniente de monocromaticidade, significa que tem uma só cor. Neste caso, classifica-se o laser como radiação que tem um comprimento de onda único, ou seja, um intervalo muito estreito de comprimentos de onda, observável na figura 13, que depende da natureza do meio ativo. É de extrema importância ter este comprimento de onda bem definido nas características do laser, visto que a absorção de radiação por parte dos materiais varia de acordo com o valor do comprimento de onda emitido pela fonte laser. Por este motivo, o processamento de certos materiais é mais apropriado com determinado tipo de laser em detrimento de outro.

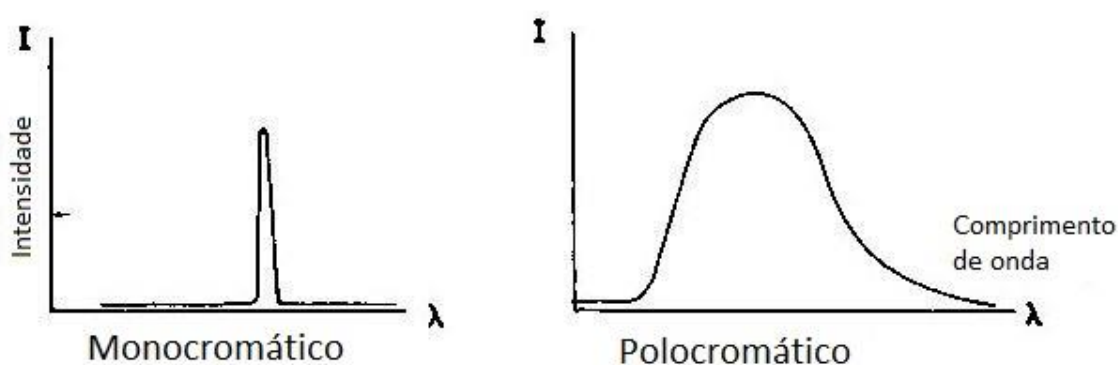


Figura 13 - Gráficos de comparação de comprimento de onda monocromático e policromático [16]

Uma fonte de luz natural emite radiação em todas as direções espaciais. A radiação laser, ao contrário das fontes de luz normais, é emitida numa determinada direção, com um feixe estreito que assim permanece à medida que se propaga. A direccionalidade ou colimação é uma importante propriedade do laser que indica que o feixe é emitido com um baixo ângulo de divergência, como se observa na figura 14. Para muitos casos práticos, considera-se o feixe paralelo.

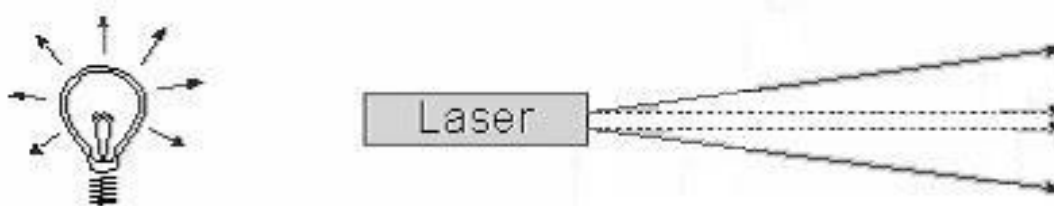


Figura 14 – Emissão de radiação sob a forma de luz em fonte normal e fonte laser [16]

Da característica monocromática do feixe laser advém uma outra propriedade, denominada por coerência, espacial e temporal, ambas independentes. Todas as ondas de luz emergentes do laser são altamente ordenadas no espaço e correlacionadas no tempo, como se encontra esquematizado na figura 15. São designadas por ondas coerentes, aquelas cuja fase relativa se mantém entre elas. A coerência é uma característica utilizada para exprimir o grau de cromaticidade e colimação de um feixe laser.

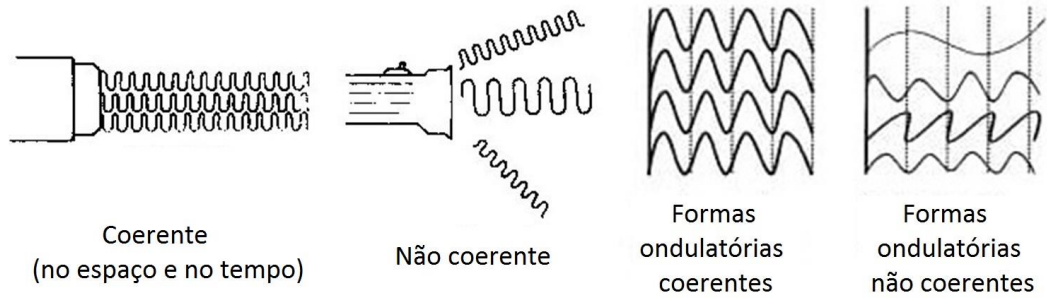


Figura 15 - Fonte de luz coerente e não coerente, representação das formas ondulatórias (adaptado de [16])

A divergência define-se como o ângulo de abertura do feixe, quantificado por θ na figura 16. Para muitos autores corresponde a metade desse valor, mas a definição adotada nesta dissertação será a consideração do valor por inteiro, permitindo assim formulação direta com diâmetros. Lasers para aplicação industrial têm uma divergência que varia entre 1 e 3 mrad. Pode então constatar-se, para dar como exemplo, que um ângulo de divergência de 2 mrad aumenta o diâmetro do feixe laser em 2 mm, por cada metro de propagação. De acordo com a relação entre graus e radianos:

$$360^\circ = 2\pi \text{ rad} \Rightarrow 1 \text{ rad} = 57,3^\circ \Rightarrow 1 \text{ mrad} = 0,0573^\circ$$

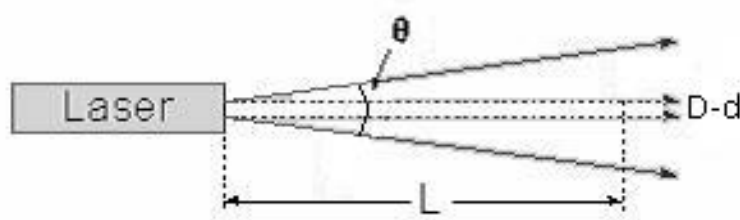


Figura 16 - Ângulo de divergência de um feixe laser [16]

Para um feixe laser, perfeitamente coerente no domínio espacial, de diâmetro D, haverá divergência inevitavelmente, devido à difração da luz. De acordo com a literatura existente acerca da teoria da difração, o ângulo de divergência, θ_d , é dado por [15]:

$$\theta_d = \frac{\beta \cdot \lambda}{D} \quad (2.2)$$

Onde:

θ_d , é o ângulo de divergência do feixe, em radiano [rad]
 β , é o fator de relação de diâmetros, (adimensional)
 λ , é o comprimento de onda da radiação laser, em milímetro [mm], e
 D , é o diâmetro atual do feixe, em milímetro [mm]

Há que mencionar que β pode ser expresso pela seguinte relação [15]:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (2.3)$$

Onde:

β , é o fator de relação de diâmetros (adimensional)
 d , é o diâmetro original do feixe, em milímetro [mm], e
 D , é o diâmetro atual do feixe, em milímetro [mm]

Referir intensidade de uma fonte de luz, é definir a potência que esta emite por unidade de área por unidade angular. A intensidade do laser será dada pela expressão [15]:

$$B = \frac{4P}{(\pi \cdot D \cdot \theta)^2} \quad (2.4)$$

Onde:

B, é a intensidade do feixe laser, em Watt por milímetro ao quadrado [W/mm²]
 P, é a potência da fonte, em Watt [W]
 D, é o diâmetro do feixe, em milímetro [mm], e
 θ , é o ângulo de divergência, em radiano [rad]

Deste modo, a intensidade máxima de um feixe laser é obtida quando se consegue uma coerência espacial perfeita, descrita pela fórmula [15]:

$$B = \frac{4P}{(\pi \cdot \lambda \cdot \beta)^2} \quad (2.5)$$

Onde:

B, é a intensidade do feixe laser, em Watt por milímetro ao quadrado [W/mm²]
 P, é a potência da fonte, em Watt [W]
 λ , é o comprimento de onda da radiação, em milímetro [mm], e
 β , é o fator de relação de diâmetros (adimensional)

O modo transverso caracteriza a distribuição de potência do feixe laser que pode ser visualizada numa vista em corte do feixe, paralela à superfície onde vai incidir. Caso a distribuição seja ótima e uniforme, de uma perspectiva de elevada qualidade ótica, designar-se-á Modo TEM₀₀, onde TEM significa “*Transverse Electric Magnetic*”. Também conhecida como distribuição Gaussiana. Esta é a ideal para corte laser. No caso da soldadura já se podem operar lasers nos modos TEM₀₀, TEM₀₁, TEM₁₀ e multimodo (*multimode*). Há ainda outros modos que não referidos neste trabalho por terem outras aplicações, podem, no entanto, ser observados na figura 17.

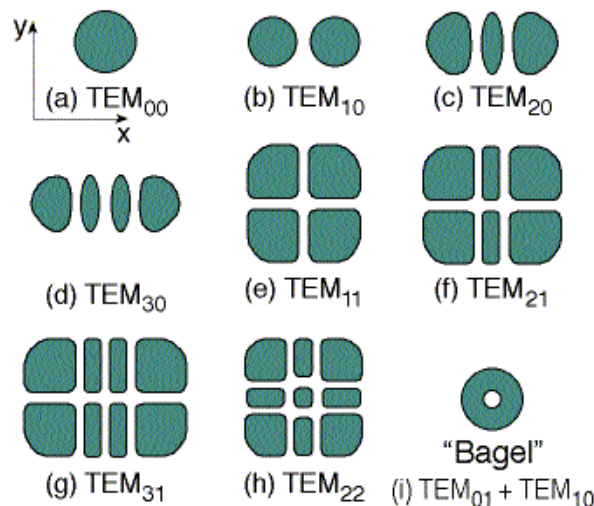


Figura 17 - Exemplos de modos transversos que podem ser utilizados para processamento de materiais [29]

A radiação laser consiste numa onda eletromagnética que pode ser dividida num campo elétrico, $\vec{E}$, e num campo magnético, $\vec{B}$, perpendiculares entre si. A nível industrial, os lasers utilizados para corte são muito frequentemente polarizados linearmente, para que a direção do campo elétrico seja sempre a mesma do eixo de propagação do feixe. Contrariamente, na soldadura laser, a polarização não tem qualquer efeito notável na qualidade da soldadura. Demonstrou-se, no entanto, que pode melhorar o desempenho quando se efetua soldadura a altas velocidades [11], [14], [16].

2.3 Tecnologia laser

2.3.1 Funções do laser na indústria

Atualmente, e com o avanço científico conseguido até ao momento, as aplicações do laser a nível industrial são diversas. Muitos são os processos de fabrico que contam com a colaboração de tecnologia laser, quer constituindo o foco essencial do processo, quer colaborando para melhorias a nível de desempenho e eficiência.

Com recurso a tecnologia laser existem, nos dias de hoje, os seguintes métodos de processamento de materiais:

- Corte Laser (*laser cutting*)
- Soldadura Laser (*laser welding*)
- Fabrico Aditivo (figura 18) (*additive manufacturing*)
- Furação Laser (*laser drilling*)
- Gravação Laser (*laser marking*)
- Polimento Laser (*laser polishing*)
- Revestimento Laser (*laser cladding*)
- Maquinação Térmica (*thermal machining*)
- Acabamento (*surface treatment*)
- Endurecimento Superficial (*surface hardening*)
- Deformação e Fratura (*deformation and fracture*)
- Ligação por Condução (*conduction joining*) [17]

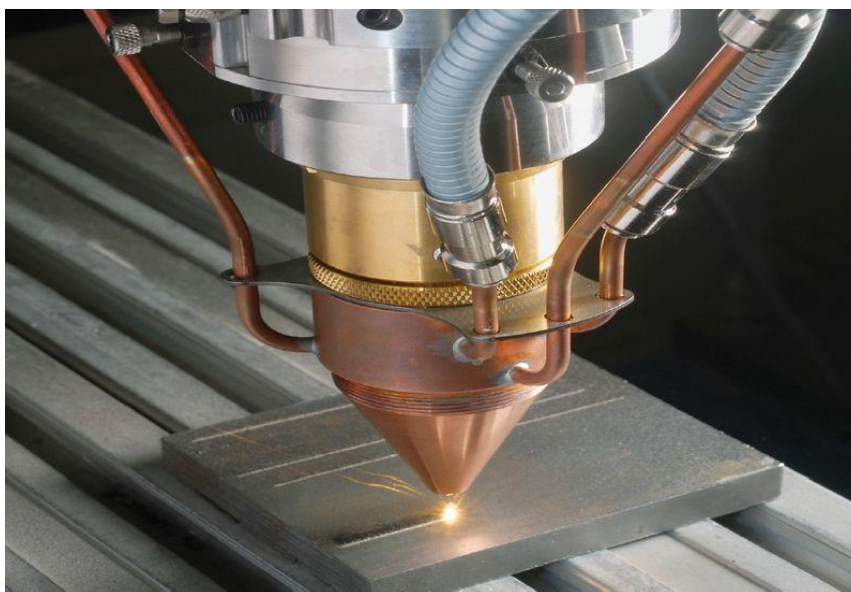


Figura 18 – *Laser metal deposition*, um dos processos de fabrico aditivo mais recentes da atualidade com recurso a tecnologia laser [30]

A temática fundamental desta dissertação é soldadura laser e o estudo dos benefícios que este método de processamento de materiais providencia à indústria da atualidade. Poderá, no entanto, haver referência a outros processos de fabrico, que envolvam tecnologia laser, considerados de maior relevância na indústria, como método de enquadramento nesta dissertação.

2.3.2 Classificação

De acordo com a tecnologia desenvolvida até à data, é possível identificar cerca de 60 tipos de lasers. A classificação de cada laser é feita tendo em conta o meio ativo, o comprimento de onda e o comportamento temporal (contínuo ou pulsado).

Já mencionado no subcapítulo 2.1, com o tema “Enquadramento e princípio da emissão laser”, o meio ativo gera, quando estimulado energeticamente, o conjunto de fótons que vai dar origem ao feixe laser. Este é, portanto, o componente essencial de uma fonte laser, entrando assim no conjunto de características classificativas. O meio ativo pode ser sólido, líquido ou gasoso.

A incidência de radiação sobre um determinado material provoca alterações ao mesmo. Para diferentes comprimentos de onda da radiação incidente, o efeito será distinto. O comprimento de onda está relacionado com a natureza do meio ativo e com o método de geração do feixe, ou seja, a forma de excitação. O conjunto de lasers utilizados na indústria compreende uma gama de radiações que abrange radiação ultravioleta (10-400 nm), luz visível (400-700 nm) e radiação de infravermelhos (700 nm-1 mm).

Quando se trata do comportamento temporal, este pode ser controlado, para que os efeitos da energia transmitida pelo laser sejam mais acentuados ou decresçam. Existem dois modos de operação de uma fonte laser quando se trata de comportamento temporal, nomeadamente contínuo (CW – *continuous wave*) e pulsado (*pulsed laser*), ambos representados graficamente na figura 19. Como o nome indica, um laser contínuo efetua as operações para as quais é pretendido sem qualquer interrupção, emitindo assim um feixe durante determinado período de tempo sem qualquer descontinuidade. Outro modo de operação consiste no laser pulsado que, sucessivamente, emite um pico energético, de intensidade e duração regulável, com tempos de duração que podem ser inferiores a 1 ns. Uma das utilidades deste segundo tipo será, por exemplo, a redução da zona afetada pelo calor (ZAC) devido à quantidade de calor que é transmitida à peça, cuidado necessário a ter em determinados processos de fabrico de modo a obter um produto final de acordo com os requisitos desejados [11], [16], [18].

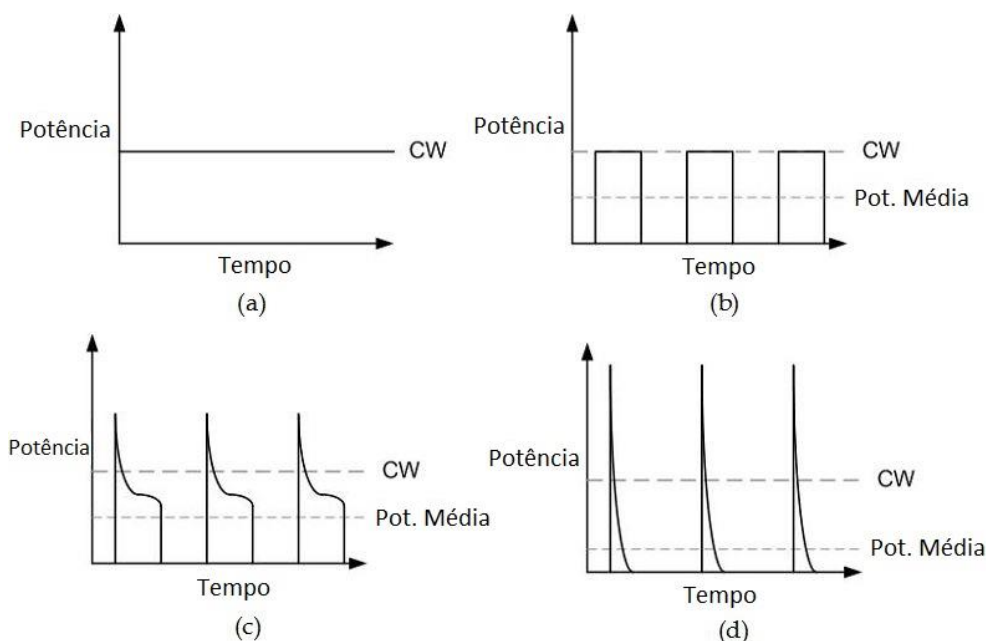


Figura 19 - Representação gráfica do modo contínuo (a) e diferentes modalidades de modo pulsado (b, c e d) [16]

2.3.3 Parâmetros caraterísticos da radiação laser

Neste subcapítulo, serão referidos os parâmetros caraterísticos da radiação laser relevantes para a operação de máquinas que utilizem fonte laser para processamento de materiais.

- Energia: capacidade de produzir trabalho, exprime-se em Joule [J].
- Potência: também designado por fluxo energético, corresponde à energia emitida por intervalo de tempo, exprime-se em Watt [W].
- Densidade de potência: razão da potência transmitida pela área da secção transversal do feixe, também designada por irradiância. As unidades são expressas em potência por área, sendo a forma mais usual Watt por centímetro ao quadrado [W/cm^2].
- Fluência: atendendo a que um feixe laser pode operar intermitentemente, ou que a potência incidente numa dada área pode variar em função do tempo, este parâmetro pode ser definido como a energia total fornecida dividida pela área abrangida, também referida como densidade de energia. As unidades de expressão deste parâmetro são de energia por área, sendo a forma de apresentação mais comum Joule por centímetro ao quadrado [J/cm^2]. Este é o fator mais importante em aplicações laser na área da medicina [14], [16].

A partir do controlo dos parâmetros mencionados, é possível prever, aproximadamente, o comportamento dos materiais a trabalhar, assim como o resultado final da operação efetuada. Estes são os parâmetros considerados mais relevantes para a operação de lasers de um modo geral. Pode haver, no entanto, outros a considerar, como a distância focal da lente e a velocidade de avanço do laser, que têm de ser devidamente ajustados. O tipo de operação de processamento, quer seja de materiais ou noutra área de aplicação, levará sempre à necessidade do ajuste dos parâmetros para a forma conveniente e que poderá alcançar melhor resultado.

2.3.4 Tipos de laser

Os lasers podem ser divididos em três categorias principais, divisão essa diretamente relacionada com o seu meio ativo: laser de estado gasoso, laser de estado líquido e laser de estado sólido. Na secção seguinte serão descritos os lasers mais relevantes para a indústria atual, em especial para esta dissertação, com uma descrição do seu funcionamento e especificação das suas aplicações.

Os lasers de estado gasoso podem ainda ser divididos em lasers de átomo neutro, ião ou moleculares, dependendo da constituição do meio ativo ser de átomos neutros, iões ou moléculas gasosas, respetivamente. Neste subcapítulo será efetuada uma abordagem teórica ao funcionamento do laser de CO_2 e ao laser de hélio-néon.

Lasers de estado líquido praticamente não têm aplicação em processos industriais. Isto não implica que sejam irrelevantes noutras áreas científicas. Um dos lasers de estado líquido mais utilizados é o laser de corante, que utiliza um corante orgânico como meio ativo, normalmente em estado líquido. Atualmente têm aplicação prática na astronomia, medicina, espectroscopia e separação atómica de isótopos.

O princípio de funcionamento de lasers de estado sólido assenta em iões suspensos numa matriz de cristais para gerar o feixe laser. Quando excitados, os iões emitem eletrões sendo da responsabilidade da matriz cristalina a transmissão de energia entre os iões. O primeiro laser de estado sólido foi o laser de rubi. Encontra-se atualmente em desuso devido à sua baixa eficiência. O tipo de laser mais comum dentro desta categoria é o laser Nd-YAG,

havendo também neste subcapítulo da dissertação uma descrição teórica do funcionamento do laser Yb-YAG, laser de fibra e laser de díodos.

Laser CO₂

O laser de CO₂ (dióxido de carbono) é o laser mais típico, dentro da subcategoria dos lasers moleculares, que emite radiação laser com comprimento de onda de 10,6 μm (radiação de infravermelhos de nível médio). O meio ativo é constituído por uma mistura de CO₂ (dióxido de carbono), He (hélio) e N₂ (azoto), em percentagens de 6%, 10% e 84%, respetivamente. Esta é a mistura mais usual, podendo haver alterações, dependendo do fabricante da fonte laser. A gama de potência mais vulgar deste tipo de tecnologia varia entre os 100 W e os 25 kW, podendo chegar aos 100 kW para aplicações excecionais, permitindo assim a sua aplicação na grande maioria dos processos de fabrico. Quando se tratam de aplicações relacionadas com soldadura, são exigidos níveis de potência na ordem de 1,5 kW, aproximadamente, como valor mínimo.

Existem diversas tecnologias laser CO₂, que variam consoante a potência máxima extraída da cavidade ótica e a qualidade do feixe laser obtido. Este tipo de fontes laser pode ser classificado segundo o tipo de caminho ótico interno, a forma de excitação e o método de arrefecimento [19].

Em relação ao caminho ótico interno existem dois tipos, óticamente estável e óticamente instável. No primeiro caso, o feixe passa apenas por um espelho parcialmente transparente. Consequentemente, quando se tem um laser com elevada potência e um diâmetro reduzido, existem normalmente problemas de estabilidade térmica provocada pela carga térmica incidente no espelho. No segundo caso, a cavidade ressonante tem espelhos 100% refletores, em que o feixe é refletido para o exterior da mesma cavidade após ter percorrido um determinado trajeto. Estes são muito sensíveis ao desalinhamento de qualquer componente ótico durante o seu caminho. As cavidades instáveis têm como vantagem o facto de a geometria da cavidade poder ser facilmente adequada ao meio ativo em causa [20].

O modo de excitação pode ser efetuado por radiofrequência ou por geradores de corrente contínua. Os geradores de corrente contínua são compostos por dois eletrodos situados no meio ativo e produzem uma descarga elétrica que excita os respetivos eletrões. É possível obter uma razoável eficiência apesar dos custos associados a uma manutenção regular. Este método de excitação tem ainda a possibilidade de obtenção de um modo pulsado de alta frequência. A excitação por radiofrequência é cada vez menos frequente como método de excitação para fontes de laser CO₂.

Quanto ao tipo de arrefecimento, existem, atualmente, 4 tipos: fluxo lento, fluxo axial rápido (figura 20), fluxo transversal (figura 21) e tipo *slab* arrefecido por difusão (figura 22). Na tabela 2 são apresentadas as características, mais relevantes para o funcionamento, dos métodos de arrefecimento mencionados [21].

Tabela 2 – Métodos de arrefecimento de fontes de laser CO₂ e principais características [21]

Fluxo lento	• Arrefecimento pelas paredes da cavidade, arrefecidas por água • Usado em fontes laser com potência máxima de 2 kW • Pressão imposta pelo meio ativo
Fluxo axial rápido (figura 20)	• Fluxo de arrefecimento entra no eixo principal do laser a uma velocidade de 300 a 1000 m/s • Gás tem dupla função, constituir meio ativo e refrigerante • Arrefecimento por convecção
Fluxo transversal (figura 21)	• Idêntico à segunda e terceira propriedades do arrefecimento de fluxo axial rápido • Escoamento feito de forma perpendicular ao eixo principal, mais eficiente que o fluxo axial rápido, consequentemente usado em unidades mais compactas • Qualidade de feixe obtido inferior
Tipo slab arrefecido por difusão (figura 22)	• Cavidade estanque sem fluxo de gás • Excitação obtida por radiofrequência • Arrefecimento por difusão dos elétrodos de grande dimensão • Gás do meio ativo é periodicamente renovado por uma bomba de vácuo

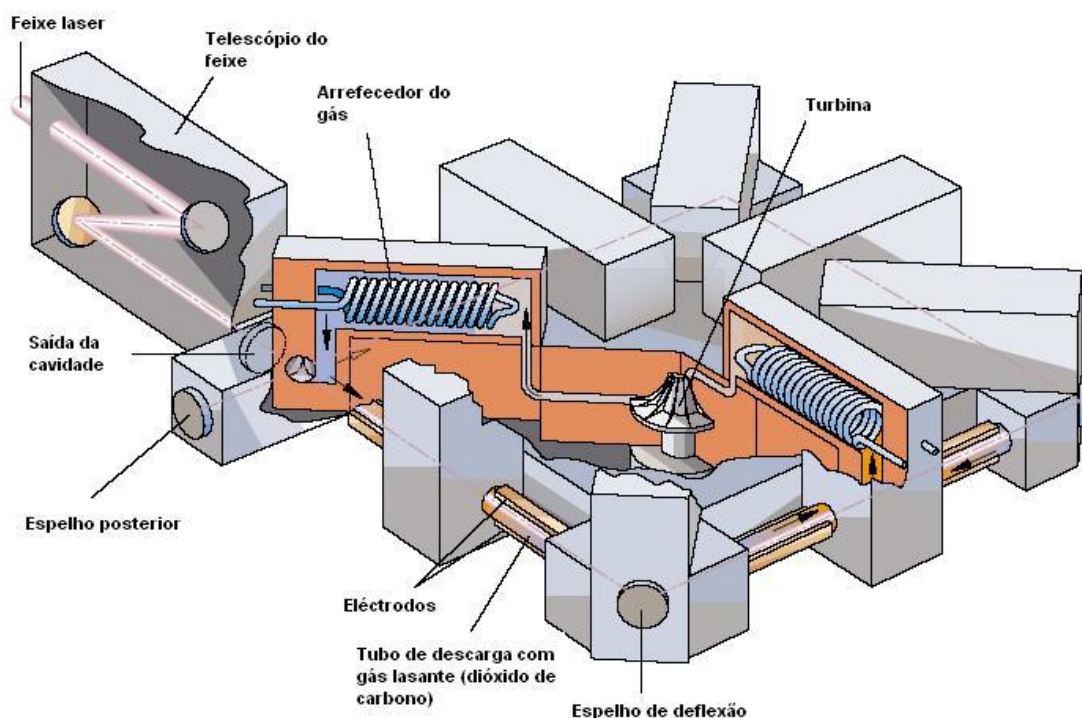


Figura 20 - Fonte laser com arrefecimento de fluxo axial rápido (adaptado de [22])

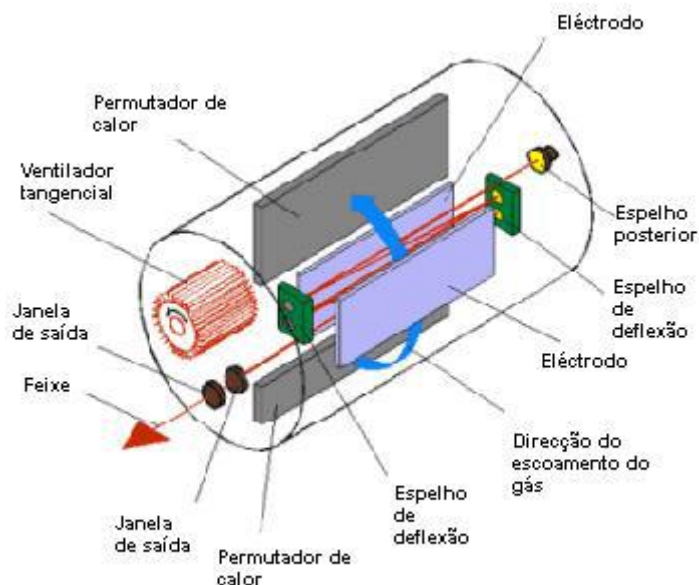


Figura 21 – Fonte laser com arrefecimento transversal (adaptado de [31])

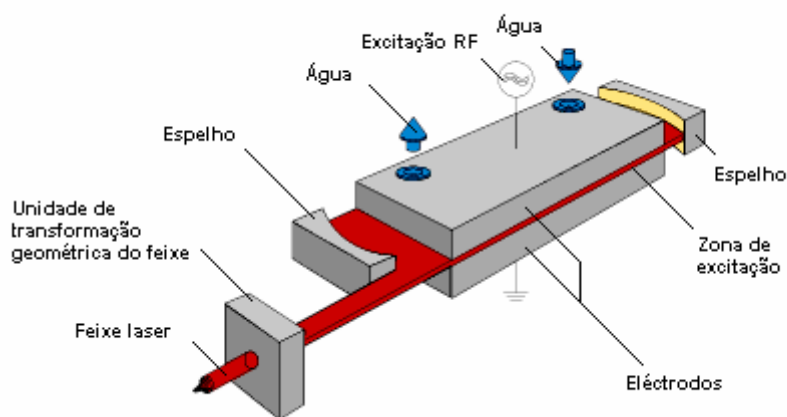


Figura 22 – Fonte laser tipo slab arrefecido por difusão (adaptado de [11])

Laser Hélio-Néon

Quando se abordam lasers de átomo neutro, é mais comum referir o laser He-Ne (figura 23), um dos mais típicos desta categoria cujo comprimento de onda é usualmente 632,8 nm. É, no entanto, regulável desde radiação infravermelha até vários comprimentos de onda de luz visível.

A mistura está feita com determinada percentagem de cada constituinte, dependendo do fabricante, e é durante o processo descarregada eletricamente dentro de um tubo de baixa pressão. Inicialmente são excitados os átomos de hélio, devido ao facto de terem uma energia de transição mais baixa que os átomos de néon. Ainda assim sendo o néon um átomo com energia de transição bastante próxima da do hélio, através de interações cinéticas, a energia é prontamente transferida do hélio para o néon, emitindo assim a radiação laser desejada a partir do néon.

Este é um tipo de laser com uma potência abaixo dos 50 mW, meramente usado para fins holográficos, efetuar medições ou comunicação através de fibra ótica. É o mais popular laser de luz visível. A nível industrial, apenas tem função de apontador para operação, programação ou calibração de máquinas [14].



Figura 21- Constituição e funcionamento esquemático do laser He-Ne (adaptado de [32])

Laser Nd-YAG (rod laser)

A sigla Nd-YAG resulta do acrónimo “*neodymium-doped yttrium aluminium garnet*”. O meio ativo neste tipo de laser é óxido de ítrio e alumínio cristalino dopado com iões de neodímio (Nd^{3+}), ilustrado na figura 24. Este composto apresenta-se sob a forma de cristal num formato de varão (proveniente do termo inglês *rod*) com a fórmula química $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

O meio ativo era inicialmente excitado através de lâmpadas de *flash* (Krypton ou Xenon), em modo contínuo, que geram luz a partir das transições entre níveis energéticos dos iões de neodímio. Posteriormente, a excitação do meio ativo neste tipo de lasers veio a ser feita através de lasers de díodos, que se provou ser muito mais eficiente. Estes elementos constituem o módulo de emissão estimulada e geram um feixe laser com comprimento de onda de 1064 nm. É possível agregar vários módulos, de forma a conseguir produzir lasers com potências superiores a 5 kW.

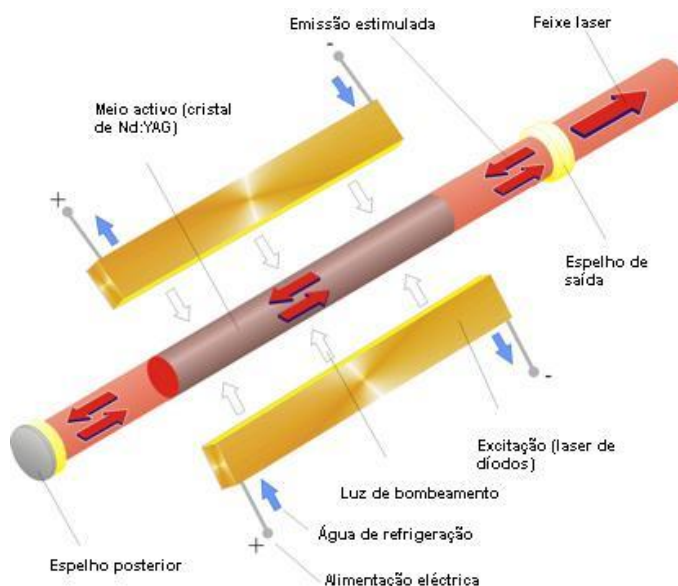


Figura 22 - Laser de Nd:YAG com excitação por díodos (adaptado de [33])

Depois de produzido o laser, este é direcionado para a estação de trabalho, através do convencional sistema de espelhos, ou então, é transportado por um sistema de fibra ótica cujos diâmetros podem variar desde 0,1 até 0,4 mm. A grande vantagem deste método de transporte é a possibilidade de ser transmitido ao longo de dezenas de metros devido ao seu comprimento de onda de 1064 nm.

No caso dos lasers YAG pulsados, encontram-se algumas diferenças, justamente no modo como se excitam os iões de neodímio. As lâmpadas de *flash* são alimentadas a diferentes frequências e durações de impulso, perfeitamente definidas e reproduzíveis ao

longo do tempo. Cada impulso elétrico corresponde a uma emissão de feixe laser. O perfil temporal e energético emitido por cada impulso laser é regulado por um sistema que controla as lâmpadas *flash*, já que são estas os elementos responsáveis pela excitação dos íons de neodímio [19], [21], [22].

Laser Yb-YAG (*disc laser*)

Os lasers Yb-YAG, normalmente designados por lasers de disco, apareceram pela primeira vez no mercado em 2003 e representam uma solução inovadora face à resolução dos principais problemas dos lasers Nd-YAG, tais como a qualidade do feixe e a dissipação de calor. O meio ativo é apresentado em formato de disco, com diâmetros inferiores a 15 mm e espessuras de aproximadamente 0,2 mm. Esta geometria permite um arrefecimento muito mais eficaz e, conseqüentemente, qualidade de feixe muito superior. O disco assenta num dissipador de calor, que tem a função de retirar o calor em excesso proveniente do aquecimento durante a geração do feixe, mantendo assim o disco dentro de uma gama de temperatura aceitável para funcionamento contínuo. A excitação através de díodos (figura 25) é uma vantagem adicional, dada a sua eficiência quando comparada com as lâmpadas de *flash*.

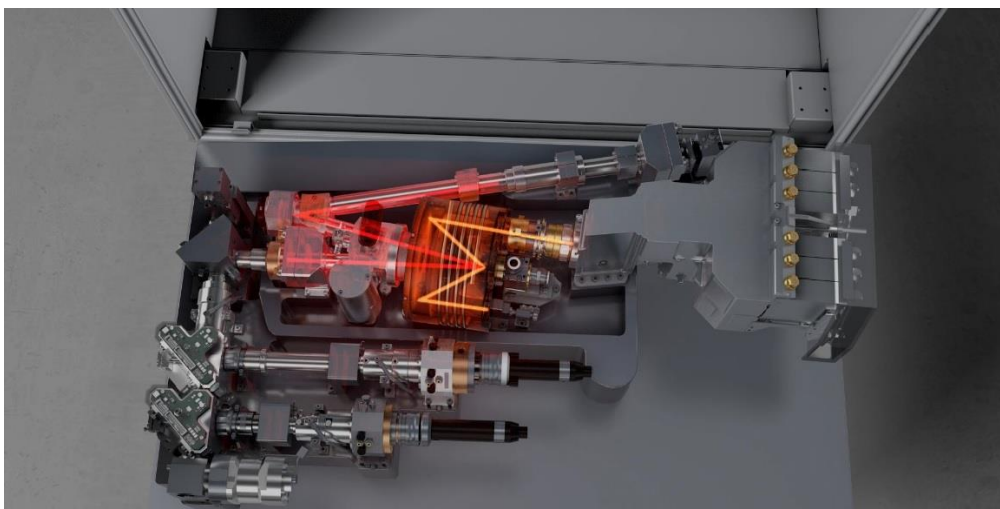


Figura 23 - Fonte laser Yb-YAG com díodos de bombardeamento à direita [34]

Nos lasers de disco o neodímio é substituído por itérbio. Uma das principais vantagens do itérbio comparativamente ao neodímio trata-se dos seus íons serem mais apropriados para ocupação dos interstícios da malha de YAG, obtendo-se assim níveis de excitação superiores e maior eficiência no processo de inversão da população de eletrões.

A luz laser proveniente de díodos é utilizada na excitação do meio ativo, focada até um diâmetro de poucos milímetros, dependendo da fonte em questão, e posteriormente direcionada para o disco. A baixa espessura do disco leva a que este absorva apenas uma pequena fração da radiação que o atravessa, tornando-se necessário que o feixe passe pelo disco 16 vezes, de modo a aumentar a duração da absorção de radiação proveniente da excitação, com recurso a espelhos de curvatura, um espelho traseiro e um espelho parabólico, esquematizados na figura 26. Quando se completa este processo, a absorção de radiação já se encontra praticamente terminada e o espelho traseiro reencaminha uma última vez o feixe para o disco que vai ser extraído da cavidade ótica através do espelho de saída, localizado no exterior da cavidade, a partir de um furo no centro [11], [17]–[19].

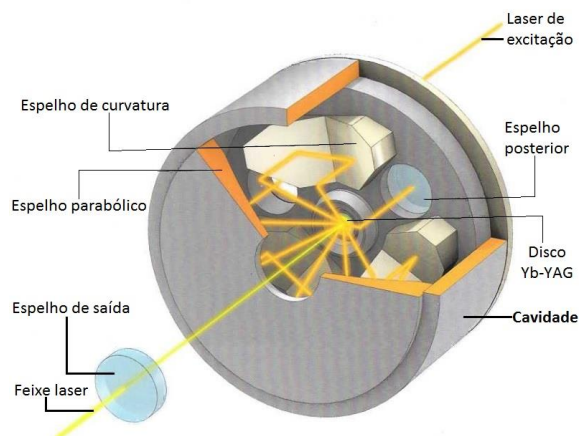


Figura 24 – Interior do gerador laser de uma fonte laser de disco (adaptado de [19])

Laser de fibra ótica

Contrariamente aos lasers de estado sólido abordados anteriormente, os lasers de fibra ótica não necessitam de qualquer método de refrigeração. Tendo em conta que a área superficial é elevada em relação ao seu volume, a dissipação do calor para o ambiente exterior torna-se suficiente como forma de arrefecimento. A amplificação, e consequentemente a potência, pode ser aumentada com o ajuste do comprimento da fibra. Neste tipo de fontes laser componentes tais como espelhos e meio ativo não necessitam ser ajustados individualmente, dado que idealmente a cavidade ótica é constituída por uma longa e fina fibra de quartzo. O espelho de fim de curso e espelho de saída estão integrados na parte final da fibra. A fonte laser está diretamente conectada a um transportador de fibra ótica. Todos os elementos para geração e condução do feixe laser formam, portanto, uma fibra contínua. A isto chama-se *design* monolítico. Os elementos interiores de um laser de fibra podem ser observados na figura 27.

Aplicações dos lasers de fibra de baixa potência são encontradas amplamente na área das telecomunicações ou na indústria das artes gráficas. Para processamento de materiais, que requerem elevados níveis de potência, a gama de lasers disponível é muito mais reduzida, dada a dificuldade em obter potências de alguns quilowatts. Atualmente, só é possível utilizar este tipo de tecnologia na indústria pela combinação de vários feixes laser em paralelo. Investigadores e fabricantes procuram nos dias de hoje diferentes soluções construtivas no *design* dos lasers de fibra, mas neste enquadramento teórico apenas se irá abordar uma delas.

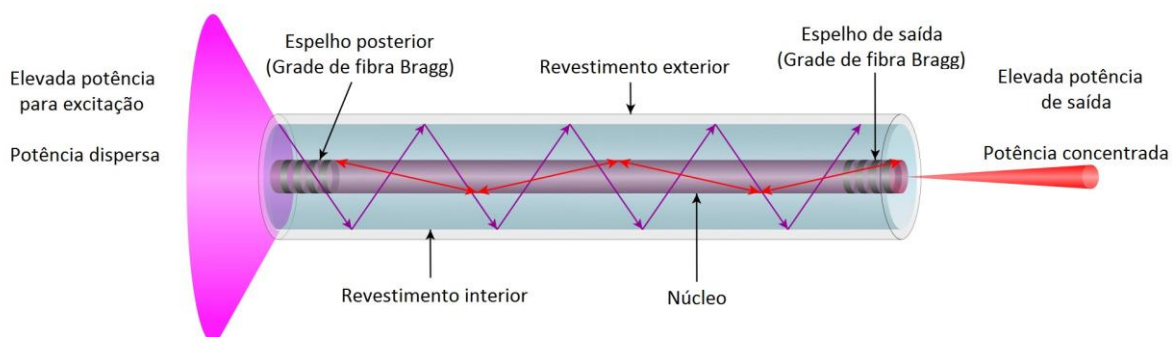


Figura 25 - Interior de um laser de fibra ótica (adaptado de [35])

Para obtenção de elevada potência com lasers de fibra, são utilizadas vulgarmente fibras de quartzo duplamente revestidas, dopadas com itérbio. Este tipo de fibras tem espessura inferior a 1 mm e é constituída por três zonas, sendo elas o núcleo onde é gerado e propagado o feixe laser, o revestimento interior, designado por revestimento de bombardeamento, para circulação da luz laser dispersa, e finalmente um revestimento exterior, que evita que a luz

laser gerada abandone a fibra e assegure a proteção dos elementos anteriormente mencionados. As três zonas têm índices de refração diferentes, sendo que cada zona tem índice de refração inferior ao da zona que se encontra no seu interior. Por causa disto, a luz é completamente refletida no limite exterior de cada zona, levando a que o laser se concentre no interior do núcleo, sem entrar no revestimento exterior.

Nos lasers de fibra, o espelho posterior e o espelho de saída estão normalmente integrados no núcleo da fibra. De forma a refletir o feixe laser, o índice de refração é alterado, ou modulado, a intervalos regulares, criando pequenas zonas com índices refratários altos e baixos. Nestas estruturas, chamadas grelhas Bragg (do termo inglês “*fiber Bragg gratings*”), o período, índice de refração e número de modulações podem variar indefinidamente. Deste modo o grau de reflexão de uma grelha de Bragg pode ser definido para diferentes comprimentos de onda. As grelhas de Bragg, altamente refletivas, são utilizadas como espelho traseiro, enquanto o caso oposto é utilizado como espelho de saída.

Um dos maiores desafios para esta recente tecnologia é o método de excitação do meio ativo, que terá de direcionar a luz laser para o revestimento de bombardeamento. Devido a este obstáculo, e também pela baixa área da secção transversal do revestimento de bombardeamento, a luz laser emitida por díodos é primeiramente direcionada para fibras de transporte que estão ligadas à face inicial da fibra laser. A estrutura afunilada da conexão permite que a luz emitida por vários díodos proveniente de diferentes fibras de transporte acabe por convergir em direção ao espelho traseiro. Pode-se constatar então, que a luz laser não é direcionada para a parte final da fibra, é, no entanto, excitada ao longo da fibra. Neste caso a fibra ótica direciona a luz laser para o revestimento tornando possível que ainda mais luz seja gerada, conseguindo assim potências mais elevadas [14], [19].

Laser de díodos

Lasers de díodos encontram-se atualmente entre os mais vendidos e utilizados em diferentes aplicações, tanto a nível de bens de consumo como a nível industrial (figura 28). Na informática e telecomunicações esta tecnologia permite a conversão de sinais digitais em sinais de luz que podem percorrer o planeta em cabos de fibra ótica. Na tecnologia da medição, o feixe laser tanto torna possível a quantificação de distâncias na ordem de quilómetros, como de dimensões de magnitude microscópica. Aparecem amplamente integrados em tecnologia laser de aplicação industrial, como fonte de bombardeamento para outros lasers.

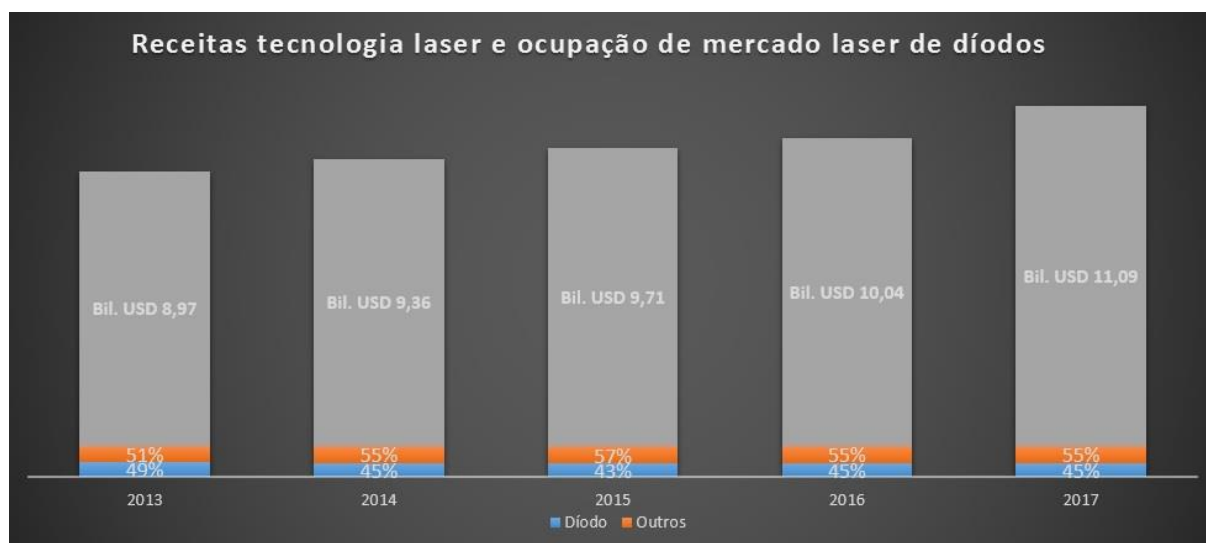


Figura 26 – Faturação mundial da tecnologia laser com representação da ocupação percentual do laser de díodos (adaptado de [10])

O meio ativo dos lasers de díodos são materiais semicondutores de elementos pertencentes aos períodos III, IV e V da tabela periódica. Por este motivo, a constituição mais frequente do conjunto de díodos deste tipo de laser são ligas de GaAs, AlGaAs, InGaAs, InGaAsP, todas com elementos pertencentes aos períodos referidos.

Uma fonte laser deste tipo apresenta um funcionamento diferente dos lasers de estado sólido e gasoso anteriormente mencionados, pois assenta no princípio físico da radiação de recombinação. Os materiais semicondutores possuem uma banda de valência e uma banda de condução. Previamente à excitação, a banda de valência encontra-se totalmente ocupada e a banda de condução livre, correspondendo esta fase a um estado de energia E_g . A excitação da banda de valência provoca a transferência de eletrões para a banda de condução, sendo a banda de valência ocupada em zonas de menor energia pelos restantes eletrões. Com este processo, são definidos dois novos estados energéticos E_{fc} e E_{fv} , como se pode observar na figura 29, e que cumprem a condição da equação 2.6. Quando fótons colidem com os eletrões na banda de condução, a energia é libertada de acordo com a lei de Planck, também ilustrada na figura 29, tendo sido já mencionada e ilustrada na equação 2.1 e figura 10, respetivamente.

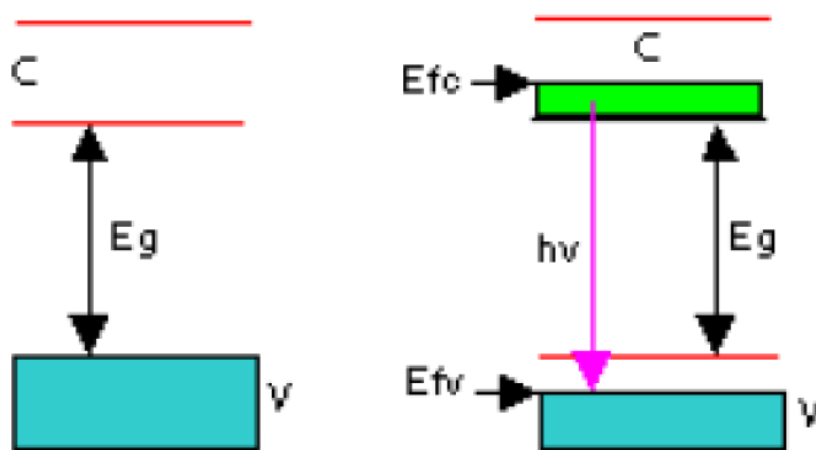


Figura 27 – Princípio físico de funcionamento do laser de díodos (adaptado de [14])

A condição representada na figura 29 traduz-se pela expressão [14]:

$$E_g < h \cdot \nu < E_{fc} - E_{fv} \quad (2.6)$$

Onde:

E_g , é a energia do estado inicial, em Joule [J]
 h , é a constante de Planck em Joule segundo [J.s], em que $h=6,626 \times 10^{-34}$ [J.s]
 ν , é a frequência de transição do eletrão, em Hertz [Hz]
 E_{fc} , é a energia do estado energético mais alto da banda de condução, em Joule [J]
 E_{fv} , é a energia do estado energético mais alto da banda de valência, em Joule [J]

Cada gerador de díodos emite um feixe com uma potência geralmente compreendida entre 20 e 50 W e de área extremamente reduzida, cerca de 1x1 micrómetros. Estas áreas podem ser combinadas de forma a formar uma barra para posteriormente a combinação de barras, formar a cavidade ressonante do laser. A potência ao alcance desta tecnologia está diretamente relacionada com o número de barras utilizadas. A junção de barras designa-se por pilha (traduzida do termo inglês *stack*) e terá necessariamente de estar ligada a um dissipador de calor. Atualmente, a Rofin Sinar produz geradores de díodos bastante compactos com potências da ordem de 3 kW. [21]

No que toca ao processamento de materiais, a aplicação direta deste tipo de tecnologia já está, no entanto, limitada a uma reduzida gama de processos. As razões para esta afirmação baseiam-se na potência e qualidade do feixe laser, devido à dificuldade na obtenção de pontos focais de diâmetro igual ao das fontes laser apresentadas anteriormente para os mesmos

valores de potência. Nos dias de hoje, é possível gerar potência laser média e alta com boa qualidade de feixe. As aplicações industriais deste laser restringem-se a processos que não requerem um baixo diâmetro de foco, tais como tratamento de superfícies, soldadura de plásticos e soldadura por condução [11], [19].

2.3.5 Tecnologia disponível na Quantal S.A.

A Quantal S.A. é uma empresa pertencente ao setor da indústria metalomecânica que trabalha amplamente com aplicações laser para processamento de materiais. Após um reconhecimento da tecnologia existente na empresa, foi possível verificar a existência de diferentes tipos de fonte laser e as respectivas aplicações neste setor da indústria, que se encontram na tabela 3.

Tabela 3 - Tecnologia laser existente na empresa Quantal S.A.

Marca e modelo da fonte laser	Tipo de laser	Meio ativo da fonte laser	Processo de fabrico
Trumpf TFL 4000 Turbo	Laser de estado gasoso	Mistura gasosa de CO ₂	Corte Laser 2D/3D
Trumpf Tru Disk 300	Laser de estado sólido	Disco de Yb-YAG	Corte Laser 2D/3D
Trumpf TLF 5000	Laser de estado gasoso	Mistura gasosa de CO ₂	Corte Laser 2D
Trumpf TruFlow 6000	Laser de estado gasoso	Mistura gasosa de CO ₂	Corte Laser 3D
Trumpf HL 3306D	Laser de estado sólido	Varão de Nd-YAG	Soldadura Laser

2.4 Soldadura Laser

2.4.1 Funcionamento

O princípio da soldadura laser consiste no fenómeno de fusão do material a unir no ponto de impacto do feixe laser. Todo o processo de soldadura que envolva fusão requer alta concentração energética do local a fundir, sendo neste caso conseguida essa concentração através da regulação do diâmetro e posicionamento do ponto de focagem do sistema ótico. A soldadura laser pode ser realizada de diferentes modos, nomeadamente, por condução, penetração e *keyhole*. O método que garante maior penetração, devido à concentração energética do laser, é soldadura por *keyhole*.

A partir de determinados valores de densidade de potência (10^5 a 10^6 W/cm²) o laser dá origem ao *keyhole* (termo inglês que designa o furo originado e representado na figura 30) que contém vapores metálicos. Na soldadura por *keyhole* o fenómeno de transferência de calor predominante é a convecção, dado que paredes do furo são constituídas por metal líquido. O banho de fusão, conjunto das duas partes anteriormente descritas, é deslocado ao longo da superfície de contacto das duas peças de forma a promover a sua união, e solidifica à medida que o laser continua o trajeto. Este fenómeno apenas acontece quando se pratica soldadura por feixe contínuo. No caso de soldadura por feixe pulsado, o cordão de soldadura é criado através de pontos sobrepostos. Como resultado de repetidos picos de energia, e à semelhança do feixe contínuo, o material entra em fusão, ou evapora em alguns casos, instantaneamente seguido de condensação e imediata solidificação. Para densidades de potência abaixo de 10^5 W/cm² a soldadura apenas se dá por condução, ou seja, difusão do calor transmitido à superfície do material [11], [19].

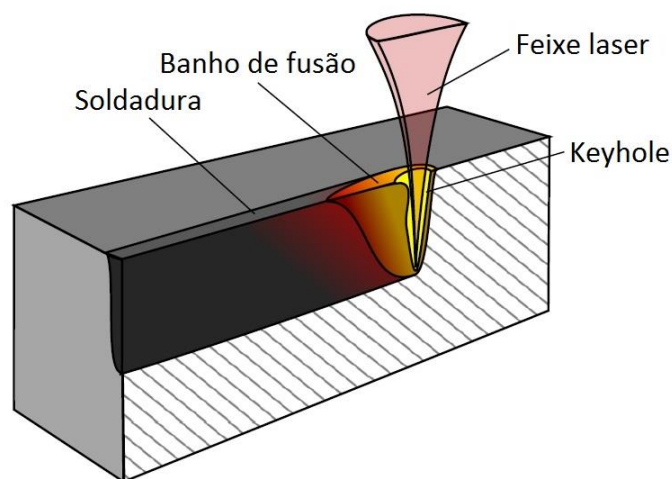


Figura 28 - Soldadura laser do tipo *keyhole* (adaptado de [36])

2.4.2 Soldadura laser como processo de fabrico

Na indústria metalomecânica atual é possível encontrar, nas empresas mais evoluídas tecnologicamente, produção de peças em série com elevada cadência, recorrendo a soldadura laser. A execução de um processo de fabrico requer preparação antes de qualquer implementação.

Na soldadura laser, e em qualquer processo de fabrico, existem certos parâmetros que governam todo o processo. No caso em estudo, estes parâmetros determinam o desempenho do processo atendendo ao laser (fonte e sistema de transmissão ótico) e aos materiais a soldar. Antes de produzir é fundamental planear, logo um bom domínio e conhecimento da influência destes parâmetros na qualidade final do produto e na rentabilidade do processo são um requerimento básico para poder estimar cadências de produção. Preparação da fonte laser, focagem, gás de proteção e material a soldar são as principais considerações, cada uma delas contendo os respetivos parâmetros.

Feixe laser

Uma das características essenciais do feixe laser é a distribuição de energia espacialmente, isto é, o modo transversal (TEM). O modo Gaussiano é o que permite obter a mais alta concentração de energia no ponto focal, sendo por isso tomado como modo de referência. As fontes laser industriais podem produzir feixes com distribuições de energia, em modos transversos, muito diferentes do modo Gaussiano. Existe um coeficiente adimensional que permite medir a qualidade dos feixes laser comparativamente ao feixe de referência, nomeado M^2 , ou K em alternativa. Este coeficiente é determinado com base na seguinte relação [11]:

$$M^2 = \frac{1}{K} = \frac{\pi \cdot D \cdot \theta}{4\lambda} \quad (2.7)$$

Onde:

M^2 e K , representam o coeficiente que permite a medição da qualidade do feixe, adimensional
 D , é o diâmetro do feixe à saída do sistema ótico, em milímetro [mm]
 θ , é o ângulo de divergência, em radiano [rad], e
 λ , é o comprimento de onda da radiação laser, em milímetro [mm]

Para o modo de referência, Gaussiano, verifica-se $M^2=1$. A utilização deste coeficiente de qualidade é essencial, pois torna possível a comparação dos feixes produzidos pelas diferentes fontes laser e acima de tudo permite calcular o diâmetro de foco de acordo com as características do laser.

Quando se trata de conhecer a energia depositada na peça, esta é determinada pela potência e pela velocidade de acordo com a fórmula [14]:

$$E = \frac{P}{V} \quad (2.8)$$

Onde:

E, é a quantificação da energia linear, em Joule por metro [J/m]

P, é a potência da fonte, em Watt [W], e

V, é velocidade de avanço do feixe laser, em metro por segundo [m/s].

É possível relacionar a energia linear com a penetração de soldadura e o volume de material fundido. Para uma potência constante, a diminuição da velocidade leva a um aumento da penetração e, conseqüentemente, um aumento do volume de metal fundido, aumentando a largura do cordão de soldadura e a dimensão da zona afetada pelo calor (ZAC). Esta relação manifesta-se de modo diferente para cada material. Na figura 31 encontra-se um gráfico que ilustra o relacionamento destes parâmetros num aço inoxidável, AISI 304 [11], [14].

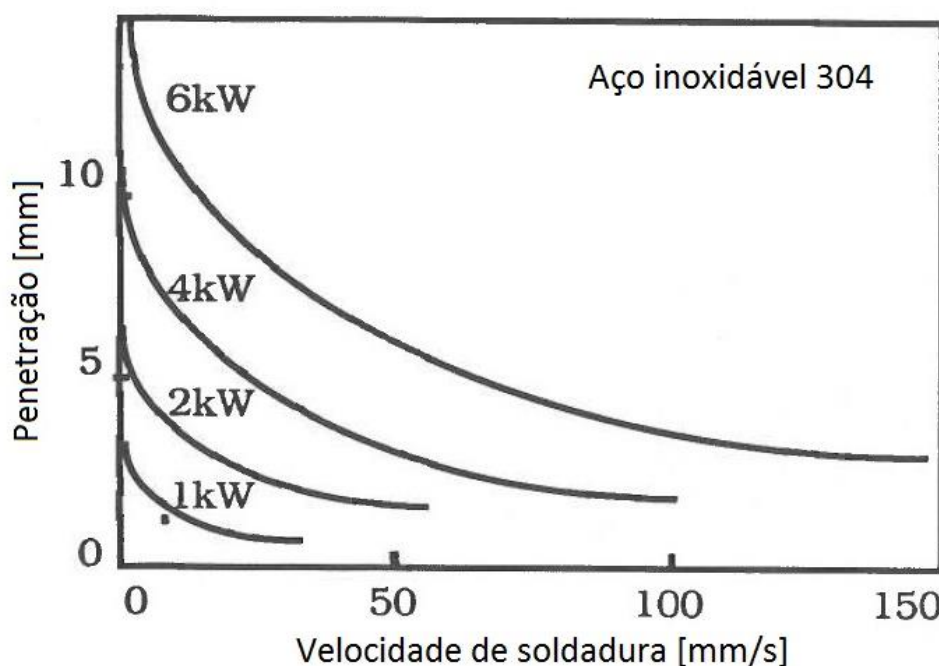


Figura 29 – Gráfico de relacionamento da penetração com a velocidade de soldadura em função da potência do laser para aço inoxidável 304 (AISI 304) [23]

Focagem do sistema ótico

Tanto lentes como espelhos são capazes de focar o feixe laser com qualidade comparável, mas os seus princípios de operação, transmissão e reflexão, tornam a lente menos resistente no decorrer do processo. Com base neste motivo, são destacadas ambas para diferentes tipos de aplicação. No caso do laser CO₂, com potência inferior a 1,5 kW, é geralmente utilizada a lente, de forma a conseguir a melhor qualidade de foco possível. Para aplicações de potência superior a 1,5 kW, opta-se habitualmente pelo espelho, parabólico ou esférico nalguns casos, para beneficiar de maior tempo de vida útil. Em lasers YAG, independentemente da potência, a lente é utilizada. Estes são alguns exemplos das

considerações a ter na utilização de lente ou espelho como componente de focagem integrado no sistema ótico.

Um dos essenciais parâmetros da soldadura laser é o diâmetro do ponto de focagem do feixe, dado que está diretamente relacionado com a densidade de potência. A partir do fator de qualidade M^2 , é possível aproximar o diâmetro real do feixe pela seguinte relação [11]:

$$d = M^2 \cdot \frac{4 \cdot \lambda \cdot F}{\pi \cdot D} \quad (2.9)$$

Onde:

d , é o diâmetro do feixe laser no ponto de focagem, em milímetro [mm]
 M^2 , é o coeficiente de medição da qualidade do feixe, adimensional
 λ , é o comprimento de onda da radiação laser, em milímetro [mm]
 F , é a distância focal da lente, em milímetro [mm], e
 D , é o diâmetro do feixe à saída do sistema ótico, em milímetro [mm]

Na figura 32, a distância F , da equação 2.9, encontra-se representada pela letra minúscula f . A representação desta figura é referente a sistemas óticos com duas lentes distintas. Para sistemas óticos que apenas necessitam da regulação da distância da lente focal, é válida a equação 2.9. No caso de ser necessário regular a distância da lente focal e da lente de colimação, visível na figura 32, já entra em vigor uma nova equação para o diâmetro do feixe laser à entrada do sistema ótico (equação 2.10).

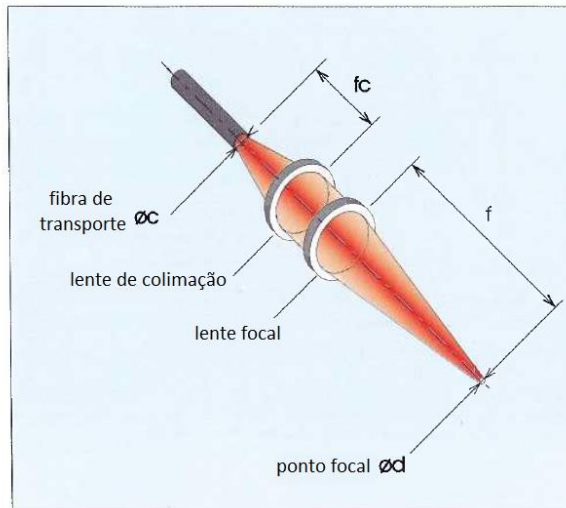


Figura 30 – Representação do ponto focal e lentes do sistema ótico (adaptado de [11])

De acordo com a figura 28, e para casos em que o sistema ótico integre duas lentes, o diâmetro do feixe laser à entrada do sistema surge na equação [11]:

$$\phi d = \frac{f}{f_c} \cdot \phi c \quad (2.10)$$

Onde:

ϕd , é o diâmetro do feixe laser no ponto de focagem, em milímetro [mm]
 f_c , é a distância focal da lente de colimação, em milímetro [mm]
 f , é a distância focal da lente, em milímetro [mm], e
 ϕc , é o diâmetro do feixe à entrada do sistema ótico, em milímetro [mm]

Como os comprimentos de onda e diâmetros à saída do sistema ótico variam de acordo com a fonte laser, a lente pode variar consoante a aplicação necessária, de modo a ajustar o diâmetro de foco. É necessário ter em conta, analisando a equação, que quanto menor o comprimento de focagem, menor será o diâmetro do feixe no ponto de aplicação, resultando assim numa maior densidade de potência. A penetração obtida durante a soldadura é diretamente proporcional à densidade de potência, para os parâmetros de trabalho mais usuais [11], [14], [16], [19].

2.4.3 Gases de proteção e método de aplicação

Na soldadura laser, como em qualquer processo de soldadura que envolva fusão, o metal fundido deve ser protegido da atmosfera envolvente para evitar a contaminação do cordão de soldadura. Este é o papel principal do gás de proteção. A um grau de relevância inferior, o gás de proteção, assegura também que o sistema ótico não é danificado por eventuais salpicos, dependendo do processo de soldadura.

Como já foi referido neste capítulo, para densidades de potência elevadas dá-se a criação do *keyhole*, que vaporiza o metal nele contido. Os vapores metálicos são ionizados e formam um plasma posicionado entre a peça e o feixe. O plasma obtido é consequência de uma boa combinação entre o feixe e o material, sendo, portanto, inevitável para conseguir resultados notórios. Caso esta combinação não seja efetuada corretamente, devido a uma desadequada focagem da lente por exemplo, o feixe é refletido e não se realiza soldadura, não havendo plasma, consequentemente [11]. O gás de proteção pode afetar a formação do plasma e bloquear ou distorcer o feixe, impedindo, consequentemente, a absorção de energia por parte da peça [18].

O efeito de bloqueio do plasma será menor para gases de proteção com potencial de ionização mais elevado. Na tabela 4 encontram-se os potenciais de primeira ionização dos gases mais vulgarmente utilizados em processamento de materiais com tecnologia laser. A partir dessa tabela, pode constatar-se que o hélio é o mais apropriado, apesar do seu preço. Para operações de soldadura às quais não seja obrigatório garantir um elevado nível de qualidade, poder-se-á optar por soluções mais económicas como argon ou dióxido de carbono.

Tabela 4 - Primeiro potencial de ionização de gases de proteção e metais comuns em soldadura laser [18]

Gás de proteção	Primeiro potencial de ionização [eV]	Metal	Primeiro potencial de ionização [eV]
Hélio	24,46	Alumínio	5,96
Árgon	15,68	Crómio	6,74
Néon	15,54	Níquel	7,61
Dióxido de carbono	14,41	Ferro	7,83
Vapor de água	12,56	Magnésio	7,61
Oxigénio	12,50	Manganês	7,41

A diferença na penetração obtida na peça também será significativa de acordo com o gás utilizado, tal como pode ser observado no gráfico da figura 33 para o argon e hélio (gases de proteção mais comuns). Aparentemente, o hélio será sempre o gás de proteção que melhores resultados apresenta independentemente da potência selecionada. No entanto, numa abordagem em que se engloba outro parâmetro, apresentado como velocidade de soldadura a potência constante, o hélio apenas apresenta melhores resultados para baixos valores de velocidade, verificando-se maior penetração com argon quando se atingem as velocidades limite.

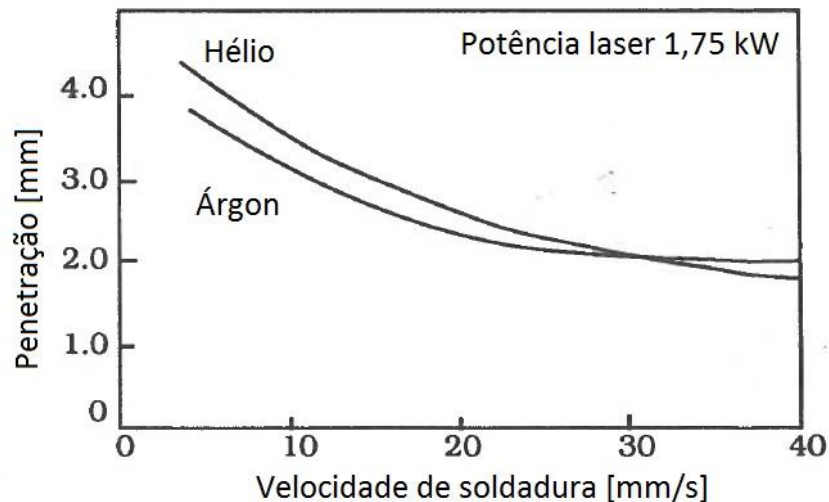


Figura 31 – Penetração de soldadura obtida utilizando hélio ou árgon como gás de proteção, para um laser de potência 1,75 kW [23]

A explicação para o fenómeno revelado na figura 33 encontra-se no facto de o plasma tanto ser benéfico como prejudicial na absorção de energia por parte da peça. Se este se encontrar perto da superfície da peça ou dentro do *keyhole*, torna-se benéfico, caso contrário, se abandonar a superfície da peça ou se tornar demasiado espesso, provoca o efeito de bloqueio ou dispersão do feixe. Por este motivo, o gás de proteção é frequentemente aplicado na soldadura laser com um determinado ângulo de inclinação, inferior a 90°, para que não se encontre na vertical. Com este método de aplicação, como se pode observar na figura 34, é garantido que o plasma não se situa na superfície da peça ou é afastado pelo jato de gás [23].

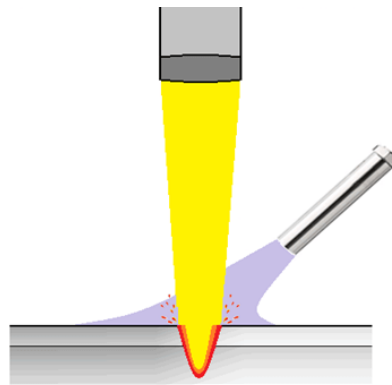


Figura 32 – Aplicação usual do gás de proteção em soldadura laser, com ângulo inferior a 90° [37]

2.4.4 Efeito das propriedades dos materiais

Independentemente da soldabilidade, nem todos os materiais se comportam da mesma maneira quando sujeitos à intensidade energética de um feixe laser. A interação que ocorre entre o laser e o material depende em grande parte da natureza do material irradiado. Materiais de elevada condutividade elétrica são também altamente refletivos e, portanto, muito difíceis de fundir. No caso de elevada condutividade térmica, a energia absorvida irá em grande parte ser transmitida ao resto da peça, provocando o seu aquecimento. Estes são alguns exemplos de obstáculos relativos aos metais a soldar. É apresentado, ainda assim, na tabela 5, um resumo das principais características relativas à soldadura laser dos metais mais frequentemente utilizados neste processo de fabrico.

Tabela 5 - Características de diferentes metais utilizados em soldadura laser [23]

Material	Caraterísticas relevantes no processo
Ligas de Alumínio	Problemas: refletividade, porosidade, elevada fluidez, elevada condutividade térmica
Aços	Boa soldabilidade
Superligas de níquel	Boa soldabilidade. No entanto: soldadura mais quebradiça; problemas de segregação; fratura
Ligas de Titânio	Melhor do que processos de soldadura mais lentos devido a menor crescimento do tamanho de grão
Ligas de Irídio	Suscetível a fratura a quente

Os principais problemas que condicionam a soldadura laser a nível de materiais são comuns à maioria dos processos de soldadura. Na análise da qualidade do processo é importante destacar aspetos como a suscetibilidade à fratura, porosidade, fragilização devido à zona afetada pelo calor (ZAC) e absorção de calor por parte da peça. Na soldadura de metais dissimilares existe o problema adicional da possibilidade de formação de compostos intermetálicos quebradiços, situação comum quando se pretende soldar aço e alumínio, por exemplo.

Materiais como latão, aço zincado, ligas de alumínio-lítio ou magnésio, são sujeitas a volatilização durante a soldadura, resultando assim num cordão de soldadura com porosidade considerável (figura 35). Uma causa da origem da porosidade pode ser também a reação química que se dá na zona de fusão devido à combinação de metais selecionada ou à utilização de um gás de proteção desadequado aos parâmetros e condições de soldadura. Para controlo eficiente deste problema, deve-se ter especial atenção à seleção dos parâmetros de soldadura em função dos materiais a soldar, adicionar um elemento estabilizador ou controlar rigorosamente a taxa de pulsação do laser.

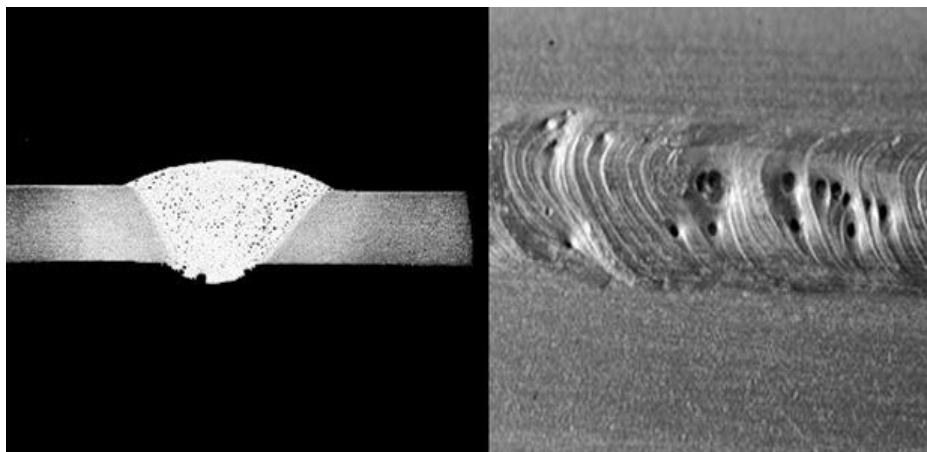


Figura 33 – Porosidade interior (esquerda) e exterior (direita) evidente num cordão de soldadura [38]

A suscetibilidade à fratura refere-se à possibilidade da ocorrência de fratura do cordão de soldadura e em que medida se pode dar este fenómeno. Acontece devido às tensões de contração durante o arrefecimento, antes da soldadura se encontrar totalmente solidificada e estruturalmente resistente para ser solicitada deste modo. É de notar que este fenómeno é mais passível de acontecer em materiais com um amplo intervalo de temperaturas de solidificação, mais comum para aços com elevadas percentagens de carbono. Entre as soluções existentes para prevenção ou até mesmo eliminação de fratura na solidificação estão a utilização de uma elevada taxa de pulsação do feixe laser, adição de metal apropriado ou pré-aquecimento da junta. Na tabela 6 são apresentados alguns materiais metálicos utilizados em soldadura laser,

ordenados relativamente à suscetibilidade à fratura. O fenómeno de fratura de um cordão de soldadura pode ser observado na figura 36.

Tabela 6 - Suscetibilidade à fratura e composição de alguns materiais utilizados em soldadura laser [18]

Liga	Susc. à fratura	Composição (%)							
		C	Si	Mn	Cu	Fe	Ni	Cr	Mo
Hastelloy B2	Elevada ↓ Baixa	0,12	1,0	1,0	-	4-6	Restante	1,0	26
Hastelloy C4		0,12	1,0	1,0	-	4,5-7	Restante	15	16
Inconel 600		0,08	0,25	0,5	0,25	8,0	Restante	15,5	-
Inconel 718		0,08	-	-	0,15	18,5	52,5	19	3
AISI 316		0,25	1,5-3	2,0	-	Restante	19-22	23-26	-
AISI 310		0,25	1,5	2,0	-	Restante	19-22	24-26	-
Hastelloy X		0,15	-	-	-	15,8	49	22	9
AISI 330		0,08	0,7-1,5	2,0	1,0	Restante	34-37	17-20	-
Al 2024		-	-	0,6	4,4	Mg 1,5	Restante Al	-	-



Figura 34 - Fratura de cordão de soldadura pelo eixo central [39]

Soldadura de materiais diferentes só é possível, com qualidade considerada aceitável em soldadura, para certas combinações, mostradas na tabela 7. Devido ao facto de haver uma pequena zona de fusão e solidificação relativamente rápida, a soldadura laser torna possível uma combinação de materiais bastante mais extensa comparativamente a processos de soldadura mais demorados. No entanto, não deixa de existir uma considerável série de combinações com pobre soldabilidade devido à sua composição química e eventuais reacções que possam ocorrer durante o processo de soldadura [11], [18], [19], [24].

Tabela 7 - Qualidade de soldadura para combinações de elementos químicos mais frequentes [18]

	W	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Be	Fe	Pt	Ni	Pd	Cu	Au	Ag	Mg	Al	Zn	Cd	Pb	Sn
W																				
Ta										Excelente Boa Média Fraca										
Mo																				
Cr																				
Co																				
Ti																				
Be																				
Fe																				
Pt																				
Ni																				
Pd																				
Cu																				
Au																				
Ag																				
Mg																				
Al																				
Zn																				
Cd																				
Pb																				
Sn																				

2.4.5 Ocupação de mercado a nível industrial

O laser permite trabalhar com uma gama de espessuras de material muito variada e também adaptar a soldadura laser a diferentes situações, sendo assim um processo bastante abrangente. Com esta capacidade de produtividade bem explorada há, então, possibilidade de competir no mercado com sucesso.

As vantagens comerciais da soldadura laser resumem-se a:

- Reduzida ZAC, com consequente baixa distorção do material e possibilidade de soldar materiais mais sensíveis à soldadura
- Zona de fusão inferior quando comparada com processos de soldadura convencionais, tornando-se esteticamente mais atrativa
- Velocidade de soldadura superior à maioria dos processos existentes
- Facilidade de monitorização e automatização do processo

Naturalmente, a partir destas vantagens, nasce uma vasta gama de aplicações na qual se vê um futuro, de prosperidade considerável, à medida que o preço dos lasers for diminuindo e o avanço científico e tecnológico for aumentando, para tornar estes

processos cada vez mais eficientes. Nos dias de hoje, a soldadura laser não se encontra entre os processos de fabrico mais populares, mesmo a nível de aplicações laser para processamento de materiais. Atualmente, e de acordo com um estudo de mercado realizado em 2016, a soldadura laser de materiais metálicos representa 9% das aplicações da tecnologia laser industrial dedicada ao processamento de materiais (figura 37) [10].

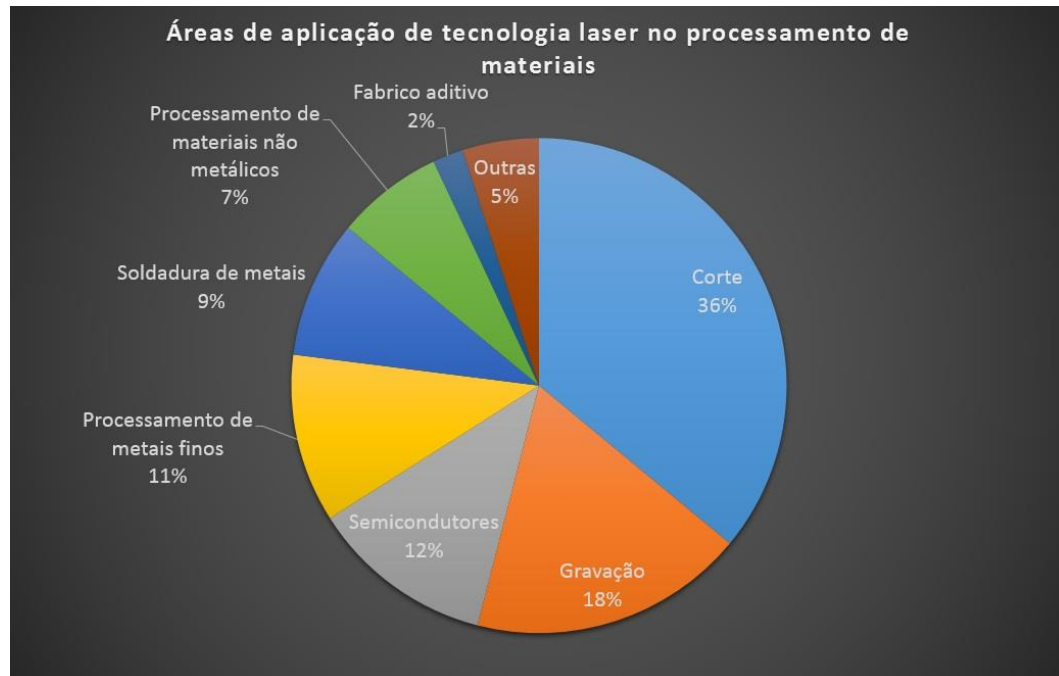


Figura 35 – Aplicações da tecnologia laser para processamento de materiais em 2016 (adaptado de [10])

3 Projeto, Metodologia e Obtenção de Amostras

3.1 Seleção do projeto

Das várias etapas desenvolvidas ao longo do projeto a escolha das peças a estudar constitui uma das mais importantes. Tendo em conta os fatores de interesse para a dissertação, serão apresentadas nos próximos dois subcapítulos as peças consideradas, ou sugeridas na empresa, e que foram rejeitadas, assim como as peças que vão ser estudadas. As peças a estudar constituem um conjunto, sendo utilizada a designação conjunto daqui em diante como forma de mencionar os objetos em estudo. É relevante comentar que os critérios de decisão para a seleção foram os seguintes (sem ordem significativa):

- Material da peça
- Tipo de junta a soldar
- Dimensão da peça
- Complexidade prevista do gabarit a projetar
- Número de peças da série
- Interesse para a empresa

Atendendo a que a dissertação foi realizada em ambiente empresarial, acabou por ter maior peso na decisão o interesse para a empresa de modo a que o desenvolvimento deste projeto contribuísse simultaneamente para a dissertação e para a produtividade da Quantal S.A.

Na empresa Quantal S.A. é atribuída uma referência a cada peça/conjunto que tem o significado apresentado na figura 38, e será através dessa referência que será feita a identificação dos conjuntos. Neste trabalho, os conjuntos serão identificadas apenas pelos primeiros sete dígitos. Esta identificação será efetuada desta forma por questões de simplificação, dado que os sete primeiros dígitos, já a nível interno na Quantal S.A., são suficientes para distinguir os conjuntos/peças em ambiente de trabalho.

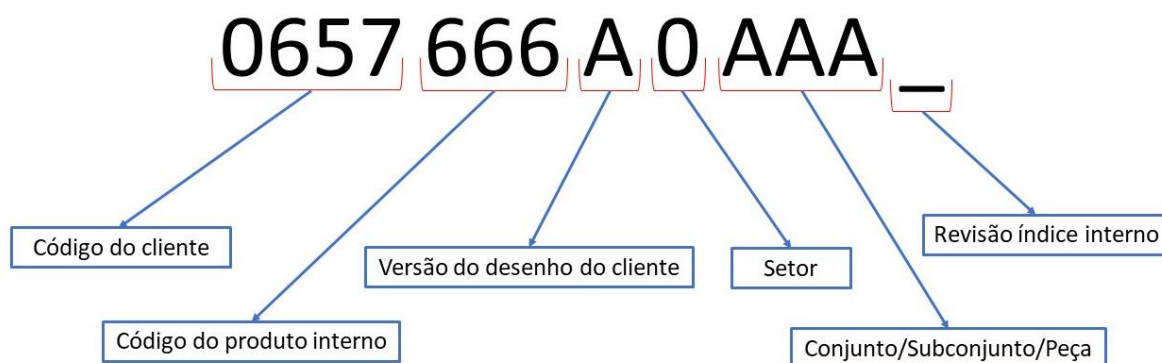


Figura 36 - Código de identificação de produtos na empresa Quantal S.A.

3.1.1 Peças consideradas e rejeitadas

Referência 4449F36

Dado tratar-se de um conjunto de peças de reduzidas dimensões, $80 \times 14 \times 10 \text{ mm}^3$, e necessitar de uma pequena quantidade de soldadura, apenas nas duas cavilhas centradas com os furos exteriores (figura 39), não seria interessante para o trabalho estudar e analisar resultados nesta referência. A ideia inicial seria projetar um gabarit para cerca de 30 conjuntos serem soldados sequencialmente. Como a grande maioria das peças produzidas na Quantal S.A., este conjunto é produzido em aço inoxidável, AISI 304.

Além da informação descrita no parágrafo anterior, a referência em questão já se encontrava em produção, com soldadura TIG manual, quando se decidiu que seria uma possível candidata ao estudo nesta dissertação. Apesar de todos estes fatores, facilmente se conclui que iria haver uma melhoria bastante significativa no tempo de produção, tendo em conta que é uma série de 676 unidades.

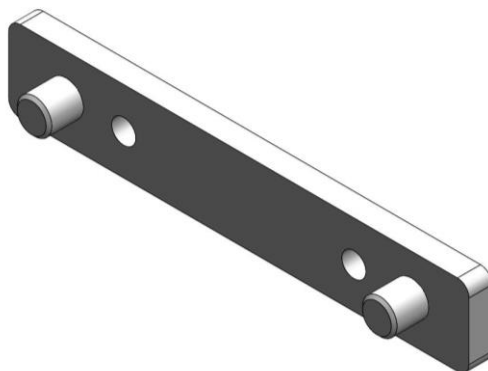


Figura 37 - Referência 4449F36

Referência 0657703

Este conjunto contém peças de grandes dimensões ($795 \times 477 \times 42,5 \text{ mm}^3$) e vários cordões de soldadura (figura 40). Logo à partida, seria interessante analisar a uniformidade dos diversos cordões e fazer uma comparação desse aspeto em soldadura manual e automática. O projeto de um gabarit para este conjunto também irá ser, como na maioria dos casos, uma maneira eficaz de reduzir o tempo de produção. Ficou decidido não incluir esta referência no projeto dado que havia outros conjuntos mais relevantes ao estudo pelos mesmo motivos que esta e com outros acréscimos que acabaram por resultar na sua eleição em detrimento desta.

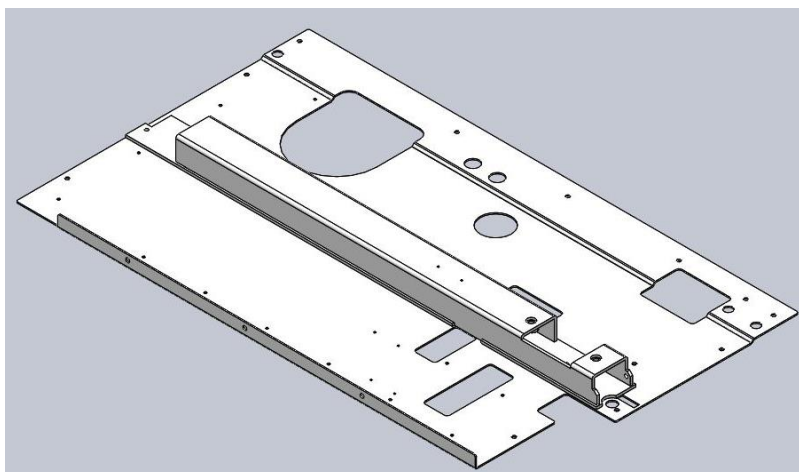


Figura 38 - Referência 0657703

Referência 0657696

Na lista de operações para produção deste conjunto (figura 41) encontra-se calibração (correção de empenos), o que significa que as deformações geradas durante a soldadura provocam empenos que levam à rejeição do conjunto por parte do cliente. Um dos pontos de especial interesse seria projetar uma sequência de soldadura para que os ditos empenos fossem minimizados. Esta tarefa revelou-se impossível considerando as elevadas dimensões das peças (1076x200x50 mm), superiores a 1 metro de comprimento, e a reduzida espessura das chapas, de 3 mm, que sendo aço ao carbono, com a designação St 12, formam uma estrutura que não resiste aos empenos em questão. Em acréscimo, optou-se por não incluir este conjunto na dissertação por conter aspetos que outros conjuntos têm igualmente relevantes.

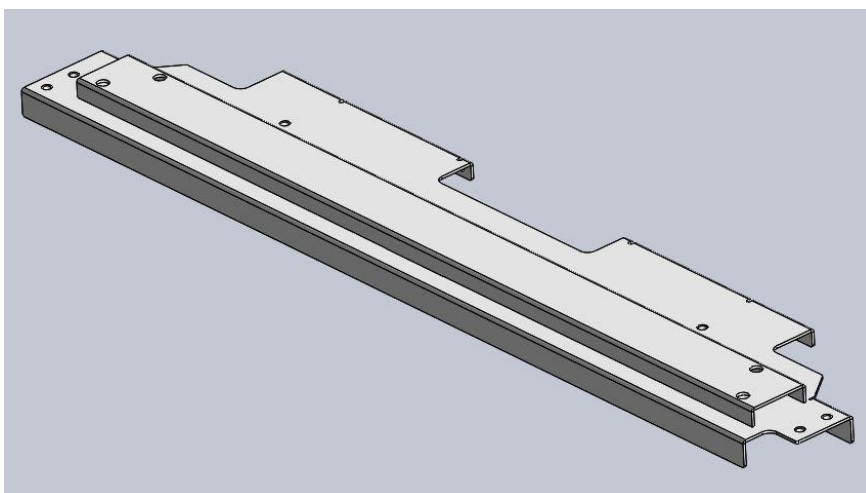


Figura 39 - Referência 0657696

Referência 0657723

Este conjunto (figura 42) tem peças de materiais diferentes, nomeadamente aço inoxidável AISI 304 e aço ao carbono ST12. Teria interesse numa fase inicial por ser um conjunto de materiais diferentes, levando assim a uma análise da combinação destes materiais para soldadura. O motivo de rejeição desta referência para estudo nesta dissertação deve-se ao facto de apenas se tratar da soldadura de um varão de aço inoxidável a uma chapa de aço ao carbono, com reduzida quantidade de soldadura. Poderia ser influente o estudo do material de adição escolhido, mas ainda assim não se considerou relevante o suficiente para incluir na análise.

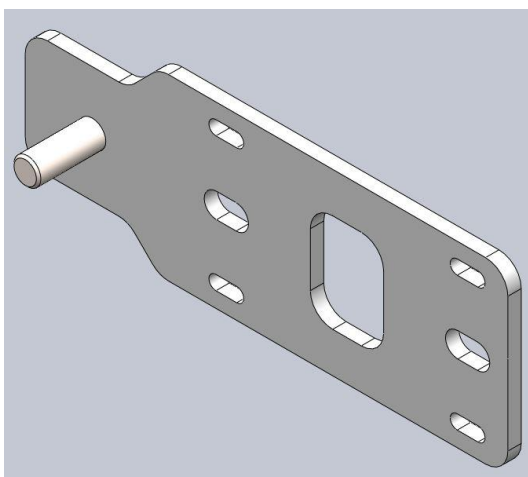


Figura 40 - Referência 0657693 (108x40x20 mm)

Referência 0657693

Este conjunto (figura 43) classificou-se logo como desinteressante dada a pequena quantidade de soldadura e à simplicidade da aplicação da mesma. Quando se trata apenas de um cordão de soldadura, como é o caso, optou-se por não incluir no estudo.

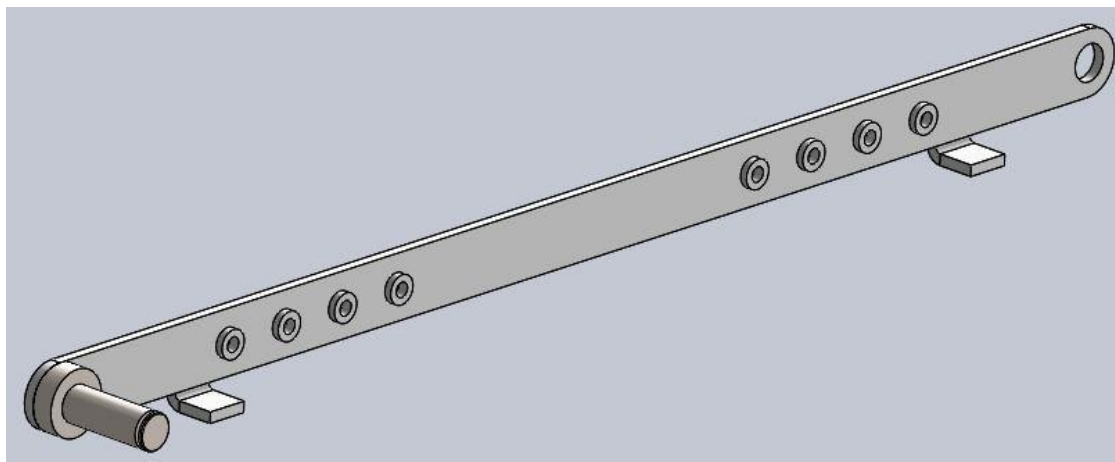


Figura 41 – Referência 0657723 (108x40x20 mm)

Referências 4079C72 e 4079C78

Conjuntos demasiado grandes e com uma lista de peças demasiado extensa, como é o caso dos apresentados na figura 44, foram excluídos devido à necessidade de projetar um gabarit demasiado complexo. É importante ter em conta o tempo disponível para a realização da dissertação e para abordar todas as questões essenciais. Neste caso o tempo disponível para projetar gabarits é de certa forma limitado para um conjunto desta complexidade.

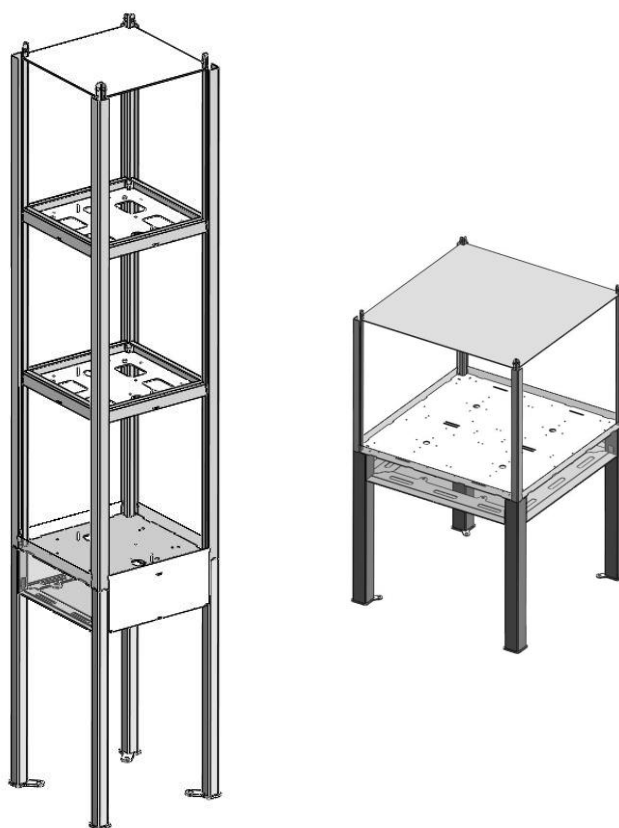


Figura 42 - Referências 4079C72 (360x360x1761 mm) e 4079C78 (760x760x1166)

Referência 4273994

Este conjunto (figura 45) encontrava-se inicialmente na soldadura laser, com a fonte TLF 4000 Turbo (laser CO₂), na máquina de corte laser 3D Trumpf 1005, com um cabeçote de cinco eixos, cujo laser pode ser adaptado para soldadura ajustando os parâmetros da máquina e da fonte.

Apesar do cliente continuar a aceitar as peças provenientes da máquina Trumpf 1005, esta já se encontra com os eixos desgastados, levando assim a que os cordões de soldadura sejam produzidos com oscilações transversais que provocam uma não uniformidade e que num futuro próximo poderão levar à rejeição dos conjuntos.

Como forma de trazer benefício à empresa surgiu, desta forma, a ideia de projetar um novo gabarit que permitisse produzir mais peças em simultâneo, tirando proveito das maiores dimensões da cabine do robot laser Trumpf 5020 e da possibilidade de rotação da mesa de trabalho.

Para além de todas as necessidades mencionadas, a peça em questão exige algumas tolerâncias e uma penetração de soldadura difícil de garantir. Como tal, prevê-se que os ajustes aos parâmetros do robot de soldadura laser sejam uma das etapas fundamentais, para garantir o mínimo de empeno e a penetração de soldadura indicada.

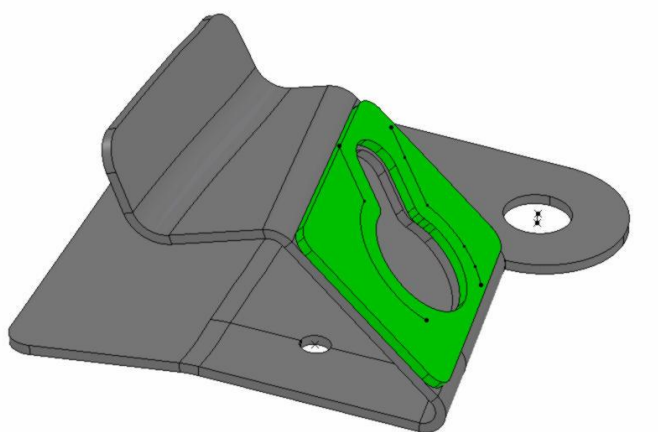


Figura 43 - Referência 4273994 (96x92,3x47,6 mm)

Do ponto de vista da dissertação, previa-se um aumento da produtividade e melhoria na qualidade de soldadura, sendo estes os temas base a estudar com este conjunto. Tendo em conta que o tema em questão se trata de conversão de soldadura manual para automática, e do facto de este conjunto já ter um gabarit projetado para soldadura automática, decidiu-se optar por não estudar esta peça. Ainda assim, é importante realçar o quão importante e pertinente seria para um trabalho de investigação.

3.1.2 Peças consideradas e aprovadas

Os desenhos de conjunto estão apresentados no Anexo A.

Referências 0657669 e 0657670

Para efeitos de montagem, os dois conjuntos (figura 46) correspondem a uma parte esquerda e uma parte direita de um outro conjunto de montagem, sendo dois subconjuntos de um conjunto mais complexo. Logo à partida, foram selecionadas por este motivo, dado o interesse em projetar um gabarit com adaptabilidade para os dois subconjuntos. Com isto quer-se dizer que tanto será possível realizar produção em série de ambos os conjuntos em simultâneo, como o posicionamento no gabarit será ajustável a qualquer uma delas. Para além disso, ainda se espera uma redução de custos no caso de se conseguir soldar a peça no robot

laser sem incluir adição de material, inicialmente incluída na soldadura TIG manual das peças.

A análise das alterações à produtividade no processo serão um ponto relevante para o estudo, assim como a tentativa de eliminar a operação de acabamento, neste caso rebarbagem, necessária para que o conjunto esteja em conformidade com os requisitos do cliente. Outro motivo foi o de esta peça levar dois tipos distintos de soldadura, nomeadamente soldadura topo a topo, numa junta topo a topo, e soldadura de canto, numa junta em esquina (a designação do tipo de soldadura para distinção na dissertação será realizado na figura 56). Desta forma, vai ser possível entender as diferenças entre os dois tipos de soldadura e a variação das propriedades na soldadura obtida.

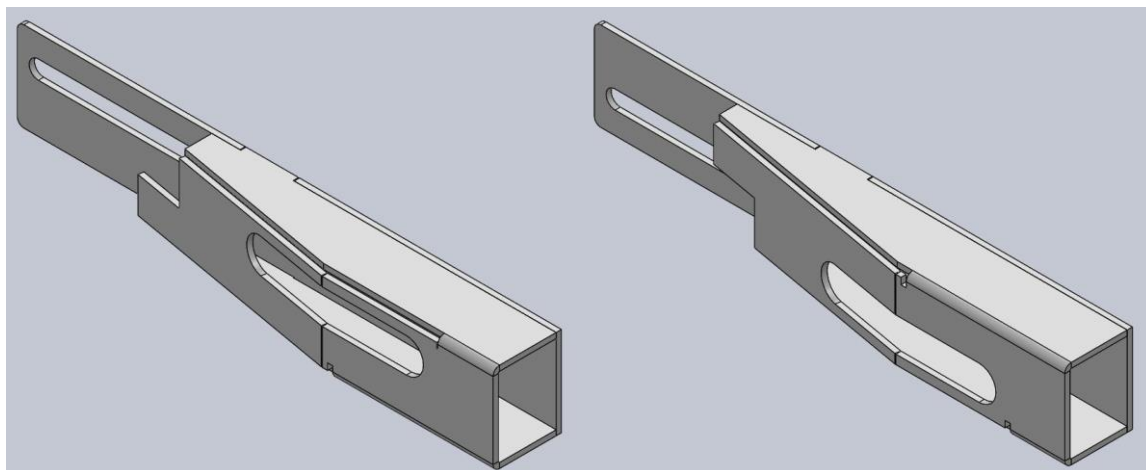


Figura 44 - Referências 0657669 e 0657670 (205x34x26 mm)

Referência 0657664

Tentando conjugar interesse por parte da empresa e considerar a relevância para a dissertação, foi selecionado este conjunto (figura 47) principalmente como tentativa de reduzir o empeno resultante da soldadura TIG manual. A solução, à primeira vista, será tratar de que a soldadura manual seja substituída pela soldadura laser, tendo o conjunto posicionado num gabarit que consiga que este fique suficientemente fixo sem sofrer empeno durante a soldadura, com o objetivo de eliminar as operações de calibração através da redução do empeno para níveis aceitáveis pelo cliente.

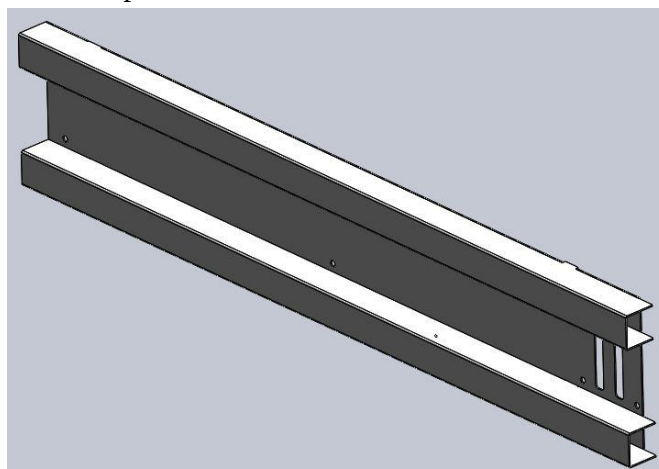


Figura 45 - Referência 0657664 (1167x220x50 mm)

Considerando as elevadas dimensões desta peça, comparativamente às duas anteriores a estudar, é necessário projetar também duas máscaras de soldadura laser, onde se encontrará a gravação laser do posicionamento dos cordões de soldadura. Máscaras de soldadura são

réplicas de peças do conjunto, fabricadas em material mais barato. As réplicas têm gravação dos cordões de soldadura devidamente posicionados. Deste modo, a operação de programação do robot tornar-se-á mais fácil e rápida para o operador, através da colocação das máscaras de soldadura no gabarit durante a programação do robot, feita *online*.

3.2 Materiais utilizados

De forma a adequar este trabalho a aplicações industriais, e com o objetivo de ser benéfico para a empresa onde se desenvolveu o projeto, os materiais selecionados foram os mais usualmente processados em soldadura e corte laser. Em toda a indústria, e particularmente na Quantal S.A., os materiais processados são por norma aços não ligados e de baixa liga, aços inoxidáveis e ligas de alumínio. Apesar de não ser tão frequente, também se processam ligas de titânio, níquel e cobre.

Notando que o aço é o principal material da indústria metalomecânica, dado o grande volume de negócios que representa e a posição que ocupa no mercado, tanto em corte e soldadura laser como noutros processos de menor relevância para esta dissertação, será importante caracterizar os aços utilizados nas peças que constituem os conjuntos, o material de adição escolhido para soldadura e nos gabarits. Além do mencionado, até aqui há que salientar que o aço é um material processado por laser sem grande dificuldade, por ser facilmente cortado e por ser estável quando em contato com o laser.

Para a parte experimental deste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- Aço inoxidável AISI 304, nas peças e nos gabarits, com espessura de 2 e 4 mm
- Aço inoxidável AISI 316L, como material de adição, de diâmetro 1 mm
- Aço ST 12, nas peças e nas máscaras de soldadura laser, com espessura de 2 mm
- Aço ST 37, nos gabarits com espessuras de 4 e 5 mm e como material de adição, de diâmetro 1,6 mm

Nas tabelas 8 e 9 encontram-se a composição química dos materiais em questão e as propriedades mecânicas que se consideram mais importantes para este estudo. Estes valores não serão alvo de estudo durante o trabalho experimental a realizar, apenas foram recolhidos a partir dos certificados emitidos pelos fornecedores de matéria-prima da Quantal S.A. para dar ao leitor uma descrição mais detalhada dos materiais utilizados.

Tabela 8 – Dimensões, certificação, fabricante e propriedades mecânicas dos materiais utilizados

Material	Espessura ou diâmetro [mm]	Inspecção segundo norma EN10204	Fabricante	Rp 0,2 ^[1] [MPa]	Rm ^[2] [MPa]	A ^[3] [%]
ST 12	Chapa - 2	Tipo 2.2	Bamesa	217	325	40
ST 37	Chapa - 4	Tipo 3.1	Plafesa	248	374	43
	Chapa - 5	Tipo 3.1	Plafesa	246	396	31
	Vareta - 1,6	Tipo 3.1	Air Liquide	470	560	26
AISI 304	Chapa - 2	Tipo 3.1	Acerinox	295	605	62
	Chapa - 4	Tipo 3.1	Aperam	329	638	60
AISI 316L	Vareta - 1	Tipo 3.1	Air Liquide	320	650	30

^[1] Tensão limite convencional de proporcionalidade para 0,2%; ^[2] Tensão de rotura à tração; ^[3] Extensão após rotura; ^{[1], [2], [3]} segundo a norma EN ISO 6892-1

Tabela 9 – Composição química dos materiais utilizados

Aço		ST 12	ST 37			AISI 304		AISI 316L
Espessura [mm]		2	4	5		2	4	
Diâmetro [mm]					1,6			1
Comp. química [%]	C	0,048	0,050	0,106	0,076	0,019	0,021	0,022
	Cr	0,026	-	-	0,026	18,005	18,050	18,500
	Ni	0,020	-	-	0,015	8,020	8,000	11,330
	Mn	0,205	0,120	0,956	1,480	1,918	1,450	1,740
	P	0,012	0,005	0,014	0,009	0,033	0,031	0,029
	S	0,011	0,003	0,006	0,015	0,001	0,002	0,010
	Si	0,007	0,020	0,012	0,860	0,418	0,400	0,870
	Al	0,059	0,037	0,023	0,001	-	-	-
	Cu	0,020	0,012	0,028	0,089	-	-	0,110
	N	0,004	0,004	0,002	-	0,075	0,069	-
	Co	-	-	-	-	-	0,178	-
	Mo	0,002	-	-	0,002	-	-	-
	V	-	-	-	0,001	-	-	-
	Ti+Zr	-	-	-	0,004	-	-	-
	Fe	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante

3.3 Equipamento utilizado

3.3.1 Soldadura TIG

A soldadura TIG foi realizada em três fontes de corrente distintas (figura 48), que produzem soldadura com propriedades semelhantes se os parâmetros forem ajustados para valores próximos. Todos são do fabricante austríaco Fronius, modelos TransTig 1700, MagicWave 2200 Job e MagicWave 3000 Job, que podem operar em corrente contínua ou alternada. O segundo e terceiro modelos mencionados tratam-se de versões de equipamento mais recente, comparativamente ao anterior, daí a proximidade na qualidade de soldadura obtida.

Os aparelhos de soldadura referidos permitem soldar qualquer metal. A utilização dos equipamentos pode ser feita para soldadura manual ou para soldadura automática, através de um robot. Os setores da indústria para aplicação desta tecnologia são, por recomendação do fabricante, os seguintes:

- construção de máquinas e instalações
- construção, manutenção e reparação de estruturas em aço
- montagem de componentes
- construção de canalizações
- construções em indústria aeroespacial
- construções em indústria aeronáutica.



Figura 46 - Equipamentos de soldadura TIG utilizados para soldar amostras na empresa Quantal S.A. Fronius Transtig 1700 (esquerda), MagicWave 2200 (centro), MagicWave 3000 (direita)

A tabela 10 resume alguns dados técnicos gerais dos equipamentos utilizados na primeira etapa do processo experimental.

Tabela 10 – Características gerais dos equipamentos de soldadura TIG

Modelo		TransTig 1700	MagicWave 2200 Job	MagicWave 3000 Job
Tensão da rede elétrica [V]		230	230	3x400
Tolerância da tensão de rede [%]		-20/+15	-20/+15	±15
Intervalo de intensidades de corrente para soldadura [A]		2-170	3-220	3-300
Intensidade de corrente por ciclo de trabalho	10 min / 25°C ^[5]	-	220 A (40% FM ^[1])	-
		-	180 A (60% FM)	-
		150 A (100% FM)	150 A (100% FM)	-
	10 min /40°C	170 A (35% FM)	220 A (35% FM)	300 A (35% FM)
		-	170 A (60% FM)	-
		120 A (100% FM)	150 A (100% FM)	190 A (100% FM)
Tensão em vazio [V]		92	88	89
Tensão de trabalho [V]		10,1-16,8	10,1-18,8	10,1-22
Grau de proteção		IP ^[2] 23	IP 23	IP 23
Modo de refrigeração		AF ^[3]	AF	AF
Classe de isolamento		B ^[4]	B	B
Dimensões CxLxA [mm]		430x180x280	485x180x390	560x250x435
Peso [kg]		8,9	17,4	28,1

^[1] Factor de marcha; ^[2] norma IEC 60529; ^[3] Air flow; ^[4] norma IEC 61140; ^[5] Temperatura ambiente

Analisando a tabela anterior, é notório o maior intervalo de intensidades de corrente no modelo MagicWave 2200 e MagicWave 3000, que pela análise do catálogo do fabricante foi uma melhoria da anterior versão Transtig 1700 e representa também um produto de gama mais elevada. Este tipo de equipamentos está disponível noutros modelos com diferentes gamas de intensidade de corrente e tensão. Por norma, a escolha das características do equipamento de soldadura está diretamente relacionada com a frequência e duração das utilizações. Neste caso, como se trata de uma empresa do setor da indústria metalomecânica,

pressupõe-se que as máquinas operam no mínimo 8 horas diárias, sendo fundamental ter uma intensidade de corrente bastante aceitável (acima dos 120 A) para um fator de marcha de 100%.

3.3.2 Soldadura laser

A maior complexidade da tecnologia laser leva à necessidade de mais equipamento para processar a soldadura. A obtenção de amostras de soldadura laser foi realizada num sistema robot do fabricante alemão Trumpf, modelo TruLaser Robot 5020 (figura 49). Este equipamento pertence à série TruLaser Robot Series 5000, uma gama de equipamentos tipo cabine, que incorporam um robot para aplicações com laser de estado sólido, particularmente soldadura e corte 3D de geometrias complexas. Os principais componentes do sistema são o robot, a fonte laser, o sistema ótico, as unidades de posicionamento e o sistema de segurança. O robot incluído no sistema é do fabricante alemão Kuka, modelo KR30HA e a fonte laser é do fabricante alemão Trumpf, modelo HL3306D. Os restantes componentes estão integrados no sistema ou no robot.



Figura 47 – Sistema TruLaser Robot 5020 na empresa Quantal S.A.

Dentro da cabine onde se encontra o robot, está também uma unidade de posicionamento que faz parte do sistema. A unidade de posicionamento é uma mesa rotativa de dois eixos (figura 50), com furação para posicionamento de peças ou outros componentes, como conjuntos de peças e gabarits de soldadura. Esta é parte essencial do sistema, e sendo controlada pelo mesmo controlador do robot, torna possível a programação do posicionamento de ambos os componentes. Os dados técnicos da mesa de posicionamento encontram-se na tabela 11.

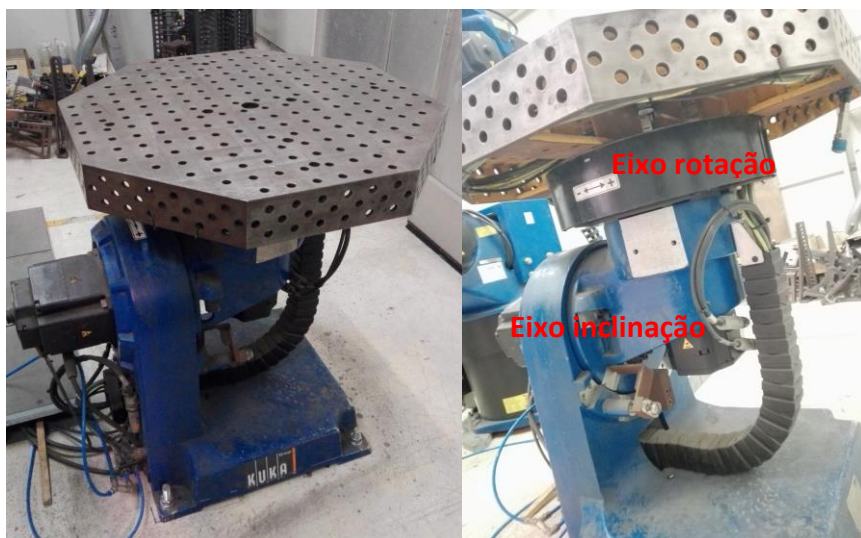


Figura 48 - Unidade de posicionamento TruLaser Robot 5020 com identificação dos eixos de movimentação

Tabela 11 – Dados técnicos unidade posicionamento TruLaser Robot 5020 (Trumpf)

Número de eixos	2
Amplitude eixo de rotação [°]	±190
Amplitude eixo de inclinação [°]	±90
Modo de operação	Automático
Altura [mm]	850
Carga máxima [kg]	400
Precisão e repetibilidade [mm]	±0,1
Diâmetro furação da mesa [mm]	16

A fonte laser HL3306D, observável na figura 51, está equipada com um gerador laser de estado sólido Nd-YAG que tem capacidade de gerar um feixe laser com potência máxima de 3300 W. O transporte do laser até ao cabeçote do robot dá-se por intermédio de um cabo de fibra ótica do fabricante alemão Highyag, modelo LLK-B, cujo diâmetro do núcleo é de 600 µm. Na tabela 12 podem ser consultados alguns dados técnicos da fonte laser utilizada no sistema robot.



Figura 49 – Fonte laser HL 3306D (Trumpf) na Quantal S.A.

Tabela 12 – Dados técnicos fonte laser HL3306, fabricante Trumpf

Tensão da rede elétrica [V]	400
Tolerância da tensão de rede [%]	±10
Tipo de laser	Laser de estado sólido
Meio ativo da fonte laser	Varão de Nd-YAG
Modo de excitação	Laser de díodos
Comprimento de onda feixe laser [µm]	1064
Potência feixe laser [W]	30-3300
Modo transversal	TEM ₀₀
Grau de proteção	IP 54
Dimensões [mm]	3600x950x1800
Peso [kg]	1900

O robot KR30HA é um robot de 6 eixos do tipo articulado, cujo alcance máximo relativamente à posição da base é de 2033 mm. O braço do robot tem capacidade de transportar uma carga máxima de 30 kg. Estas funcionalidades permitem aplicação a diversos métodos de processamento de materiais, como soldadura, corte, fabrico aditivo, entre outros, e também a realização de operações como acabamento e pintura, por exemplo. Na tabela 13 encontram-se os dados técnicos mais relevantes.

Tabela 13 – Dados técnicos robot Kuka, modelo KR30HA

Carga útil [kg]	30
Alcance máximo [mm]	2033
Número de eixos	6
Precisão e repetibilidade [mm]	±0,05
Peso [kg]	665
Posição de montagem	Solo
Temperatura de operação [°C]	10 - 55
Classe de proteção	IP64
Controlador	KR C4

Na figura 52 encontra-se a identificação dos eixos de rotação do robot Kuka KR30HA, de acordo com a numeração de catálogo, dada pelo fabricante, e utilizada para efeitos de programação no controlador KR C4.

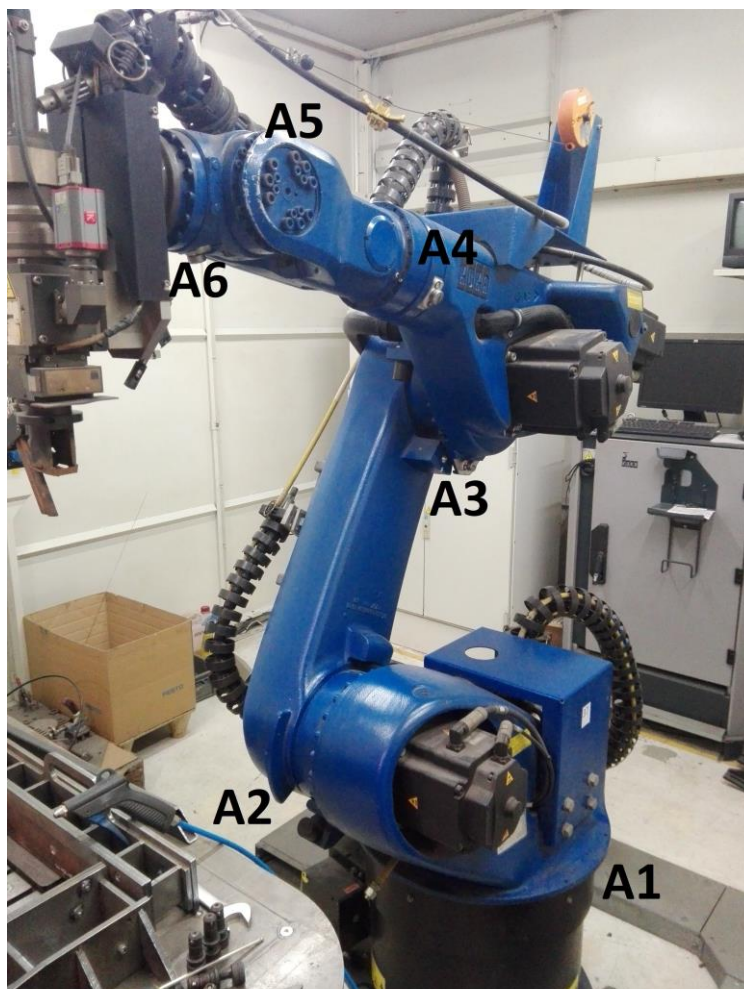


Figura 50 – Identificação dos eixos de rotação do robot Kuka KR30HA da empresa Quantal S.A.

A figura 53 e a tabela 14 dão uma perspetiva detalhada do alcance e velocidade de rotação de cada eixo do robot. Partindo destes dados, é possível tomar melhor conhecimento da funcionalidade e versatilidade do robot, de modo a programar a trajetória que este irá tomar durante a operação de soldadura.

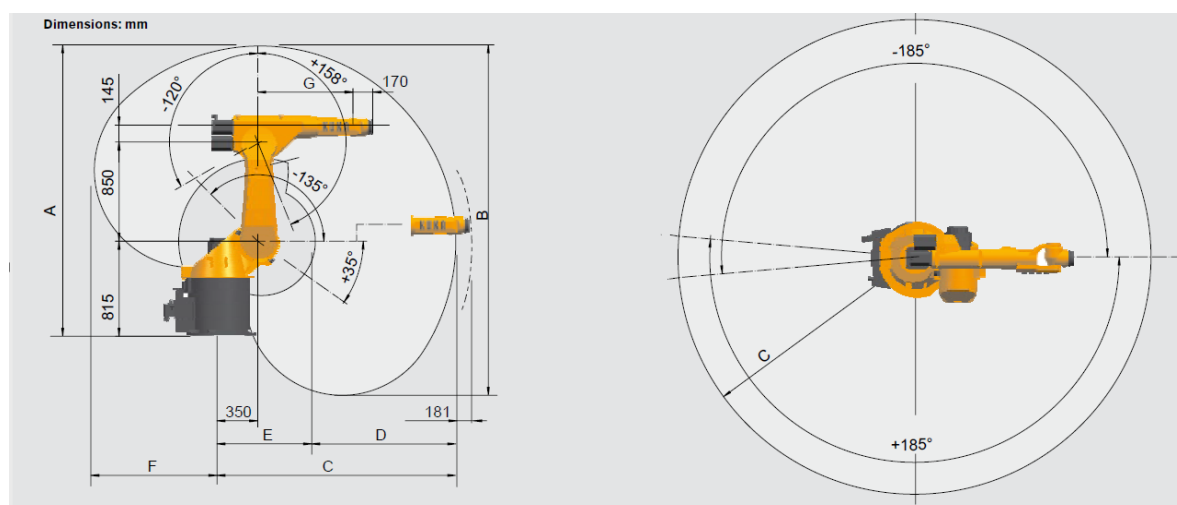


Figura 51 - Representação das dimensões de movimentação (em mm) dos eixos do robot Kuka KR30HA

Tabela 14 - Dimensões, alcance e ângulos rotação dos eixos do robot Kuka KR30HA

Dimensões figura 53 [mm]		Eixo	Alcance [°]	Velocidade máxima [%/s]
A	2498			
B	3003	Eixo 1 (A1)	±185	140
C	2033	Eixo 2 (A2)	+35/-135	126
D	1218	Eixo 3 (A3)	+158/-120	140
E	815	Eixo 4 (A4)	±350	260
F	1084	Eixo 5 (A5)	±119	245
G	820	Eixo 6 (A6)	±350	322

3.3.3 Corte das amostras soldadas

Para corte das peças soldadas, com a finalidade de obter os provetes com o formato desejado para os ensaios, foi utilizado um serrote semiautomático do fabricante italiano MEP, modelo Shark 330 HH (figura 54). Este modelo permite o corte de peças metálicas a frio, de forma contínua, sem esmagamento do material. No interior desta máquina, a serra encontra-se tensionada por duas roldanas, e o acionamento de uma das roldanas por um motor elétrico permite o corte contínuo de metais ferrosos e não ferrosos. Em modo semiautomático apenas é necessário selecionar a velocidade de avanço e de corte do serrote.

É de salientar que a escolha de um método de corte a frio é indispensável, visto não se poderem alterar as propriedades da soldadura, a partir do aquecimento resultante da fricção da serra com a peça, para efetuar os ensaios. A refrigeração e lubrificação da serra de corte e das peças é conseguida através da utilização de um refrigerante do fabricante suíço Blaser, Blasocut BC 35 Kombi SW (designação comercial). O refrigerante usado é miscível em água, geralmente em concentrações de 5 a 6%, dependendo da máquina a usar e das recomendações do fabricante. Durante o funcionamento do serrote, é possível regular o caudal de refrigerante manualmente, consoante o operador considere necessário o aumento ou diminuição para a operação em processamento.

Na figura 54 é observável a lubrificação durante uma operação de corte. A inserção do fluido na zona de corte ocorre através de dois injetores que fazem parte do circuito hidráulico onde se encontra o refrigerante, pressurizado, em circulação. Encontram-se ainda na tabela 15 alguns dados técnicos do serrote, consultados no catálogo do fabricante.



Figura 52 - Serrote Shark 330 HH, fabricante MEP, na empresa Quantal S.A. (esquerda); lubrificação durante operação de corte (direita)

Tabela 15 - Dados técnicos serrote Shark 330 HH, fabricante MEP

Dimensões exteriores [mm]		1930x1700x1800
Dimensões da serra de corte [mm]		3320x27x0,9
Abertura máxima da morsa de corte [mm]		335
Ângulo máximo de inclinação da serra [°]		60
Velocidades de corte [m/min]	1ª velocidade (lenta)	40
	2ª velocidade (rápida)	80
Líquido refrigerante e lubrificante		Blasocut BC35 Kombi SW
Potências e consumos	Motor do mandril do cabeçote [kW]	1,84 / 1,5
	Motor da bomba elétrica do líquido refrigerante e lubrificante [kW]	0,13
	Motor da central hidráulica [kW]	0,22
	Máxima potência instalada [kW]	2,19
	Pressão de retorno do cabeçote [bar]	30
	Capacidade líquido de refrigeração e lubrificação (5-6%) [l]	50
Ano de fabrico		2001

3.4 Plano experimental

O plano experimental desta dissertação resume-se essencialmente a quatro etapas, cada uma delas com a sua relevância e aspetos a ter em conta. A primeira será soldadura TIG manual das peças a estudar, na qual se irão recolher amostras de peças soldadas pelo processo convencional da empresa. Seguidamente, a projeção de gabarits de soldadura para fixar as

peças do conjunto e poder passar a realizar soldadura laser no robot. Posteriormente estará a recolha de amostras de peças soldadas a laser para análise. Para finalizar a parte experimental do trabalho, e quando se terminar a recolha de amostras das peças soldadas por TIG e laser, serão cortados provetes em zonas específicas dos cordões de soldadura para a realização de ensaios metalográficos e ensaios de dobragem do cordão de soldadura.

O objetivo deste plano, que pode ser observado sob a forma de diagrama na figura 55, será analisar e comparar a qualidade da soldadura dos dois processos, selecionando, em função dos resultados obtidos, o mais conveniente para a empresa. Com base na análise e nas conclusões obtidas, poderão ser sugeridas alterações a efetuar, nomeadamente a nível de preparação das superfícies a soldar, do ajuste dos parâmetros de soldadura, entre outras que se poderão vir a refletir, quer a nível de eficiência de produção, quer a nível económico para a empresa.

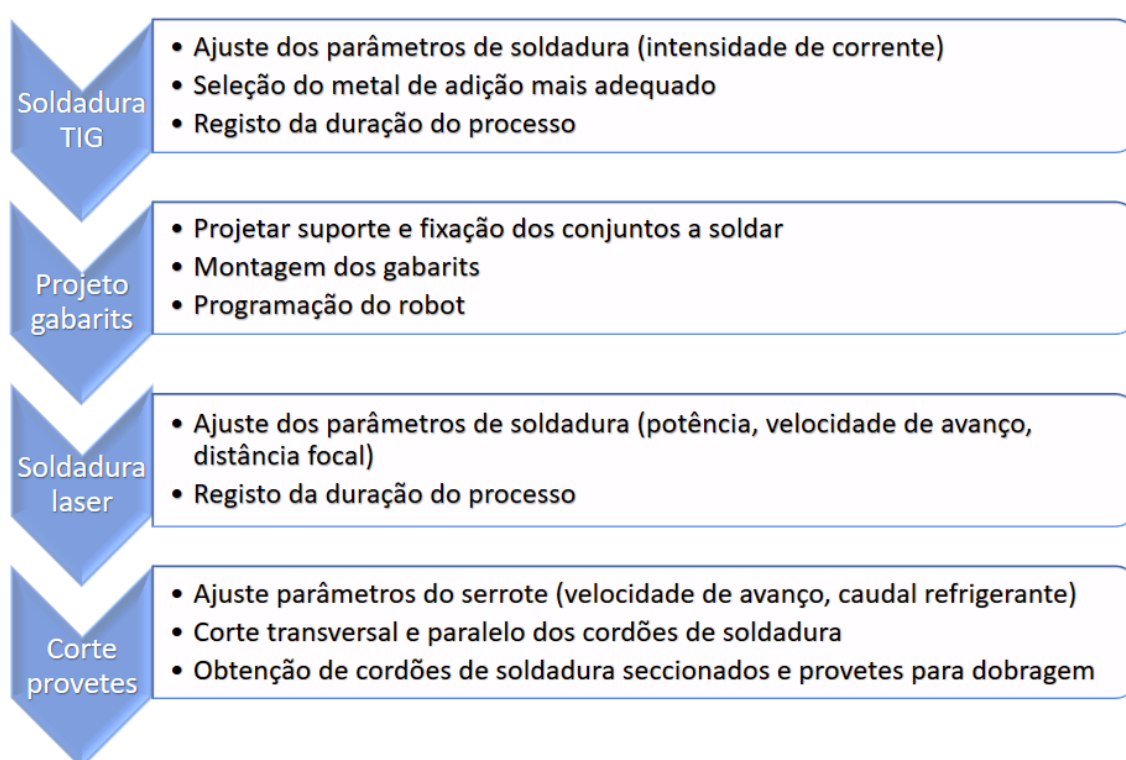


Figura 53 - Diagrama do plano experimental

Nos subcapítulos seguintes apresentar-se-ão os procedimentos utilizados para comparar a qualidade e produtividade da soldadura TIG manual com a soldadura laser automática. A classificação das juntas de soldadura será feita de acordo com a designação utilizada na empresa Quantal S.A., exemplificada na figura 56.

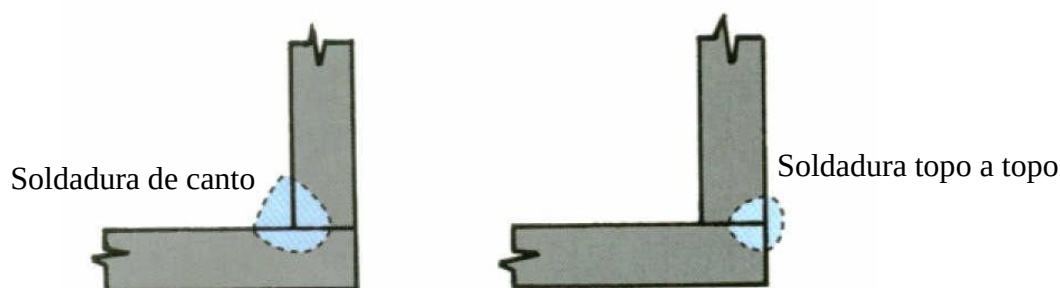


Figura 54 – Identificação do tipo de juntas de soldadura presentes nos conjuntos a soldar para obtenção de amostras (adaptado de [40])

3.4.1 Soldadura TIG manual

Na primeira fase da parte experimental, as peças selecionadas foram soldadas com recurso a soldadura TIG manual em corrente contínua com polaridade negativa. Neste processo de soldadura, o único parâmetro ajustado foi a intensidade de corrente. Este é um fator que influencia a penetração da soldadura e também, em função da velocidade de avanço, a entrega térmica no ponto de contacto entre a peça e a tocha. Por norma, a intensidade de corrente é escolhida pelo operador com base na sua experiência, em função do material a soldar, das dimensões do cordão de soldadura e do tipo de soldadura. Outra alteração a ter em conta, poderia ser o material do eléctrodo, mas neste caso foi utilizado o mais habitual em soldadura TIG, tungsténio toriado (3% de tório). Na tabela 16 está indicada a intensidade de corrente utilizada na soldadura de cada conjunto para cada tipo de cordão de soldadura e material utilizado.

Tabela 16 – Intensidade de corrente utilizada nos diferentes tipos de soldadura TIG manual

Conjunto	Tipo de soldadura	Material a soldar	Comprimento do cordão [mm]	Intensidade corrente [A]	Material de adição	Gás de proteção e caudal
0657664	Canto/Topo a topo	AISI 304 2 mm	10/10	90/90	AISI 316L (Ø1,0) /-	Árgon 8 l/min
0657669	Canto/Topo a topo	ST12 2 mm	5/10	60/70	ST37 (Ø1,6) /-	Árgon 8 l/min
0657670	Canto/Topo a topo	ST12 2 mm	5/10	60/70	ST37 (Ø1,6) /-	Árgon 8 l/min

Durante a soldadura (figuras 57 e 58) foi cronometrado o intervalo de tempo que o operador levou para executar todos os cordões até o conjunto estar pronto. Esta contagem teve início no instante em que o operador recolheu a tocha até que a colocou no suporte (tempo total de fabrico).

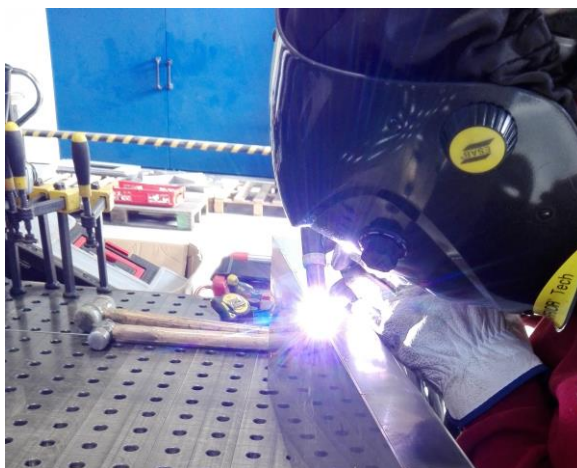


Figura 55 - Soldadura TIG manual do conjunto 0657664

De acordo com a lista de operações já definida pela empresa para produção destes conjuntos por soldadura TIG, deu-se ainda acabamento nas peças de referência 0657669 e 0657670 (figura 59) nas zonas onde a peça levou material de adição, de forma a garantir conformidade entre as dimensões da peça e a altura da garganta do cordão de soldadura. Esta operação de acabamento foi igualmente cronometrada e será incluída no tempo total de produção.



Figura 56 – Soldadura TIG manual dos conjuntos 0657669/0657670



Figura 57 - Operação de acabamento (rebarbagem) da peça 0657669A

3.4.2 Projeto de gabarits

O passo seguinte da parte experimental envolve o projeto e construção de gabarits de soldadura, para que os conjuntos possam ser soldados no robot laser. A principal função do gabarit é otimizar a produção em série, posicionando e fixando as peças do conjunto para que o cabeçote do robot efetue a soldadura. Com esta ferramenta de fixação, apenas é necessário introduzir as peças do conjunto separadamente e remover o conjunto já soldado após operação de soldadura laser. O aumento de produtividade verificar-se-á, à partida, não só numa redução acentuada do tempo de operação, como também na qualidade e uniformidade da soldadura, dado que a fixação das peças é igual para todos os conjuntos soldados. Ainda acerca da fixação, está constatado que a soldadura de peças em gabarits devidamente projetados, ajuda a reduzir a deformação que muitas vezes se verifica quando a peça é soldada manualmente com pouco grau de fixação, devido ao facto de as tensões de contração no arrefecimento serem exercidas sobre o gabarit e não sobre a peça. A mobilidade do robot juntamente com a mobilidade e rotatividade da mesa de fixação, permite posições mais favoráveis de soldadura.

O primeiro gabarit a ser projetado foi para o conjunto 0657664, devido à necessidade e urgência em soldar as 128 peças da encomenda, cumprindo os requisitos e a data de entrega definida com o cliente. Dadas as dimensões de 1167x220x50 [mm] e massa de 9,11 kg da peça, o gabarit teria de ser projetado como uma estrutura de semelhantes dimensões, resistência e rigidez que suportasse tanto o peso próprio como a massa da peça. Foram utilizadas chapas de aço ao carbono St 37 com espessuras de 4 e 5 mm para a base de suporte,

e chapas de aço inox AISI 304 para a parte superior do gabarit. A escolha de aço inox para a parte superior do gabarit prende-se com o facto de todas as peças do conjunto serem também em aço inox, AISI 304. Desta forma, não haverá reação entre o aço ao carbono St 37 e o aço inox no caso de fusão accidental. Já a utilização de aço St 37 para a parte inferior apenas se tratou de uma questão de economizar, escolhendo assim matéria-prima de preço mais baixo.

Na figura 60 está o modelo CAD 3D realizado com o *software Solidworks* para fixação, através de grampos visíveis na figura, do conjunto de referência 0657664. No anexo B encontra-se o desenho de conjunto do gabarit realizado e produzido na empresa.

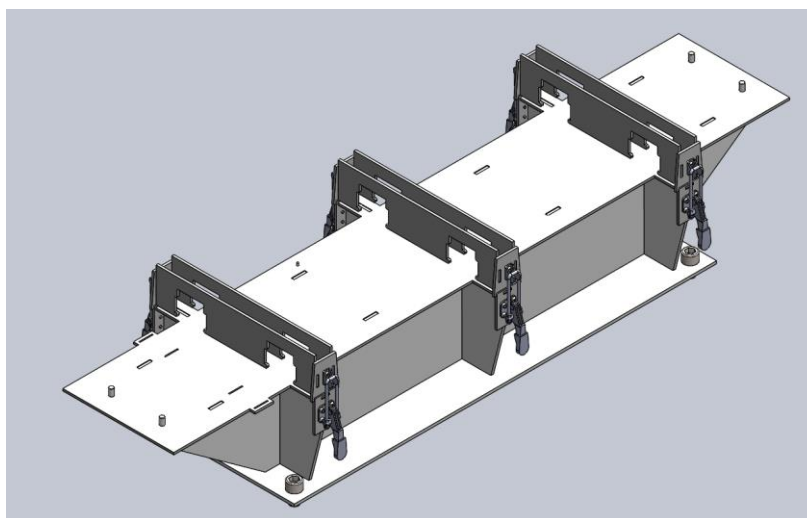


Figura 58 – Gabarit de soldadura laser para referência 0657664

Verificou-se ainda a necessidade de produzir duas “máscaras” de soldadura laser, com a mesma forma e dimensão das peças em “U”, para efetuar a gravação a laser dos cordões de soldadura devidamente posicionados, tanto para garantir que não há empeno como para que o cabeçote do robot solde o conjunto sem colidir com o gabarit ou a peça. A produção das máscaras foi imprescindível, visto haver um total de 32 cordões de soldadura a realizar neste conjunto. Na figura 61 encontra-se o modelo CAD 3D das máscaras de soldadura, elaborado com recurso ao *software Solidworks*, onde se pode observar a gravação laser que marca o posicionamento dos cordões de soldadura. Esta gravação tem a função de facilitar a programação do robot que, com o apontador, garante o correto posicionamento da soldadura. O desenho de engenharia das máscaras de soldadura encontra-se no anexo C.

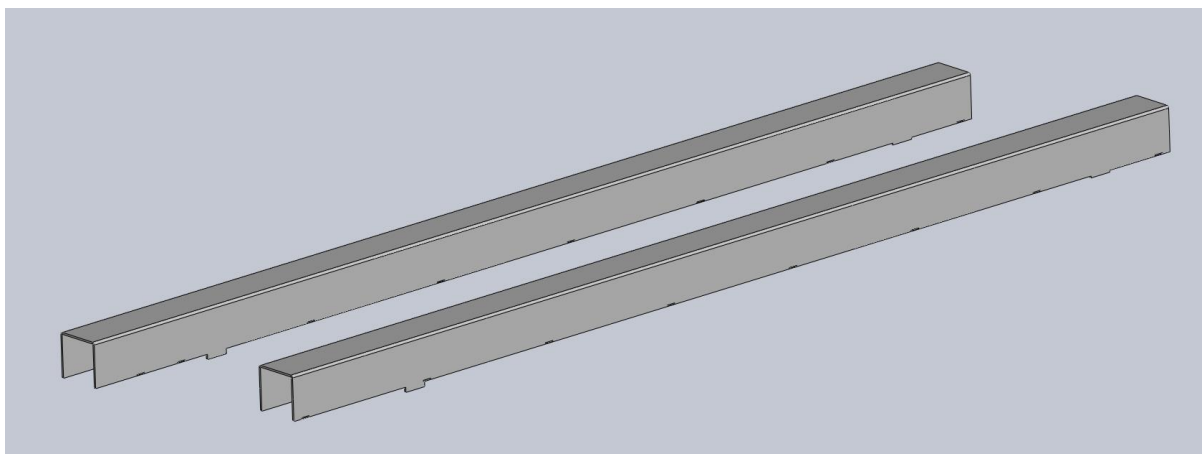


Figura 59 – Máscaras para soldadura laser 0657664

Na figura 62 encontra-se uma imagem da programação do robot laser, para efetuar a sequência de movimentos e soldadura do conjunto 0657664. Nesta figura é possível visualizar o laser piloto, de cor vermelha, que indica o ponto da peça onde vai incidir o feixe laser. A programação realizada na Quantal S.A. é programação *online*, o que significa que se programa dentro da estação de trabalho, através da consola do robot. Uma das vantagens deste tipo de programação é a maior acessibilidade e visualização em tempo real do trajeto do robot. No entanto, o ideal para este tipo de operação será sempre programação *offline*, através de um software de simulação, que evita a paragem do robot para ser programado, aumentando assim a produtividade.

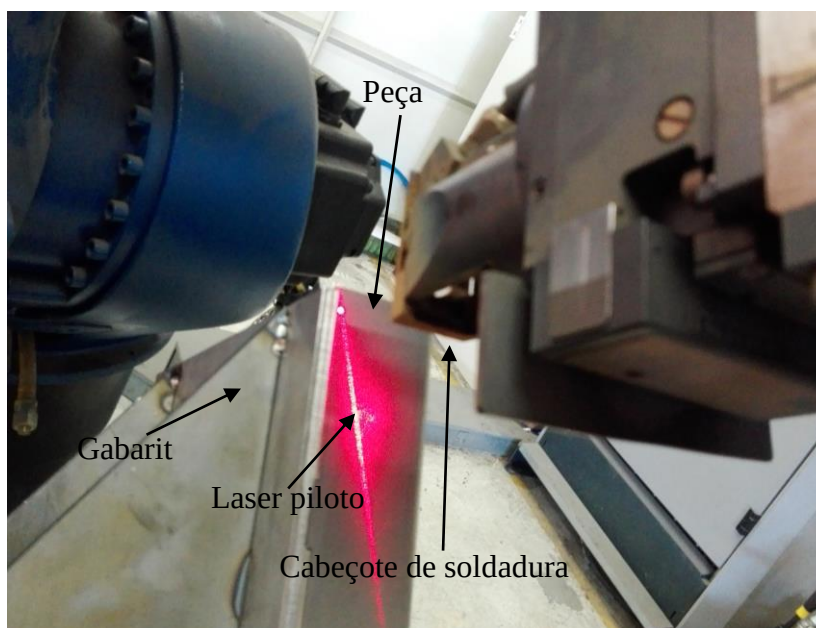


Figura 60 - Programação *online* do trajeto efetuado pelo robot de soldadura laser

O segundo gabarit, apesar de ser de menores dimensões, necessitou de um projeto com adaptabilidade a dois conjuntos de peças. Os conjuntos de referência 0657669 e 0657670 são muito semelhantes com dimensões exteriores idênticas, 205x34x26 mm, mas com um deslocamento transversal de 10 mm do rasgo interno. O posicionamento do oblongo é feito neste gabarit através de cavilhas fixas a uma base, como se pode observar na figura 63.

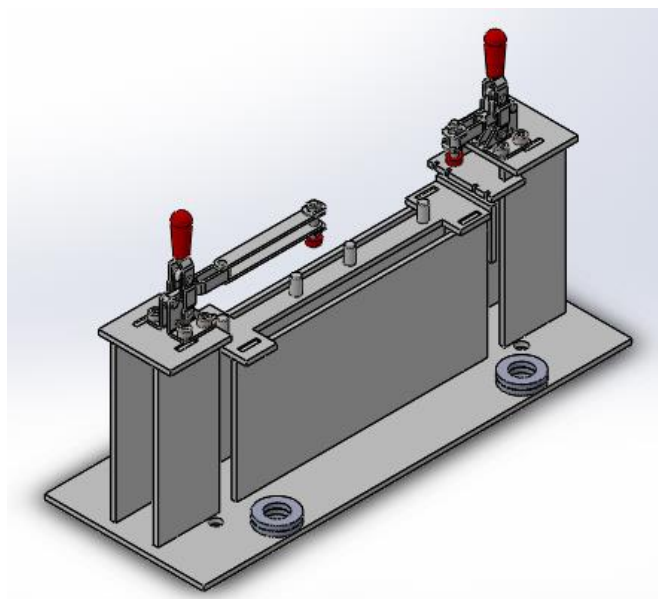


Figura 61 - Gabarit de soldadura laser para os conjuntos 0657669 e 0657670

Recorrendo a dois grampos verticais e a um batente, fixo a uma das estruturas verticais do gabarit que suportam os grampos, a imobilização das peças que fazem parte do conjunto é garantida em todas as direções. A adaptabilidade às duas peças diferentes encontra-se na peça horizontal abaixo do grampo da direita, que poderá ser designada de posicionador. Os entalhes desenhados no posicionador permitem colocar qualquer uma das peças no gabarit e ainda garantem a restrição de movimento em duas direções. É mostrado em detalhe, na figura 64, o elemento que garante a versatilidade do gabarit, assim como o batente que garante a restrição de movimentos segundo um dos três eixos.

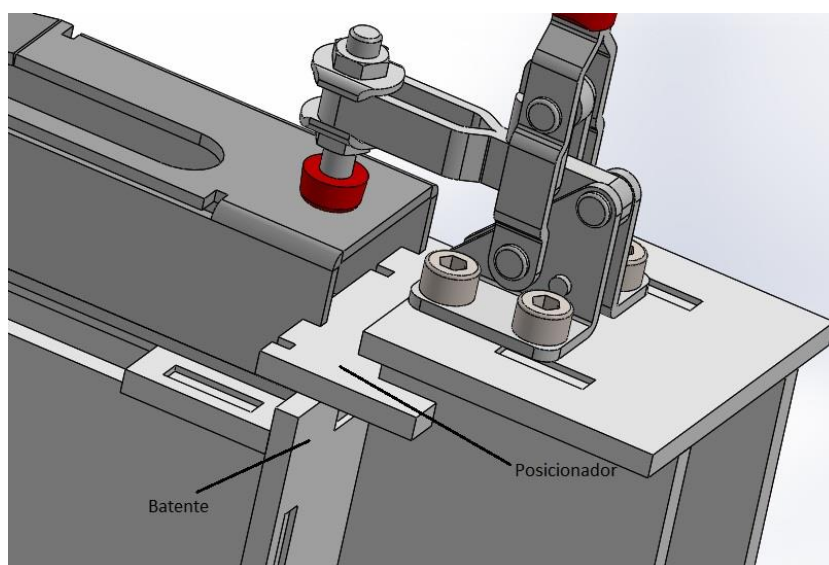


Figura 62 - Visualização detalhada do posicionador e do batente no gabarit de soldadura laser para a referência 0657669 e 0657670

O mais comum, nos casos em que os conjuntos têm uma parte esquerda e uma direita, como se verifica para estas duas referências, é que se projete um gabarit para ambos os conjuntos, sendo o posicionamento nos gabarits muito semelhante, aplicando-se apenas as alterações necessárias para fixação das respetivas peças. É de notar que este foi o caso, e pode observar-se na figura 65 o modelo CAD 3D do mesmo gabarit com a montagem dos dois conjuntos diferentes.

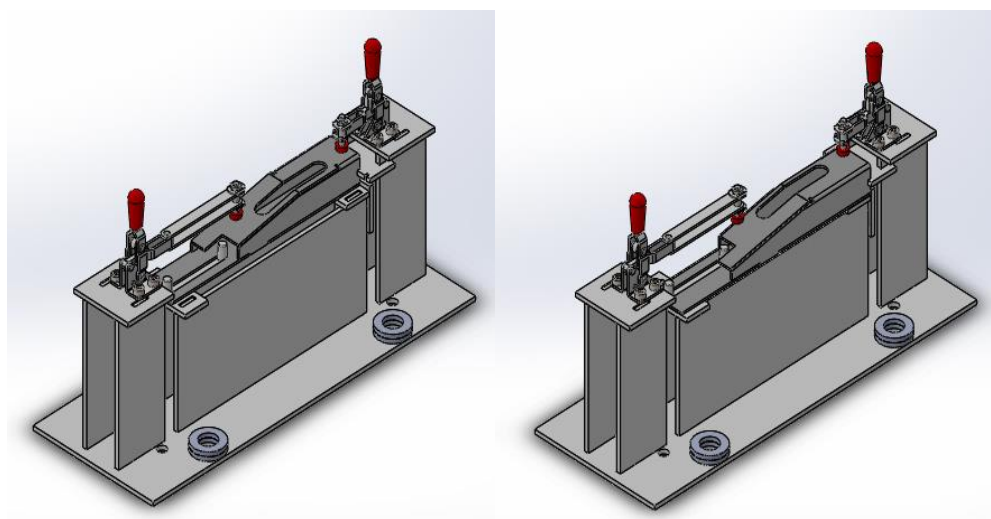


Figura 63 - Posicionamento dos conjuntos 0657669 e 0657670 no mesmo gabarit de soldadura laser

3.4.3 Soldadura laser

A terceira fase do processo experimental, de acordo com o planeamento, antes do corte de provetes, foi a soldadura laser das peças que são normalmente produzidas por soldadura TIG. Esta etapa resume-se à fixação das peças nos respetivos gabarits de soldadura (figura 66), após ter sido feita a programação do robot, e início da produção de peças por soldadura laser.

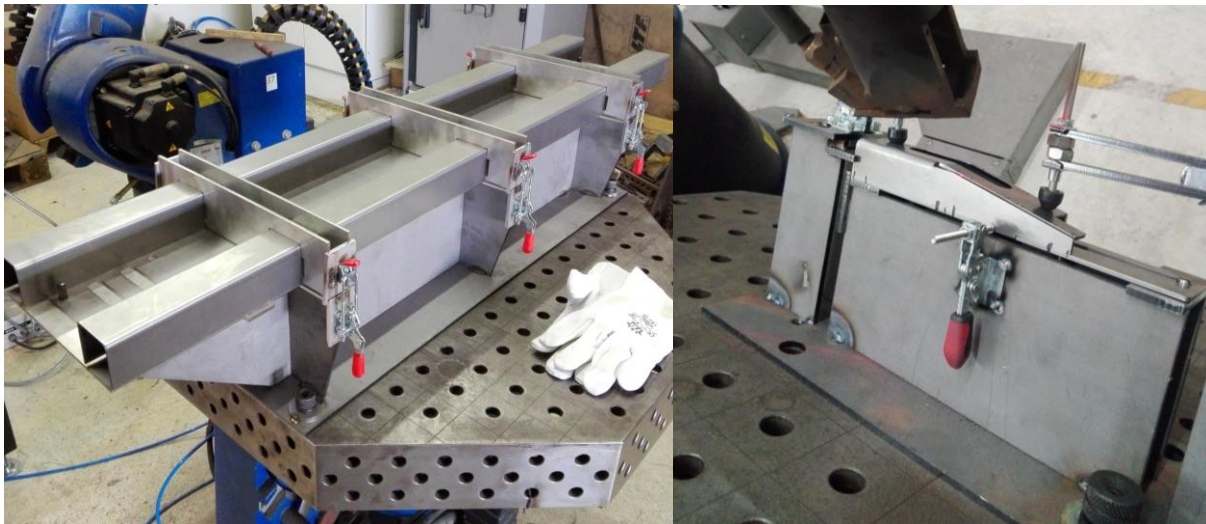


Figura 64 - Posicionamento dos conjuntos de peças no respetivo gabarit de soldadura (0657664: esquerda; 0657670: direita)

Tendo em conta que o principal foco de estudo da dissertação é a comparação de dois processos distintos de soldadura, os parâmetros utilizados na soldadura laser apenas variam em função do material e da geometria da peça a soldar, sendo considerados os parâmetros ótimos deste processo para cada caso. Entre os parâmetros selecionados, estão a potência da fonte laser, a velocidade de avanço do cabeçote do robot e a distância focal da lente. Este último tem influência no diâmetro e posicionamento do ponto focal do feixe que, para uma potência constante, regula a distribuição da energia pela área de incidência, noutros termos, a distância focal da lente determina a densidade energética do feixe laser.

A potência utilizada nesta fase experimental foi a máxima que a fonte consegue disponibilizar, de modo a obter penetração máxima na soldadura. Selecionou-se a potência máxima também pelo facto de, em termos científicos, se verificar que este é um processo de soldadura autogénea, sendo a soldadura obtida através da fusão do metal base.

Outros parâmetros foram recomendados como sendo os parâmetros ótimos para o processo de soldadura que se iria efetuar. Apresentam-se, na tabela 17, os valores utilizados para cada tipo de soldadura neste processo, assim como as características da soldadura a realizar em cada conjunto.

O processo de soldadura laser do conjunto 0657664 pode ser observado na figura 67. As imagens foram registadas através do exterior da cabine onde se encontra o robot.

Tabela 17 – Parâmetros utilizados na soldadura laser

Conjunto	Material da peça	Tipo de soldadura	Comprimento do cordão [mm]	Potência da fonte laser [W]	Velocidade avanço [mm/s]	Distância focal [mm]	Gás de proteção e caudal
0657664	AISI 304 2 mm	Canto/Topo a topo	10/10	3300	35/27	7/6,5	Árgon 8 l/min
0657669	ST 12 2 mm	Canto/Topo a topo	5/10	3300	15/35	9/-4	Árgon 8 l/min
0657670	ST 12 2 mm	Canto/Topo a topo	5/10	3300	15/35	9/-4	Árgon 8 l/min

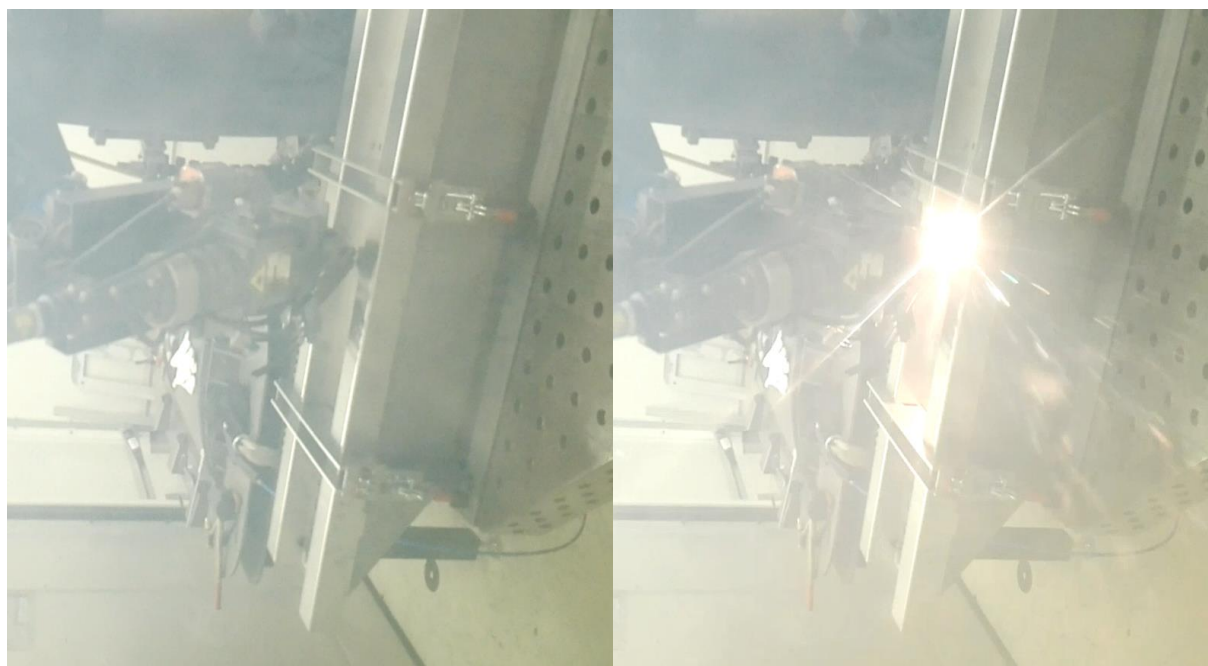


Figura 65 - Soldadura laser automática do conjunto 0657664 (a cor e desfocagem devem-se ao facto de a imagem ter sido captada através do vidro de proteção da cabine do robot)

3.4.4 Corte de provetes e ensaios a realizar

Ensaio metalográficos e ensaios de dobragem de cordões de soldadura foram os ensaios propostos para testar e estudar a qualidade da soldadura obtida pelos dois processos. O corte dos provetes para análise foi efetuado em função dos ensaios que iriam ser futuramente realizados.

O ensaio metalográfico consiste na observação da microestrutura, determinando os constituintes da amostra (metalografia qualitativa), e determinar outros dados específicos de um material metálico, como o tamanho de grão, forma e tipo de inclusões não metálicas, entre outros (metalografia quantitativa). Para realizar um ensaio metalográfico de um cordão de soldadura, são irrelevantes as dimensões do provete. Essencial será seccionar transversalmente o cordão de soldadura para posterior observação microscópica e macroscópica, com devida preparação das amostras, nomeadamente polimento e tratamento da superfície através de ataque químico. Para as amostras em questão, será avaliada a qualidade da soldadura em função da penetração, dada pela profundidade da zona onde houve fusão de material e pela falta de penetração da junta.

Já o ensaio de dobragem de cordões de soldadura, que permite caracterizar a resistência da junta (daí a designação por ensaio de resistência nas siglas atribuídas aos provetes, meramente por questões de designação) necessita de um corte específico para obtenção de um tipo de provete diferente. O corte de um provete para medição da resistência de uma junta soldada necessita ser exterior à soldadura, de forma a incluir todo o cordão na junta, com igual comprimento às abas de apoio à força que irá ser exercida durante o ensaio de dobragem.

Na figura 68 podem ser visualizados o tipo e formato de provetes obtidos. As designações adotadas para identificar os provetes em função do tipo de ensaio foram MC (ensaio metalográfico em soldadura de canto), MT (ensaio metalográfico em soldadura topo a topo), RC (ensaio de dobragem em soldadura de canto) e RT (ensaio de dobragem em soldadura topo a topo).

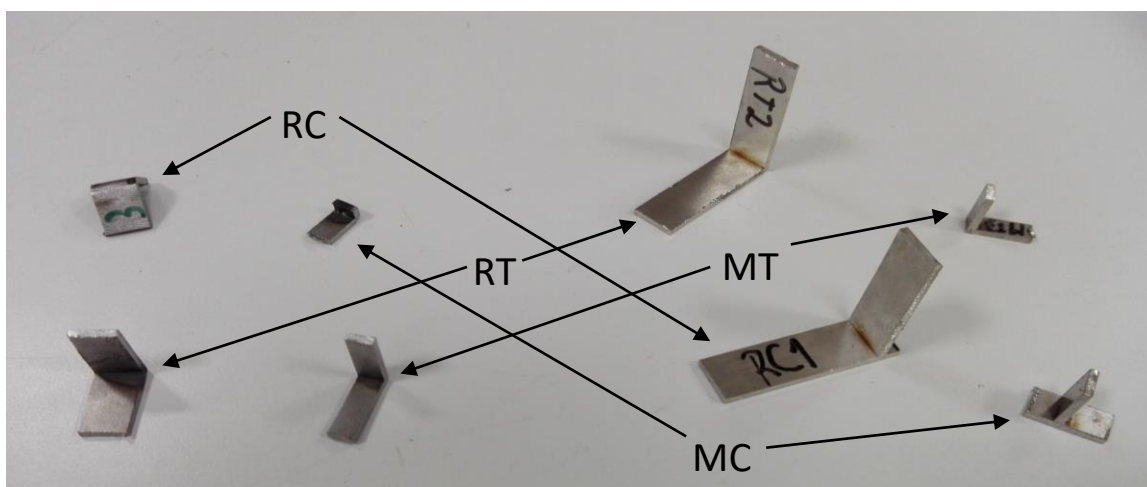


Figura 66 – Provetes cortados do conjunto 0657669/0657670 (esquerda) e do conjunto 0657664 (direita)

Como forma de garantir a validade e conformidade dos resultados obtidos nos ensaios a ser futuramente realizados, os provetes foram cortados, sempre que possível, de zonas distintas da peça a estudar, como se pode observar pela marcação efetuada nos conjuntos, nas figuras 69 e 70. Adicionalmente, ficou decidido efetuar 3 ensaios para cada tipo de provete, tendo sido cortados em cada peça soldada de forma distinta 12 provetes. Portanto, havendo 2 processos de soldadura, 2 peças a estudar, 4 tipos de provetes e a necessidade de recolha de 3 amostras de cada tipo de provete, obtiveram-se um total de 48 provetes.

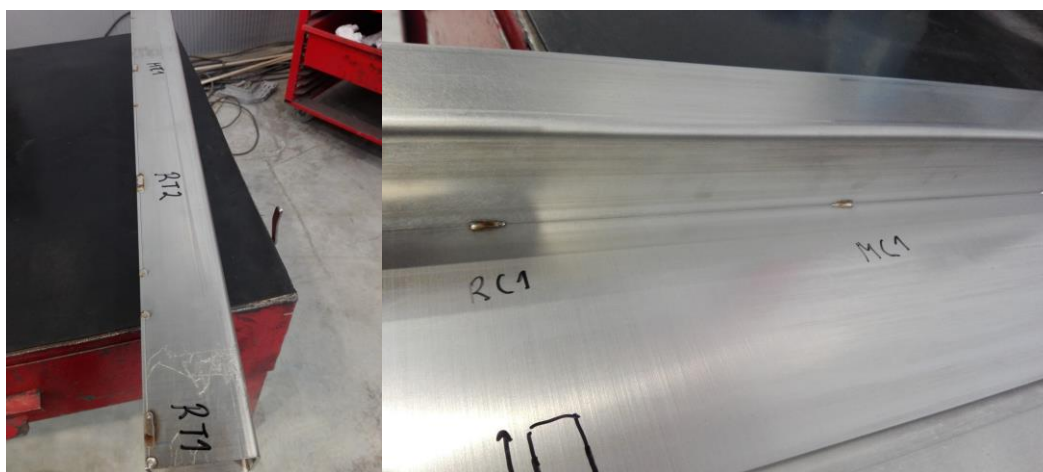


Figura 67 – Marcação das zonas de corte no conjunto 0657664



Figura 68 – Marcação das zonas de corte nos conjuntos 0657669 e 0657670

Sem deixar de referir a importância dos parâmetros de corte utilizados, e o papel desempenhado por estes para prevenir danos aos cordões de soldadura, foram utilizadas velocidades de corte e avanço consideradas usuais dentro da gama de valores disponíveis. O facto de se ter utilizado a velocidade mais alta disponível, apenas se verificou por questões de tornar o processo de corte mais célere e eficaz. Com a lubrificação e refrigeração em curso, era garantido que os provetes e a soldadura não iriam sofrer quaisquer alterações que afetassem o resultado dos ensaios. Estes valores podem ser consultados na tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros de corte dos provetes para ensaios

Conjunto	Material e espessura	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço da serra [°/min]	Caudal lubrificante [l/min]
0657664	AISI 304 2mm	80	4,5	3
0657669	ST12 2mm	80	4,5	3
0657670	ST12 2mm	80	4,5	3

4 Descrição dos Ensaios, Resultados e Discussão

No presente capítulo será feita a apresentação e discussão de resultados experimentais, referente aos ensaios de dobragem de cordões de soldadura (subcapítulo 4.1) e ensaios metalográficos (subcapítulo 4.2).

O cálculo da média e desvio-padrão dos valores obtidos será calculado de acordo com as equações 4.1 e 4.2, respetivamente.

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.1)$$

Onde:

X , é a média aritmética simples do conjunto de dados amostrais,
 x_i , é o valor de índice i do conjunto de dados amostrais, e
 n , é a dimensão da amostra, ou seja, o número de observações

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n}} \quad (4.2)$$

Onde:

σ , é o desvio-padrão da população,
 x_i , é o valor de índice i do conjunto de dados da população,
 X , é a média aritmética simples do conjunto de dados, e
 n , é a dimensão da população, ou seja, o número de observações

4.1 Ensaios de dobragem de cordões de soldadura

Os ensaios de dobragem foram realizados numa máquina servo-hidráulica de capacidade 100 kN da marca MTS, modelo 810 (figura 71 esquerda). A máquina está equipada com um controlador MTS FlexTest 40 e *software* de controle e aquisição de sinais. A figura 71 (direita) apresenta o *setup* utilizado nos ensaios. Os testes foram executados em controle de deslocamento a 10 mm/min com aquisição dos sinais de força e deslocamento do atuador. Posicionada acima do prato encontra-se uma célula de carga de 10 kN (força máxima) utilizada nos testes. O posicionamento dos provetes e representação da direção do deslocamento do prato pode ser observado na figura 71 (direita).

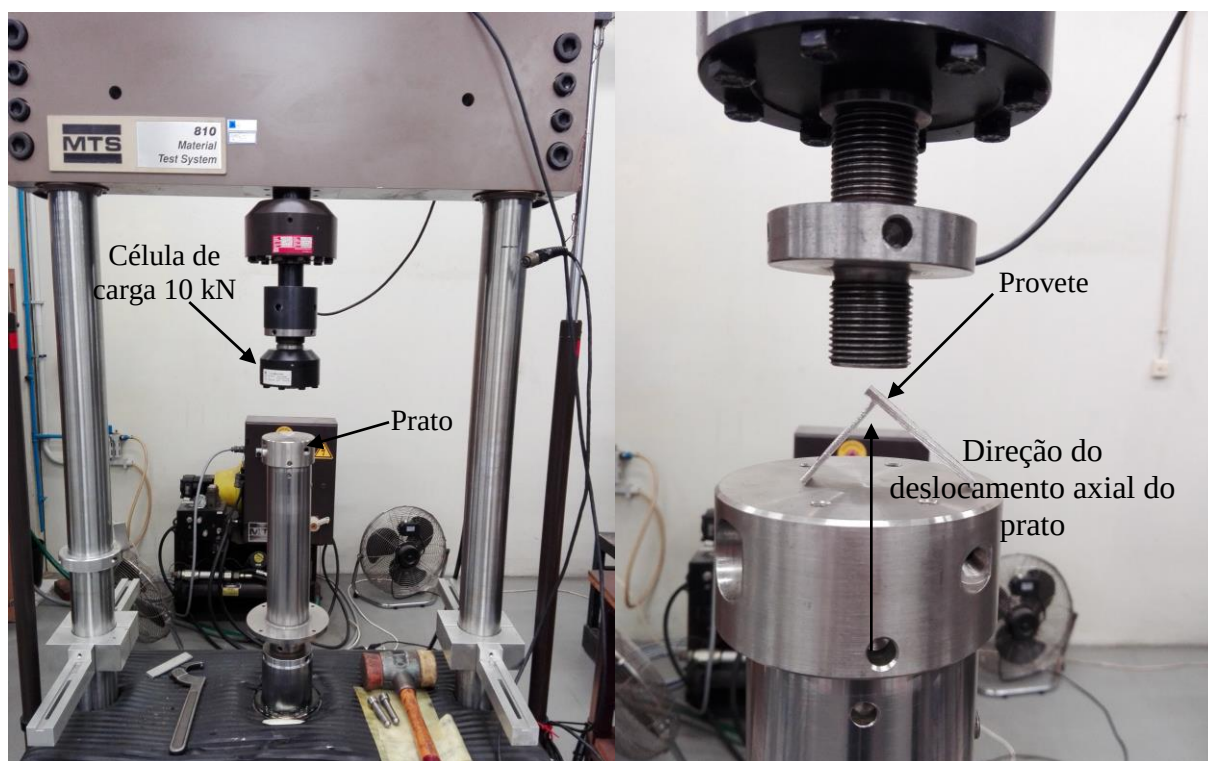


Figura 69 - Máquina servo-hidráulica MTS 810 com célula de carga de 10 kN (esquerda); *setup* utilizado nos ensaios(direita)

Nesta fase, foram ensaiados experimentalmente os provetes do tipo RT e RC de ambos os conjuntos (ver figura 68). Para garantir coerência e máxima uniformidade nos valores obtidos a partir dos ensaios, os provetes foram cortados com um comprimento de aba desde a junta de soldadura aproximadamente igual em todos os casos. Na figura 72 encontra-se a representação do comprimento de aba escolhido para os provetes dos conjuntos 0657664 (aço inoxidável) e 0657669/0657670 (aço carbono). A dimensão dos provetes teve de ser ajustada à dimensão das peças, levando a duas dimensões de provetes diferentes nesta fase de ensaios. Para efeitos de contribuição para o estudo, nesta dissertação apenas será imprescindível que os provetes do mesmo material e do mesmo conjunto de peças tenham iguais dimensões, para comparar as diferenças da alteração do método de soldadura.

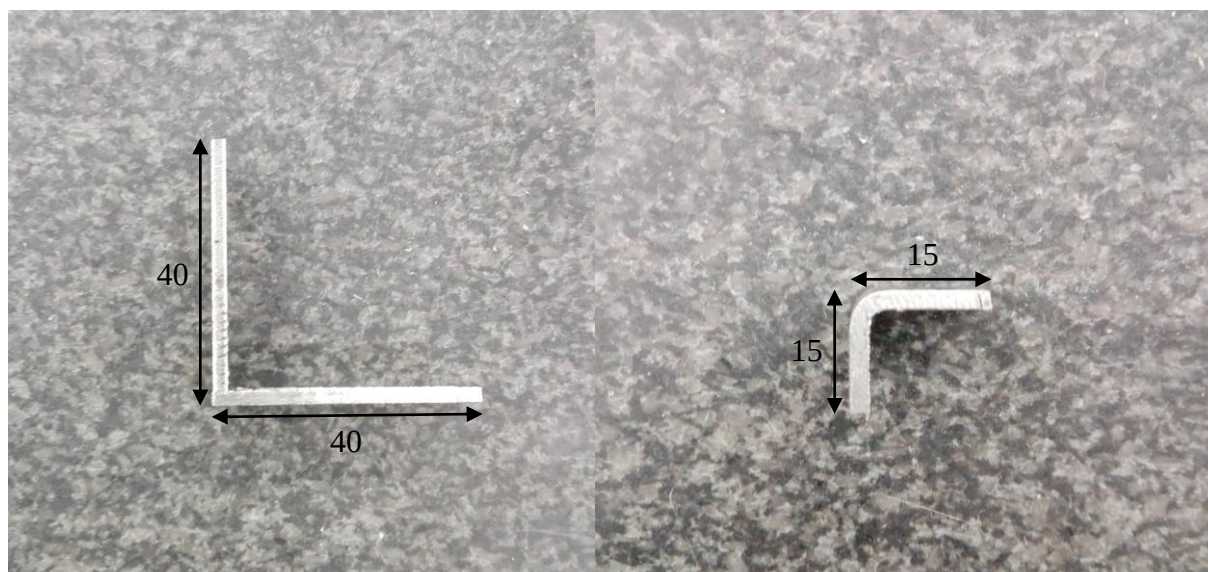


Figura 70 - Dimensões, em milímetros, do comprimento de aba dos provetes dos conjuntos 0657664 (esquerda) e 0657669/670 (direita)

Considerando que a distância à zona de soldadura é maior nos provetes do conjunto 0657664, esperam-se, à partida, menores valores de carga registados nos ensaios deste conjunto. O facto anterior justifica-se pela maior distância do cordão de soldadura às extremidades das abas, que servem de apoio simples à força a exercer contra a célula de carga, resultando num momento fletor mais elevado na zona de soldadura, e levando assim o provete à rotura para cargas inferiores.

4.1.1 Resultados do conjunto 0657664 para soldadura TIG

Os provetes do conjunto 0657664 com soldadura TIG de canto, foram os primeiros a ser ensaiados. Utilizou-se uma velocidade de deslocamento do prato de 3 mm/min para o primeiro ensaio, como forma de testar o comportamento do provete e constatar a tolerância do mesmo à solicitação por parte da máquina. Para o segundo, ensaio aumentou-se a velocidade para 10 mm/min e, tendo-se verificado que a força de rotura do provete se encontrava dentro da mesma gama de valores, optou-se por utilizar esta velocidade para os restantes ensaios.

Na figura 73 encontram-se as curvas de força vs. deslocamento axial para os provetes RC1, RC2 e RC3, que registaram valores máximos de força de compressão 164 N, 144 N e 223 N, respetivamente. A média da força máxima registada é de 177 N, para soldadura TIG de canto com material de adição, nas peças de aço inoxidável.

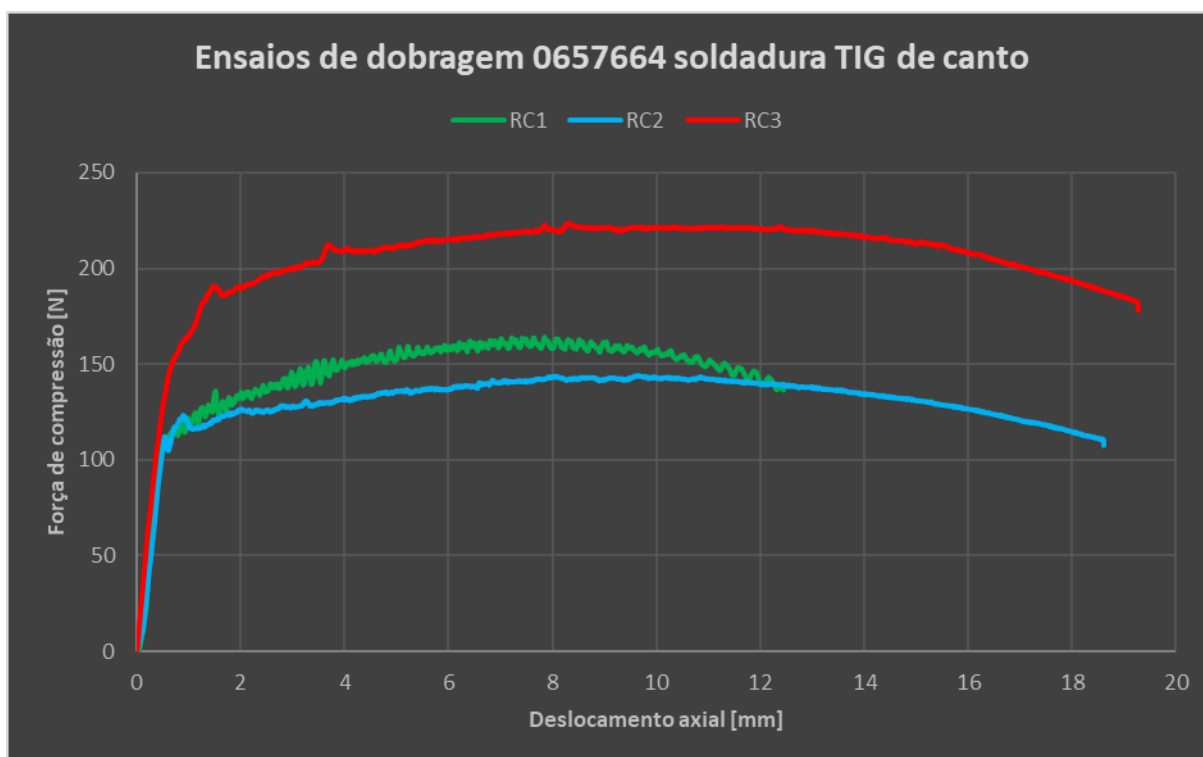


Figura 71 – Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RC1, RC2 e RC3 para soldadura TIG do conjunto 0657664

Na figura 74 é possível constatar uma diminuição na gama de valores de força máxima registada para este grupo de ensaios de dobragem. Os valores máximos de força registados para os provetes RT1, RT2 e RT3 foram de 137 N, 127 N e 106 N, respetivamente, o que resulta num valor médio de 123 N para a força máxima registada nos ensaios de dobragem de soldadura TIG topo a topo. A justificação para o decréscimo destes valores, tratando-se do mesmo processo de soldadura, encontra-se no facto de se tratar de soldadura de um tipo de junta diferente. Um fator que pode ter alguma influência é a ausência de material de adição, que no caso da soldadura de canto, confere melhores propriedades à junta.

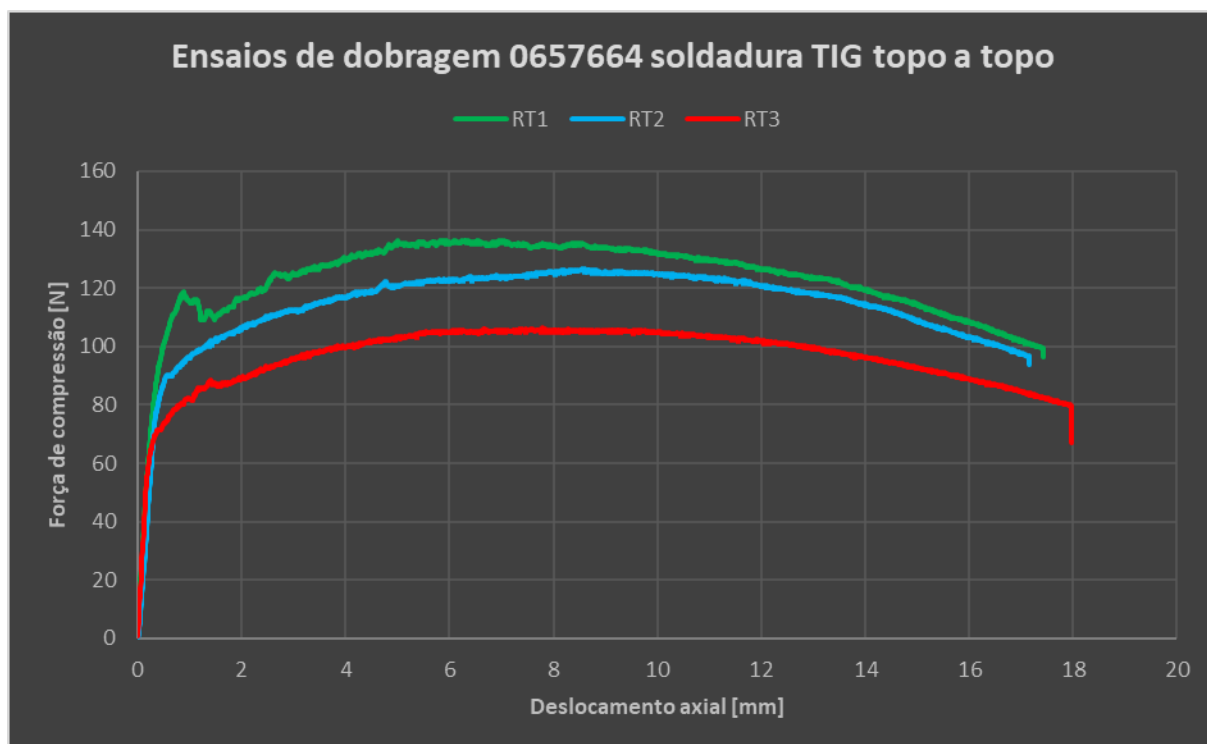


Figura 72 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RT1, RT2 e RT3 para soldadura TIG do conjunto 0657664

4.1.2 Resultados do conjunto 0657664 para soldadura laser

Os ensaios dos provetes do conjunto 0657664, obtidos por soldadura laser, originaram as curvas presentes nas figuras 75 e 76, para soldadura de canto e topo a topo, respetivamente.

Com os dados da figura 75 é possível afirmar que a automatização do processo não só levou a um aumento da gama de valores de força máxima, como também a um conjunto de resultados bastante mais uniforme. Mediram-se, para este grupo de ensaios, forças máximas de 184 N, 228 N e 218 N para os provetes RC1, RC2 e RC3, respetivamente. Este conjunto de valores representa uma média de 210 N como força máxima de compressão, substancialmente superior ao valor médio de 177 N para a força máxima registada nos mesmos provetes obtidos por soldadura TIG.

A única conclusão que se pode tirar do aumento de força registado é que, por soldadura laser, se obtiveram juntas com maior resistência. Nesta fase da análise, nada se pode concluir acerca da influência dos parâmetros de soldadura. Para levar a cabo essa análise, será necessário esperar pelos resultados dos ensaios metalográficos.

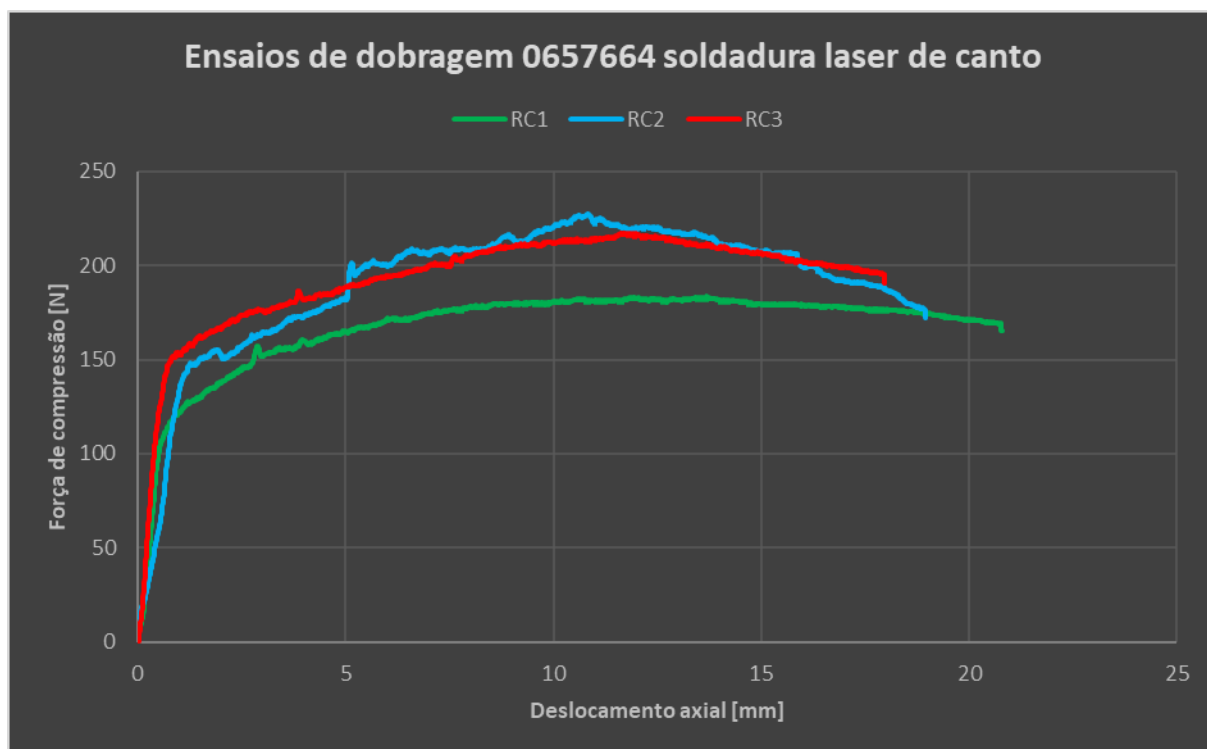


Figura 73 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RC1, RC2 e RC3 para soldadura laser do conjunto 0657664

A soldadura laser topo a topo apresenta uma enorme discrepância de valores de força de compressão quando se analisam os resultados de juntas de soldadura topo a topo (figura 76). Os valores de força máxima registados foram de 106 N, 195 N e 390 N para os provetes RT1, RT2 e RT3, respetivamente. A média obtida para estes dados é de 230 N.

Apesar de apresentar valor médio superior quando comparado com a soldadura de canto, a não uniformidade de resultados apenas permite concluir que existiram anomalias na soldadura de alguns provetes. Possíveis explicações poderão ser o incorreto posicionamento das peças no gabarit, falha de projeto/montagem do gabarit, existência de condições anormais de soldadura ou até colocação incorreta do gás de proteção, por exemplo.

Caso se opte por declarar o valor de RT1 como inconclusivo ou anormal, excluindo-se assim este do conjunto de dados a analisar, obter-se-á uma força média de 293 N para soldadura laser topo a topo.

Com a exclusão dos valores da curva RT1, o desvio-padrão da força máxima registada nos ensaios é de 19 N para soldadura de canto e de 98 N para soldadura topo a topo. A não homogeneidade da soldadura topo a topo, representada numericamente pelo elevado valor do desvio-padrão, poderá ser justificada com a análise metalográfica. Nessa fase poderá ser realizado um relacionamento com os resultados dos ensaios de dobragem e apresentação de soluções para os aparentes problemas da soldadura laser nas juntas topo a topo das peças em aço inoxidável.

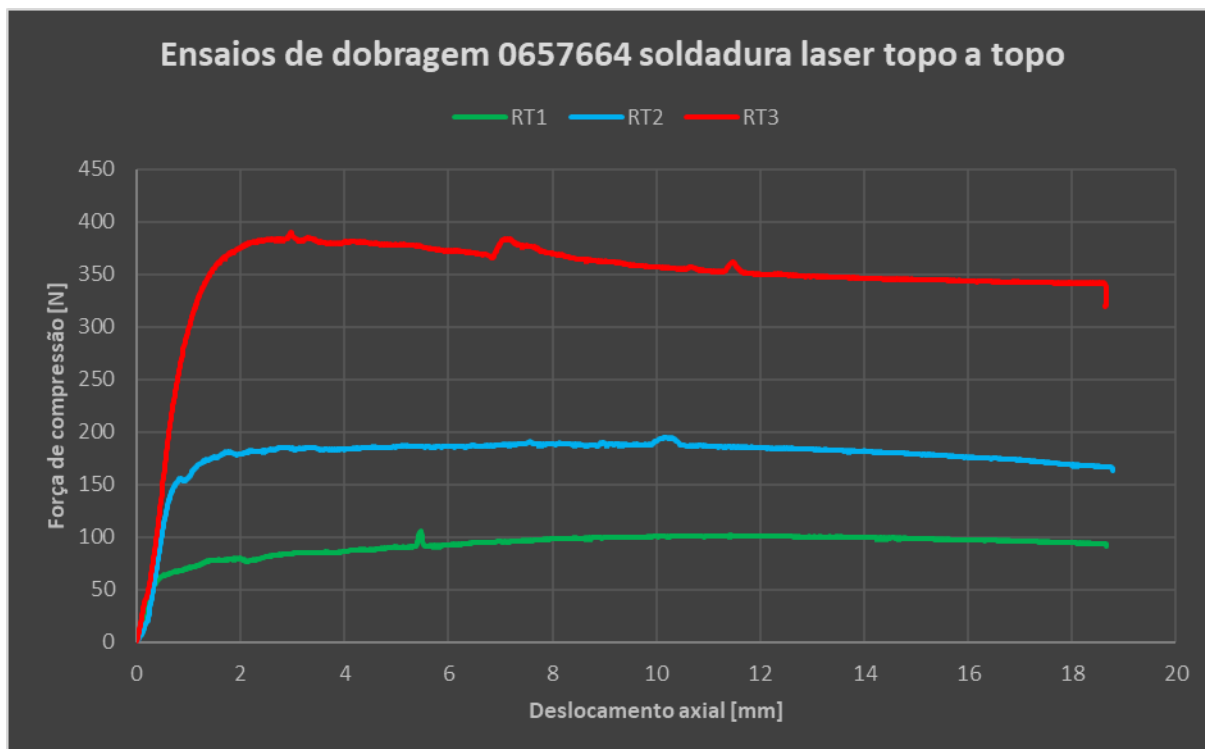


Figura 74 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RT1, RT2 e RT3 para soldadura laser do conjunto 0657664

4.1.3 Resultados do conjunto 0657669/670 para soldadura TIG

Os valores de deslocamento axial apresentados nas curvas força vs. deslocamento axial deste conjunto são inferiores devido à menor dimensão de aba dos provetes ensaiados experimentalmente. Como já afirmado e justificado no subcapítulo 4.1, este fator leva ao registo de forças de compressão consideravelmente mais elevadas, ainda que se trate de um material com propriedades mecânicas inferiores às do conjunto 0657664.

Ao analisar a figura 77, que se trata de soldadura TIG de canto com material de adição, pode constatar-se que a gama de valores de força máxima se encontra na ordem de 1 kN. A força máxima registada neste grupo de ensaios foi de 996 N, 732 N e 1197 N para os provetes RC1, RC2 e RC3, respetivamente. A média da força máxima registada em cada ensaio é de 975 N.

O desvio-padrão da força máxima de compressão para soldadura TIG de canto neste conjunto de peças é de 190 N. Dentro da gama de valores obtidos, considerando que se trata de um processo de soldadura manual, com operação de acabamento e apoiado pela influência da quantidade de material de adição (que pode variar), podem estes fatores justificar a discrepância de valores observada nas curvas da figura 77.

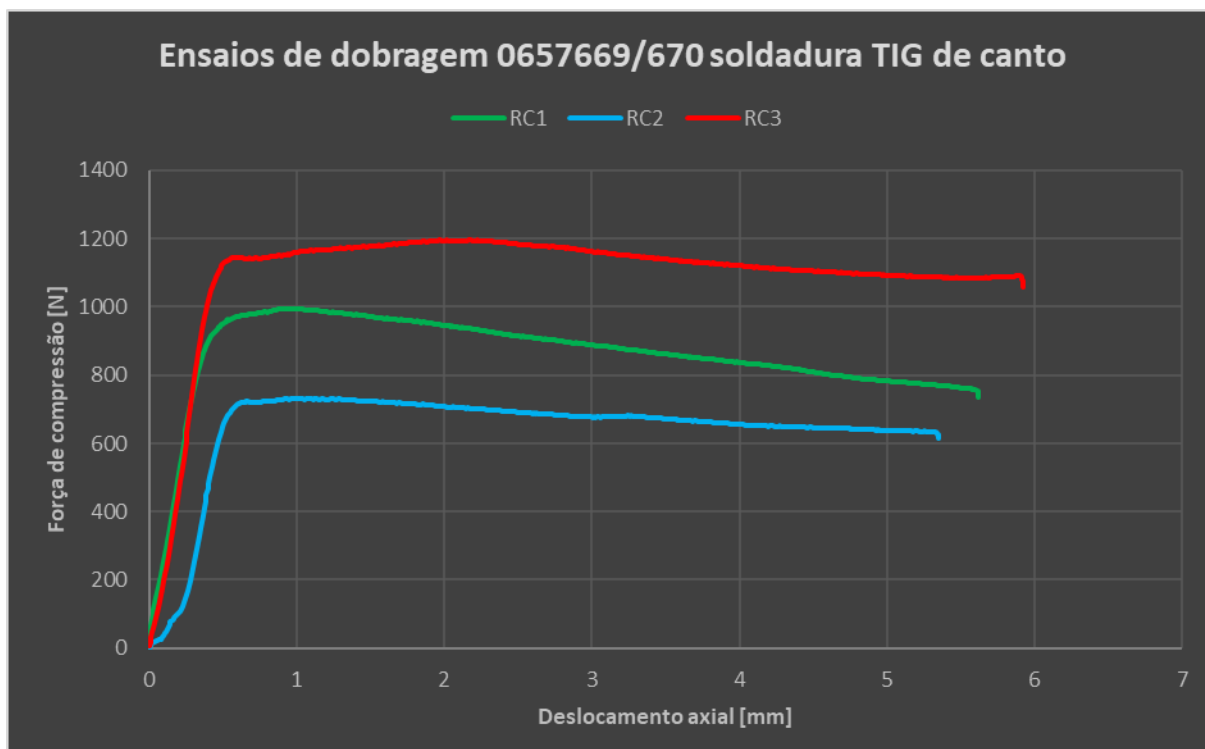


Figura 75 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RC1, RC2 e RC3 para soldadura TIG do conjunto 0657669/670

De acordo com o esperado, pela análise das peças do conjunto 0657664, a ausência de material de adição na soldadura topo a topo e o facto de se tratar de um tipo de junta diferente, produz juntas de soldadura com propriedades mecânicas inferiores à soldadura de canto. Neste caso em concreto é notória, nas curvas da figura 78, a diminuição da força máxima suportada pelo cordão de soldadura topo a topo.

Os valores máximos da força de compressão para os provetes RT1, RT2 e RT3 são 332 N, 372 N e 143 N, respetivamente. Deste modo, obtém-se o valor médio de 283 N como força máxima de compressão para soldadura TIG topo a topo.

Considerando o desvio-padrão de 100 N, facilmente se conclui, para a gama de valores observáveis, que este se justifica por uma possível anomalia de soldadura no provete RT3, que apresenta valores de força muito inferiores a RT1 e RT2. Uma metodologia para conseguir a uniformização destes valores, será efetuar a devida preparação das juntas a soldar e garantir posicionamento o mais correto possível das peças antes de começar a operação de soldadura. Através desta preparação, poderão ser obtidos resultados mais constantes, regularizando algumas discrepâncias até agora verificadas. A solução proposta para esta anomalia é válida para todo e qualquer resultado anormal, num processo de soldadura por arco elétrico realizado manualmente.

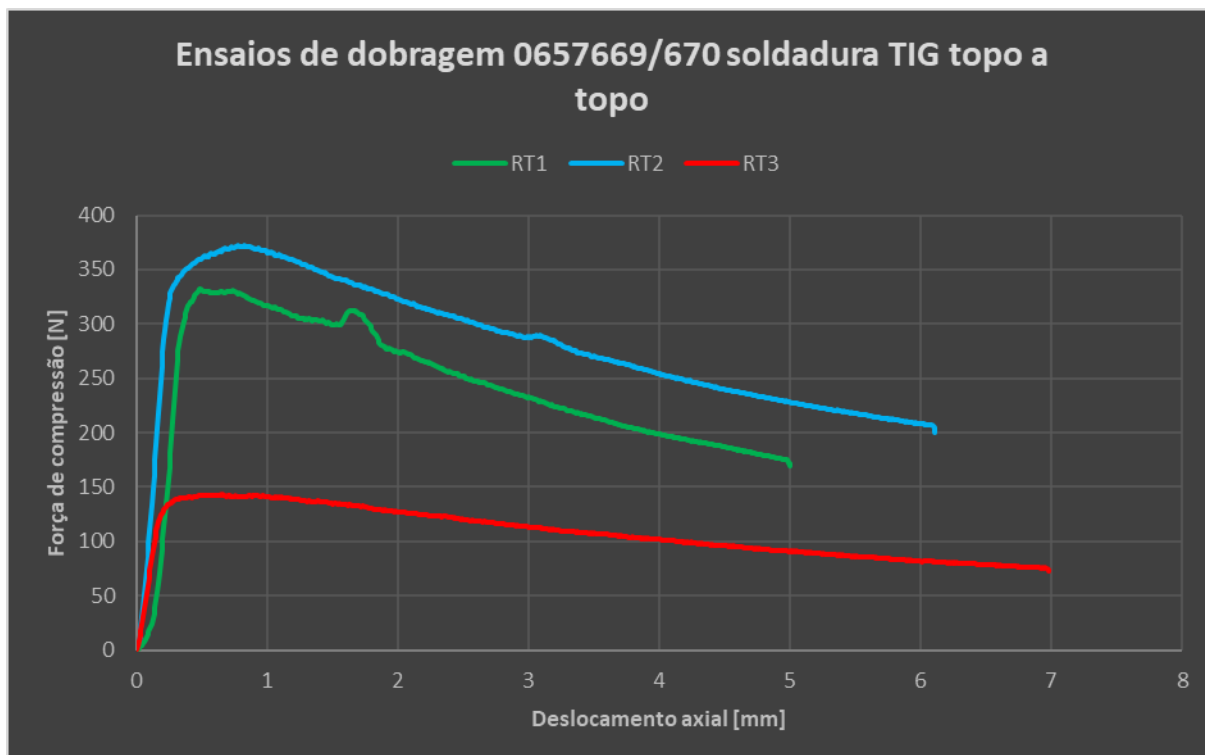


Figura 76 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RT1, RT2 e RT3 para soldadura TIG do conjunto 0657669/670

4.1.4 Resultados do conjunto 0657669/670 para soldadura laser

Na figura 79, onde se encontram as curvas força vs. deslocamento axial para soldadura laser de canto dos provetes referentes ao conjunto 0657669/670, tem-se como valor máximo de força de compressão 741 N, 839 N e 1126 N para os provetes RC1, RC2 e RC3, respetivamente. A partir daqui, obtém-se um valor de 902 N como força média e um desvio-padrão de 163 N.

Fazendo uma análise comparativa com os resultados obtidos por soldadura TIG da mesma junta, constata-se que o valor máximo da força de compressão é ligeiramente inferior, devido à ausência de material de adição. Foi realizado um reajustamento ao planificado da peça superior do conjunto, para diminuição do *gap* da junta de soldadura, tornando assim possível a realização de soldadura autogénea. Por outro lado, a diminuição do desvio-padrão padrão com a automatização do processo, ainda que ligeira, permite comprovar que um processo de soldadura automática apresenta resultados mais regulares.

Soldadura mais homogênea será, à partida, mais desejável, em detrimento de maior resistência da junta. Para elevadas cadências de produção, como é o caso dos conjuntos de peças apresentados nesta dissertação, será fundamental que ensaios deste tipo não apresentem valores muito discrepantes, para cumprir as conformidades e requisitos do cliente.

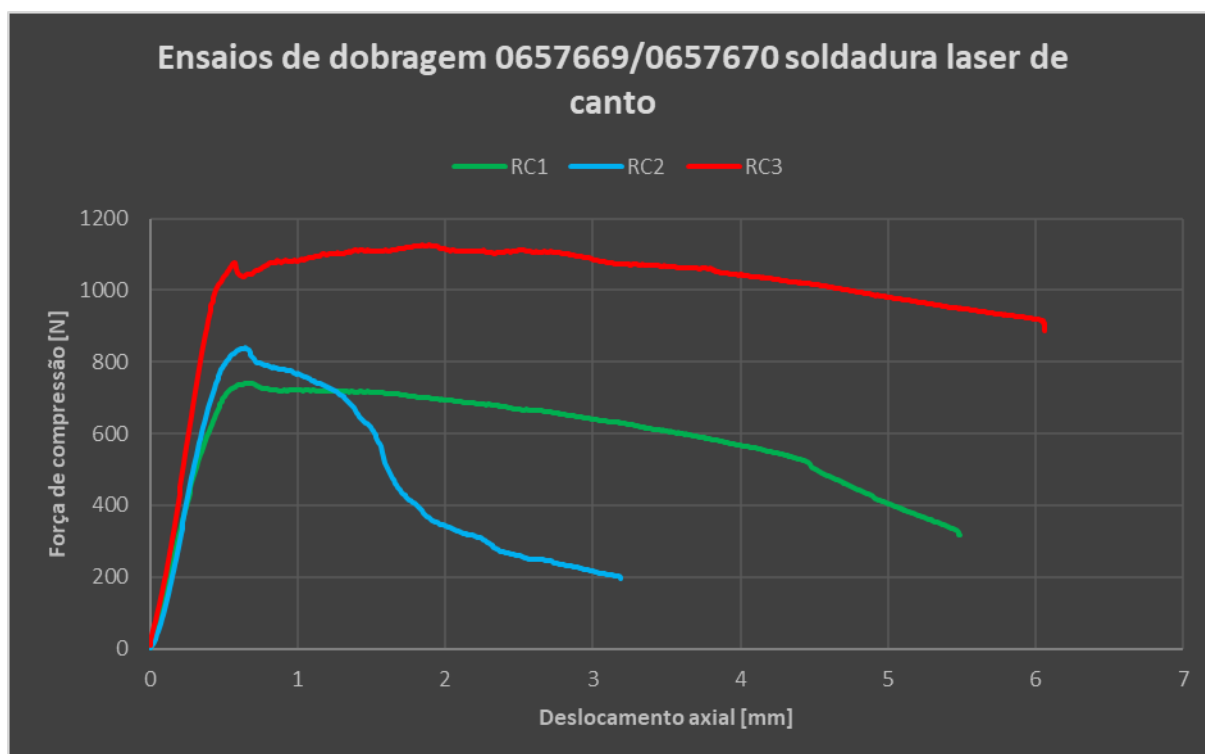


Figura 77 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RC1, RC2 e RC3 para soldadura laser do conjunto 0657669/670

Finalizando a análise dos ensaios de dobragem encontra-se, na figura 80, por soldadura laser topo a topo, o conjunto de valores que aparenta ser mais positivo. Quando se passa o conjunto 0657669/670 a soldadura laser as melhorias são bastantes significativas tanto a nível de força de compressão como de uniformidade na soldadura obtida. Registaram-se para os provetes RT1, RT2 e RT3 força de compressão de 1063 N, 1143 N e 1067 N, respetivamente.

A média da força máxima é de 1091 N e o desvio-padrão de 37 N. A automatização do processo neste conjunto de peças para soldadura topo a topo leva a um aumento de aproximadamente 800 N da resistência da junta. Apesar deste aumento na gama de valores, a redução do desvio-padrão leva à perceção de que a melhoria na estabilidade do processo foi implementada juntamente com o aumento da qualidade da soldadura.

A produção de um gabarit de soldadura mais eficiente para este conjunto, com a utilização de parâmetros de soldadura que revelam melhores resultados, geram soldadura de qualidade notoriamente superior no conjunto 0657669/670.

Com a análise dos ensaios metalográficos, será justificada e apoiada a abordagem feita aos ensaios de dobragem, procurando a confirmação das suposições para as anomalias que foram encontradas nos valores registados.

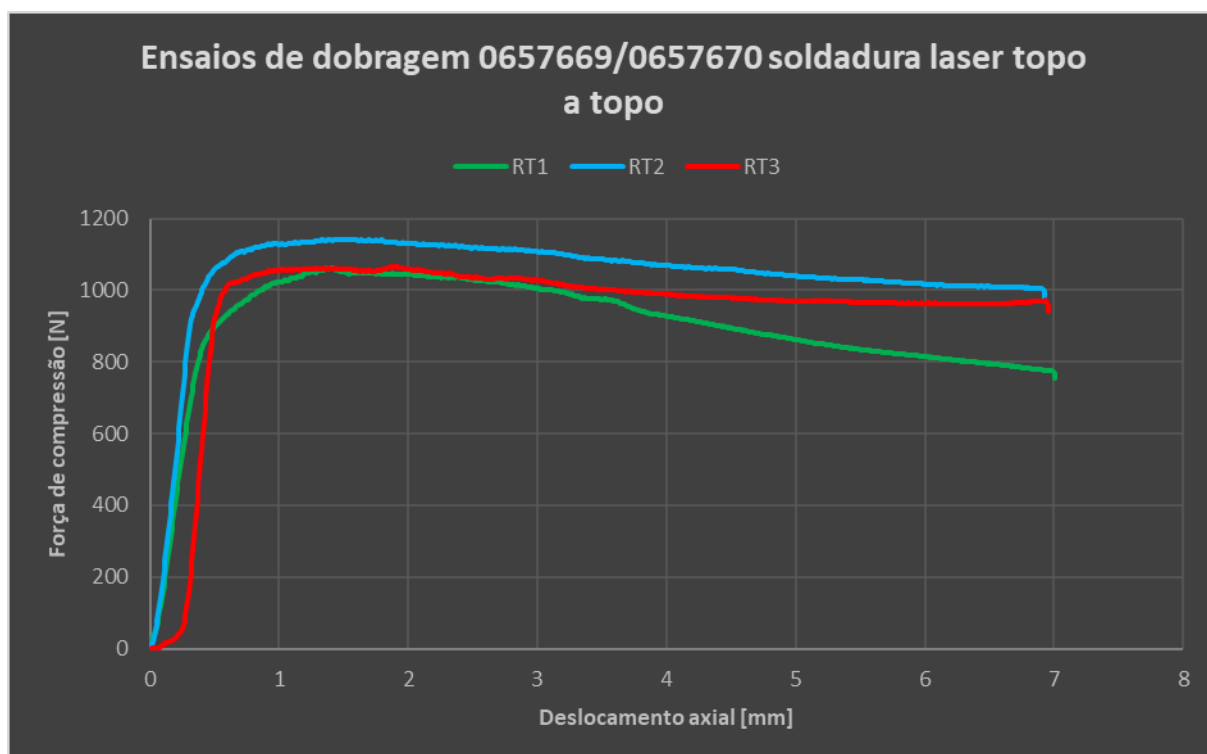


Figura 78 - Curvas força vs. deslocamento axial resultantes dos ensaios de dobragem dos provetes RT1, RT2 e RT3 para soldadura laser do conjunto 0657669/670

Na tabela 19 encontram-se todos os valores da média e desvio-padrão da força máxima registada em cada grupo de ensaios de dobragem. De um modo geral, os provetes obtidos por soldadura laser suportam cargas superiores e apresentam maior homogeneidade de resultados. Até este ponto da análise, apenas é possível concluir que no processo de soldadura TIG a resistência das juntas é consideravelmente inferior, comparativamente ao processo de soldadura laser. Verifica-se também para a soldadura laser, por ser um processo de fabrico automatizado, que a consistência das juntas produzidas é substancialmente melhor, com a observação de valores menores de desvio-padrão na força registada.

Tabela 19 – Resumo da informação recolhida nos ensaios de dobragem

Conjunto		Força máxima TIG [N]		Força máxima Laser [N]	
		Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
0657664	RC	177	34	210	19
	RT	123	13	230	98
0657669/0657670	RC	975	190	902	163
	RT	283	100	1091	37

4.2 Ensaios metalográficos

A realização de ensaios metalográficos decorreu nos provetes do tipo MC e MT. A dimensão deste tipo de provetes já foi preparada no corte para ser colocada nas cavidades onde se procedeu ao vazamento da mistura de resina que iria suportar o provete (figura 81). Após a solidificação da resina todos os provetes foram lixados em 4 lixas com diferentes tamanhos de grão, sucessivamente P80, P180, P320 e P800, segundo a norma europeia FEPA. Seguidamente procedeu-se ao polimento em pano lubrificado com alumina e pano lubrificado com *spray* de diamante de tamanho de grão 3 μm e 1 μm . Para finalizar a preparação das amostras antes de proceder à visualização na lupa, foi realizado ataque químico com uma solução de Super Picral (20 g de ácido pícrico e 100 ml de ácido clorídrico) nas amostras de aço inox e uma solução de Nital a 2% (98 ml álcool e 2ml de ácido nítrico) nas amostras de aço carbono, de forma a realçar as zonas a visualizar.



Figura 79 – Tipo de resina e endurecedor para realizar a mistura (esquerda); vazamento da mistura para o suporte de solidificação (direita)

No decorrer da análise dos ensaios metalográficos, verificou-se a existência de uma cor acastanhada em algumas amostras 0657664 por soldadura TIG e laser, e 0657669/670 por soldadura TIG. A presença desta cor deve-se à oxidação das peças, dado que se encontraram inutilizadas, durante cerca de um mês, após o corte até à realização dos ensaios.

Para efeitos de recolha de resultados, considera-se como penetração do cordão de soldadura a profundidade máxima da zona onde o material entrou em fusão. É também medida a falta de penetração da junta, sendo esta dimensão o comprimento da junta que não entrou em fusão. Outro parâmetro que foi possível medir em alguns casos, consiste no desfaseamento do cordão de soldadura relativamente à junta.

4.2.1 Análise das amostras 0657664 por soldadura TIG

Tal como nos ensaios de dobragem, os ensaios metalográficos decorreram pela mesma ordem no que diz respeito ao conjunto a soldar e ao tipo de soldadura. Analisando o conjunto 0657664 com soldadura TIG de canto, observa-se na figura 82 que a penetração do cordão de soldadura das peças a unir foi de 1 mm no provete MC1 e de 0,9 mm nos provetes MC2 e MC3. A falta de penetração na junta de soldadura foi de 1,3 mm para os provetes MC1 e MC2 e de 1,5 mm no provete MC3.

Para soldadura TIG de canto nas peças de aço inoxidável, a falta de penetração na junta foi superior a 50% do seu respetivo comprimento. O comprimento da junta corresponde à espessura das chapas a soldar, que é 2 mm em todas as peças. O ângulo utilizado para executar a soldadura neste tipo de junta, não permite que haja penetração total com um cordão de soldadura apenas.

Para obtenção de penetração total em casos como este, é obrigatório executar um cordão de soldadura em cada lado da junta. Dois cordões de soldadura em lados opostos, poderiam levar à interseção dos cordões aproximadamente a meio da junta de soldadura. Considerando a falta de penetração medida nas amostras da figura 82, inferior a 50% do comprimento da junta, teria ainda de ser aumentada a intensidade de corrente na fonte utilizada. Maior intensidade de corrente levaria a um aumento da entrega térmica pelo arco elétrico, aumentando a quantidade de material que entra em fusão e diminuindo a falta de penetração na junta. No entanto verificar-se-ia um aumento da zona termicamente afetada.

Um detalhe relevante que se pode observar na figura 82 é a concavidade dos cordões de soldadura. Ainda que utilizando material de adição, a quantidade depositada não foi suficiente para evitar a geração da concavidade do cordão de soldadura. Cordões de soldadura com perfis côncavos são, no entanto, benéficos na redução de concentração de tensões, levando a um aumento da resistência da junta à fadiga.

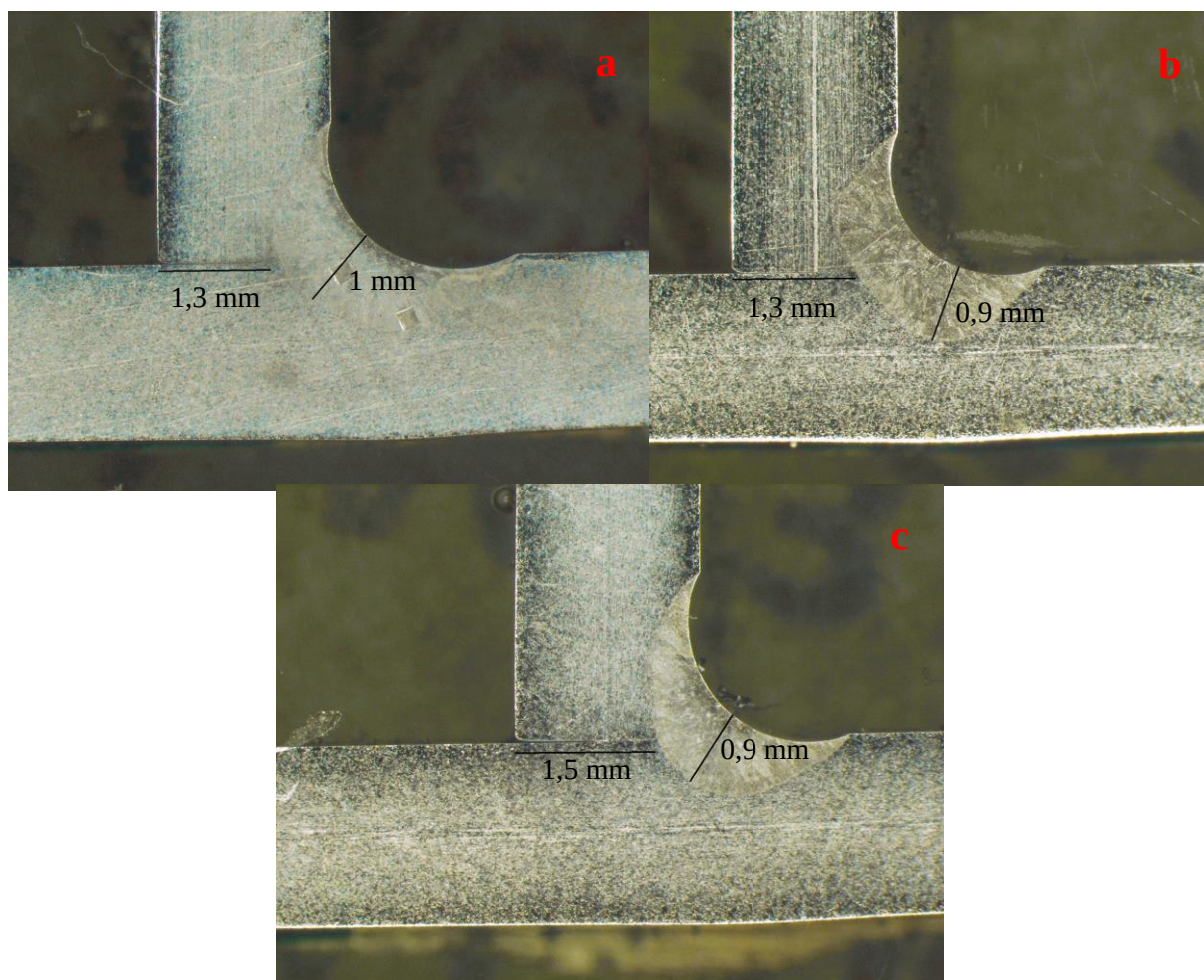


Figura 80 – Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MC1 (a), MC2 (b) e MC3 (c) do conjunto 0657664 por soldadura TIG de canto

Ainda na mesma peça, mas tratando-se agora de juntas de soldadura topo a topo (figura 83), é notório à primeira vista que o cordão de soldadura está ligeiramente desfasado da junta em todas as amostras. O facto de se tratar de um processo de soldadura manual, torna difícil para o operador, como se pode verificar, a realização da operação na posição mais correta.

Procedendo agora à quantificação da penetração do cordão de soldadura, tem-se para os provetes MT1 e MT3 o valor de 1,1 mm, para o provete MT2 mediu-se 1,0 mm. Apesar da direção do cordão se verificar paralelo à junta de soldadura, há um desfasamento entre estes dois valores, medido verticalmente na figura 83. O desfasamento levou a que a falta de

penetração na junta de soldadura fosse de 1,3 mm para o provete MT1 e 1,4 mm para os provetes MT2 e MT3. Como se pode verificar, para a mesma intensidade de corrente utilizada no arco elétrico de soldadura TIG, a falta de penetração na junta será tanto maior quando maior for o desfasamento do cordão de soldadura relativamente à junta.

Tal como na soldadura TIG de canto deste conjunto, a falta de penetração foi superior a 50% do comprimento da junta em todos os casos.

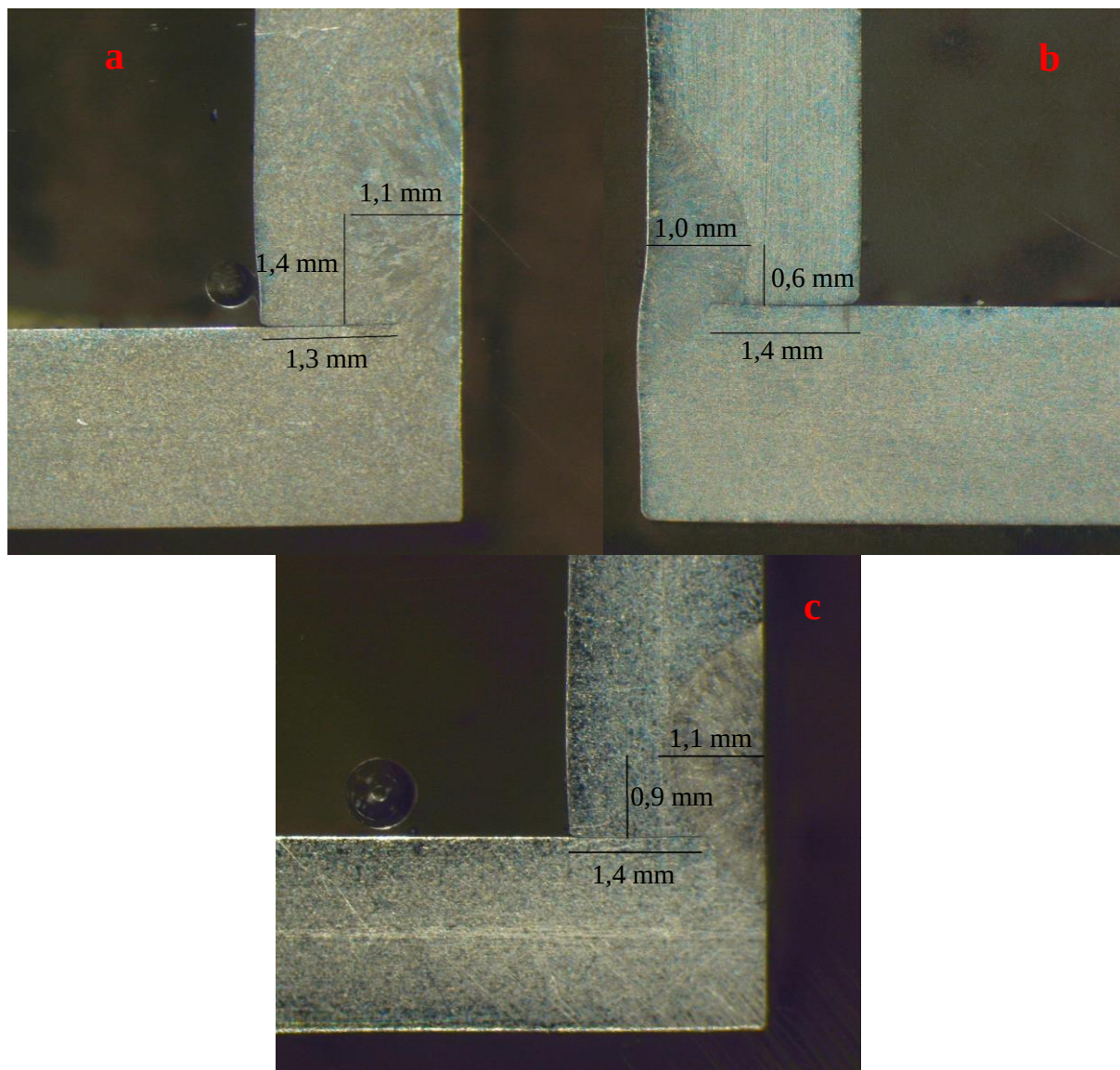


Figura 81 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MT1 (a), MT2 (b) e MT3 (c) do conjunto 0657664 por soldadura TIG topo a topo

4.2.2 Análise das amostras 0657664 por soldadura laser

A obtenção de resultados de força máxima superiores em soldadura laser nos ensaios de dobragem, já levaria a crer que a metalografia poderia corresponder. Apesar de se verificar uma anomalia na concavidade do provete MC2 (figura 84b), a penetração do cordão de soldadura é de 1,8 mm para os provetes MC1 e MC2, e de 2,1 mm no provete MC3. A falta de penetração na junta foi de 0,8 mm para os provetes MC1 e MC2, e de 1,2 mm para o provete MT3.

Com a melhoria de resultados, foi possível obter penetração superior a 50% do comprimento da junta nos provetes MC1 e MC2. Para os parâmetros seleccionados para

realizar esta operação, seria possível obter penetração total com a execução de um cordão de soldadura em cada extremidade da junta. Mesmo para o provete MC3, que obteve penetração inferior a 50% do comprimento da junta, através da execução de um cordão do lado oposto, poderia conseguir uma penetração na junta de 1,2 mm, como se verificou nos restantes provetes, e alcançar deste modo a penetração total.

Ao observar a folga das peças na figura 84a e figura 84c, dos provetes MC1 e MC3 respetivamente, constata-se que estas estão praticamente em contacto, facilitando a soldadura e evitando a concavidade excessiva que se verifica no provete MC2 (figura 84b). O melhor posicionamento das peças no gabarit e o controlo do ângulo do laser em relação à junta, são soluções para prevenir anomalias deste tipo, que também acabam por levar à redução da penetração do cordão de soldadura.

Com uma penetração do cordão de soldadura na junta cerca de duas vezes superior, comparando a soldadura laser com soldadura TIG, justifica-se que mesmo sem adição de material, os resultados obtidos nos ensaios de dobragem sejam mais homogêneos e que as forças máximas de compressão sejam superiores.

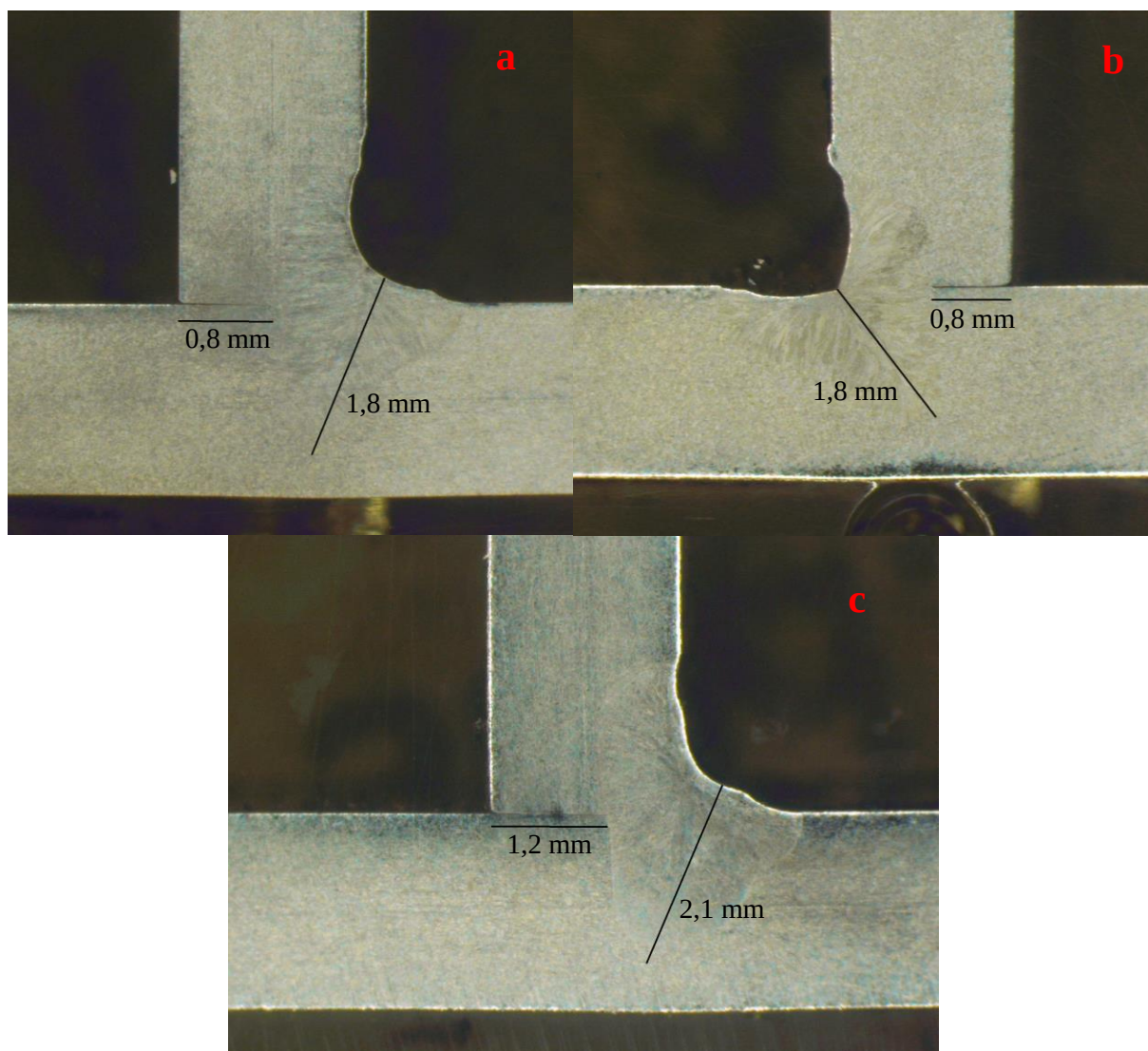


Figura 82 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MC1 (a), MC2 (b) e MC3 (c) do conjunto 0657664 por soldadura laser de canto

Analisando a figura 85, é possível verificar que o provete MT1 (figura 85a) foi anormalmente posicionado no gabarit, pela folga existente na junta de soldadura das duas peças. O incorreto posicionamento afetou a penetração da soldadura, reduzindo para menos de

metade o valor de penetração considerado normal neste conjunto de ensaios. Desta forma, é possível fazer uma correspondência do provete MT1 da figura 85 com o provete RT1 da figura 76, nas curvas dos ensaios de dobragem dos provetes obtidos por soldadura laser topo a topo. De acordo com esta correspondência, o reduzido valor de força de compressão registado e a falta de penetração na junta de soldadura, terão como principal causa o incorreto posicionamento das peças no gabarit. No entanto, para saber se este defeito foi pontual ou se é permanente, seria necessário efetuar mais ensaios com atenção especial às juntas de soldadura topo a topo. Caso o defeito fosse permanente, poder-se-ia concluir que o gabarit de soldadura está mal construído. A resolução deste problema só seria conseguida com o projeto de meios de aperto mais eficientes, ou com a construção de um novo gabarit.

A penetração do cordão de soldadura foi de 0,6 mm, 1,5 mm e 1,3 mm nos provetes MT1, MT2 e MT3, respetivamente. À exceção do provete MT1, para o qual já se comprovou a existência de uma anomalia de soldadura, a penetração obtida na junta em condições normais para este caso é superior a 50% do respetivo comprimento.

Comparativamente à soldadura manual, é notável a diminuição do desfasamento do cordão de soldadura relativamente à junta, conseguida com a automatização do processo. No provete MT1, o cordão de soldadura encontra-se perfeitamente alinhado com a junta, este alinhamento não foi, no entanto, suficiente para impedir a falta de penetração.

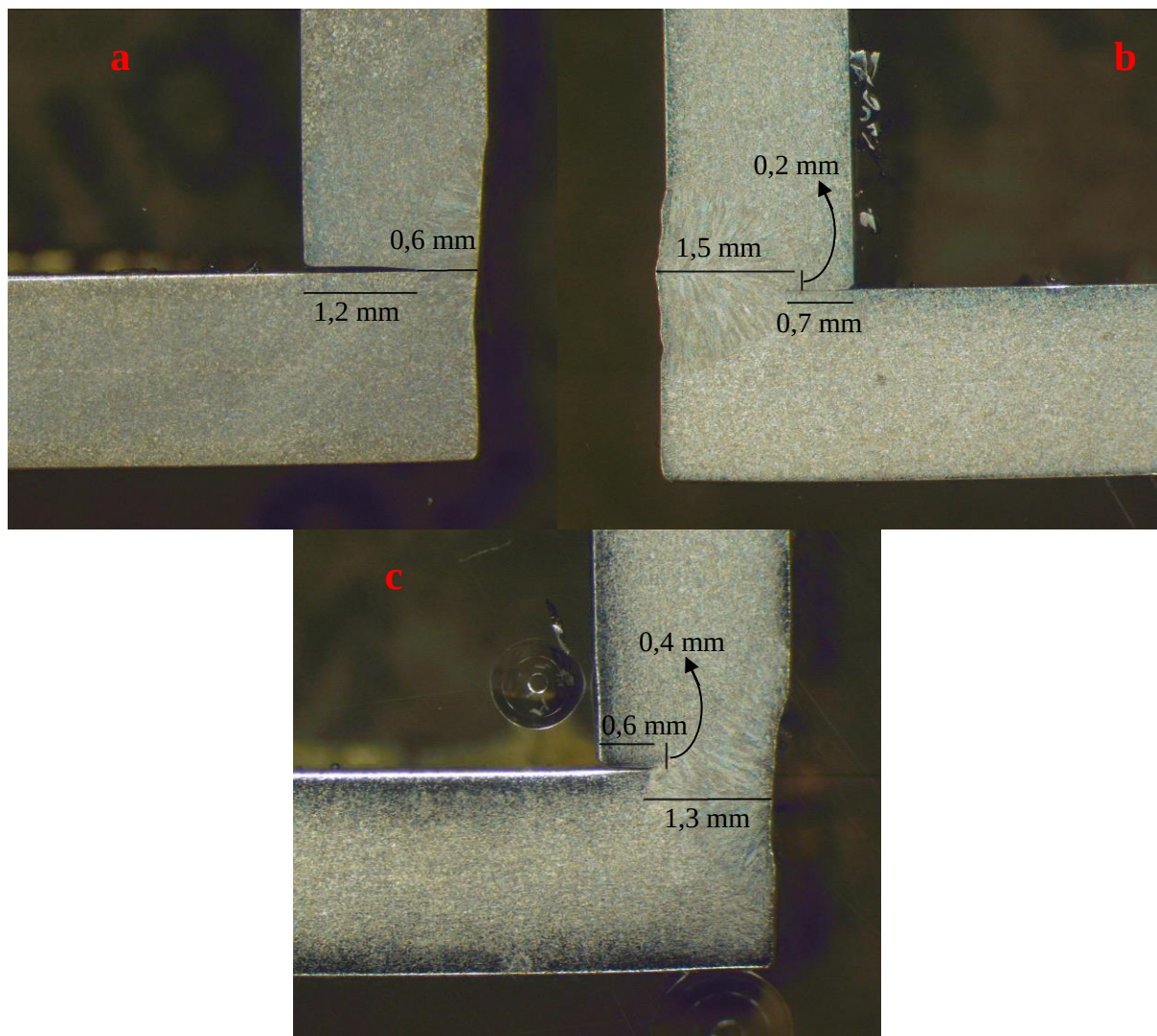


Figura 83 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MT1 (a), MT2 (b) e MT3 (c) do conjunto 0657664 por soldadura laser topo a topo

4.2.3 Análise das amostras 0657669/670 por soldadura TIG

A penetração do cordão de soldadura nos provetes MC2 e MC3 da figura 86 foi de 1,3 mm e 0,8 mm, respetivamente. No provete MC1 não se encontra realizada qualquer medição devido ao facto de se ter obtido penetração total.

Comparando os valores que se observam na figura 86 com os resultados dos gráficos da figura 77, referente aos ensaios de dobragem do conjunto 0657669/670 para soldadura TIG de canto, tem-se como ponto de partida que a adição de material com propriedades mecânicas superiores às do metal base, leva a um aumento significativo na resistência da junta. O material de adição tem um papel evidente no reforço da junta através do seu preenchimento, dado tratar-se de uma junta de soldadura em esquina, onde se aplicou soldadura de canto. Esta constatação deve-se ao elevado valor de carga registado nos ensaios de dobragem, considerando o tipo de material e o processo de fabrico ao qual foi submetido.

A falta de penetração medida foi de 0,5 mm no provete MC2 e 0,6 mm no provete MC3. Não se podem tirar conclusões acerca da percentagem do comprimento da junta que obteve penetração, porque se trata de uma junta em esquina sem comprimento definido. No desenho de conjunto presente no Anexo A, é possível observar que na junta em esquina não há contacto entre as superfícies a unir.

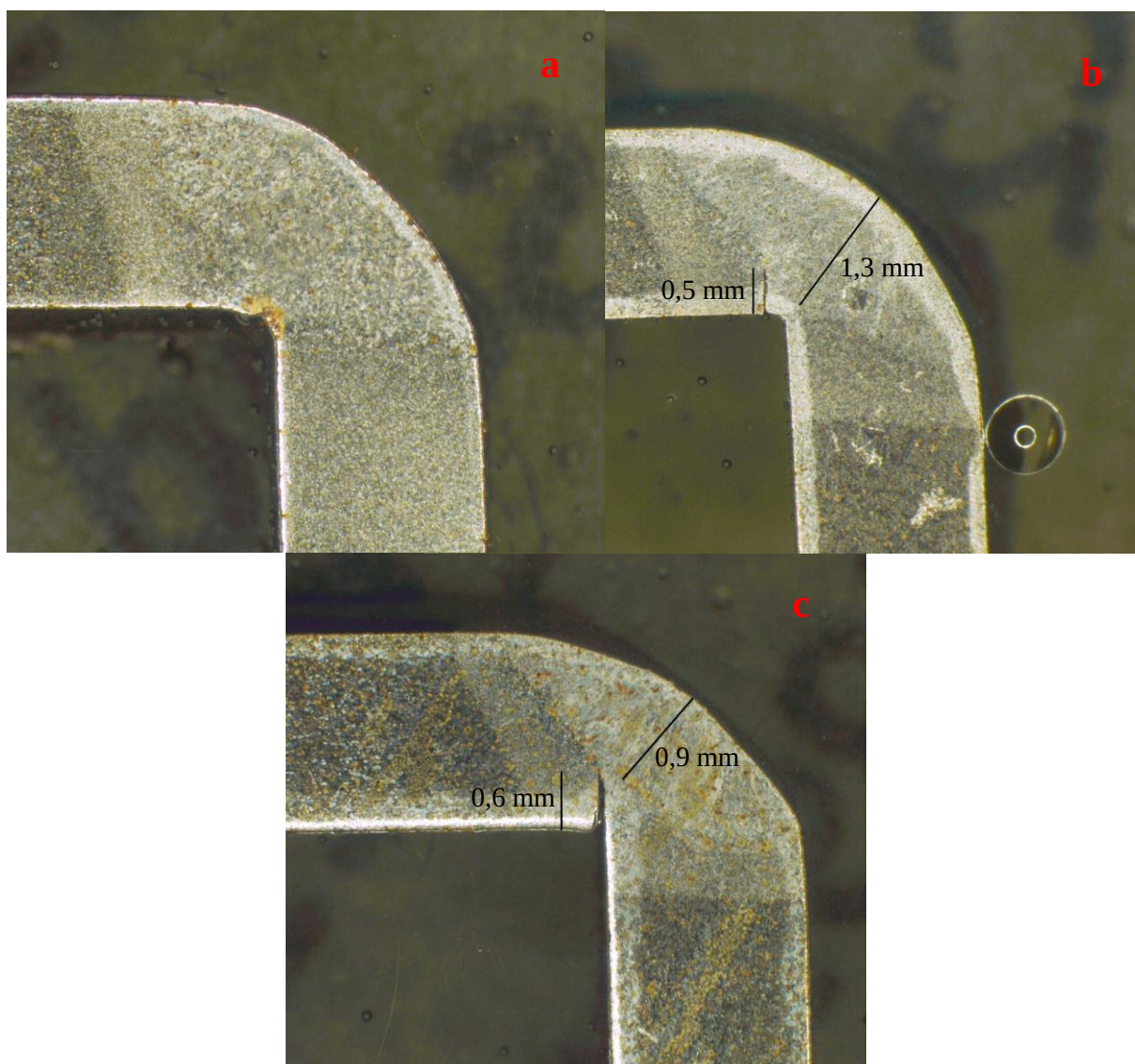


Figura 84 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MC1 (a), MC2 (b) e MC3 (c) do conjunto 0657669/670 por soldadura TIG de canto

Tal como na soldadura TIG do conjunto 0657664, devido ao facto de se tratar de um processo de soldadura manual, a zona de maior concentração de metal que foi sujeito a fusão encontra-se ligeiramente desfasado da junta. A utilização manual de uma tocha de soldadura por um operador evidencia um grau de precisão e repetibilidade inferior à do robot de soldadura laser.

Na soldadura TIG topo a topo, os valores de penetração do cordão de soldadura são de 1,5 mm, 1,1 mm e 0,9 mm para os provetes MT1, MT2 e MT3, respetivamente (figura 87). A falta de penetração da junta foi superior a 50% do respetivo comprimento nos provetes MT2 e MT3. A ausência de material de adição confere uma evidente diminuição à resistência da junta, considerando a gama de valores obtida nos ensaios de dobragem. Ainda relativamente aos ensaios de dobragem, o tipo de junta tem forte influência nos resultados obtidos.

Na análise da metalografia da figura 87, é de difícil perceção a localização da junta de soldadura, o que leva a concluir que a falta de penetração da junta para este caso não terá sido por incorreto posicionamento das peças. Excluindo esta hipótese, a solução mais óbvia para aumentar a penetração do cordão de soldadura, será aumentar a intensidade de corrente na fonte ao executar as presentes soldaduras, para obtenção de maior entrega térmica por parte do arco elétrico da soldadura TIG.

Produtos que se enquadram nesta gama de soldadura são diariamente produzidos na empresa Quantal S.A. e aceites por determinados clientes. Por norma, são clientes cuja exigência não é elevada relativamente à qualidade da soldadura, considerando que as juntas não serão frequentemente sujeitas a esforços demasiado elevados. Deste modo cumprem-se todos os requisitos sem as juntas de soldadura entrarem em rotura numa futura aplicação do conjunto produzido.

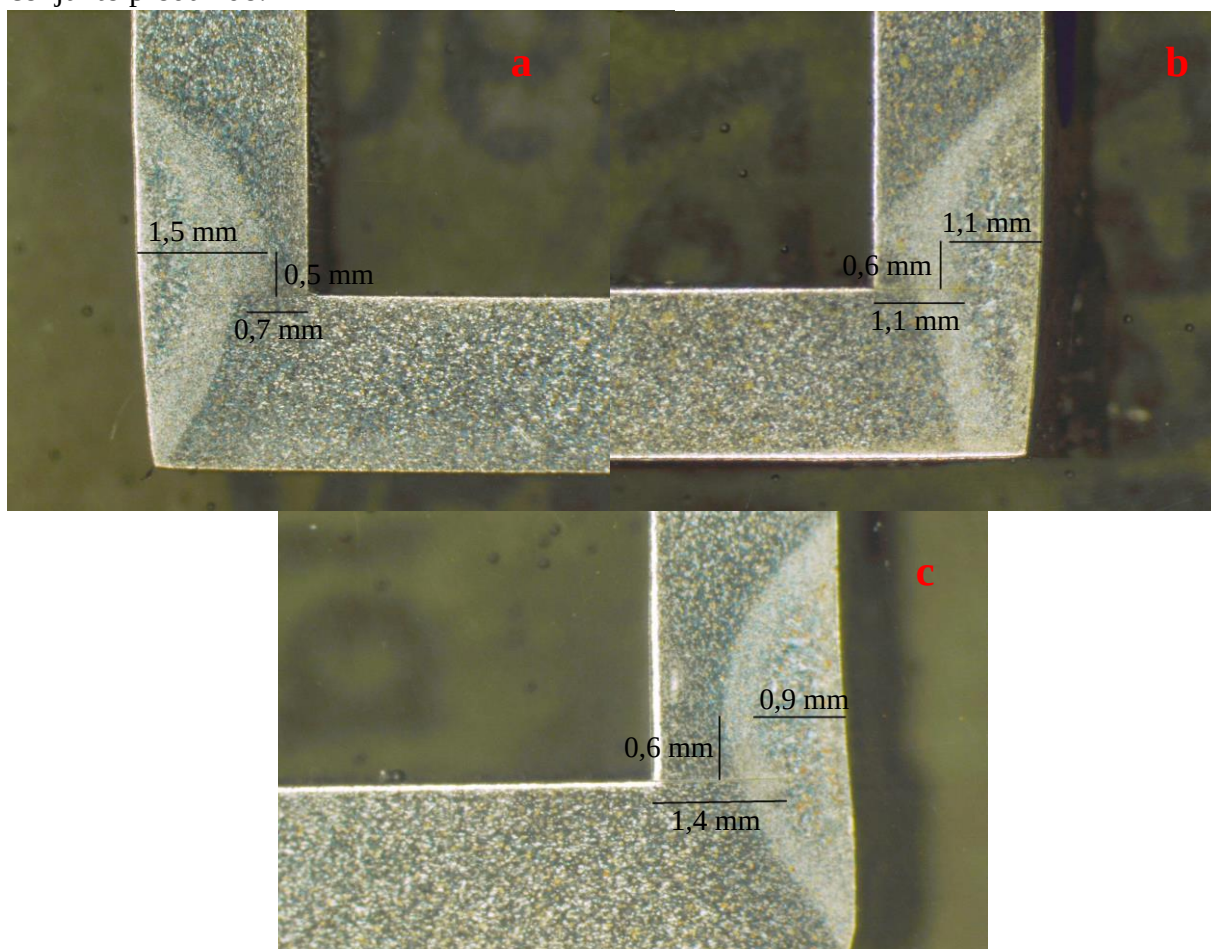


Figura 85 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MT1 (a), MT2 (b) e MT3 (c) do conjunto 0657669/670 por soldadura TIG topo a topo

4.2.4 Análise das amostras 0657669/670 por soldadura laser

Antes de se proceder à análise metalográfica, é pertinente comentar um defeito que surgiu nos cordões de soldadura nas juntas em esquina. Verifica-se uma evidente porosidade no exterior do cordão. Na figura 88 é visível um poro, de consideráveis dimensões, por cada cordão de soldadura de canto neste conjunto. Este fenómeno ocorreu devido ao corte das peças ter sido realizado na máquina de corte laser *Trumpf* 3050 que utiliza oxigénio como gás de assistência ao corte. O corte de aço ao carbono nesta máquina dá origem, devido à presença de oxigénio, a uma ligeira camada de óxido de ferro, vulgarmente designado como ferrugem, nas faces sujeitas ao corte. Tendo em conta que as juntas a soldar são constituídas pelas faces sujeitas ao corte laser, será inevitável que a camada de óxido de ferro formada entre em combustão e volatilize em contacto com o laser, dando origem à porosidade exterior dos cordões de soldadura que se pode observar na figura 88.

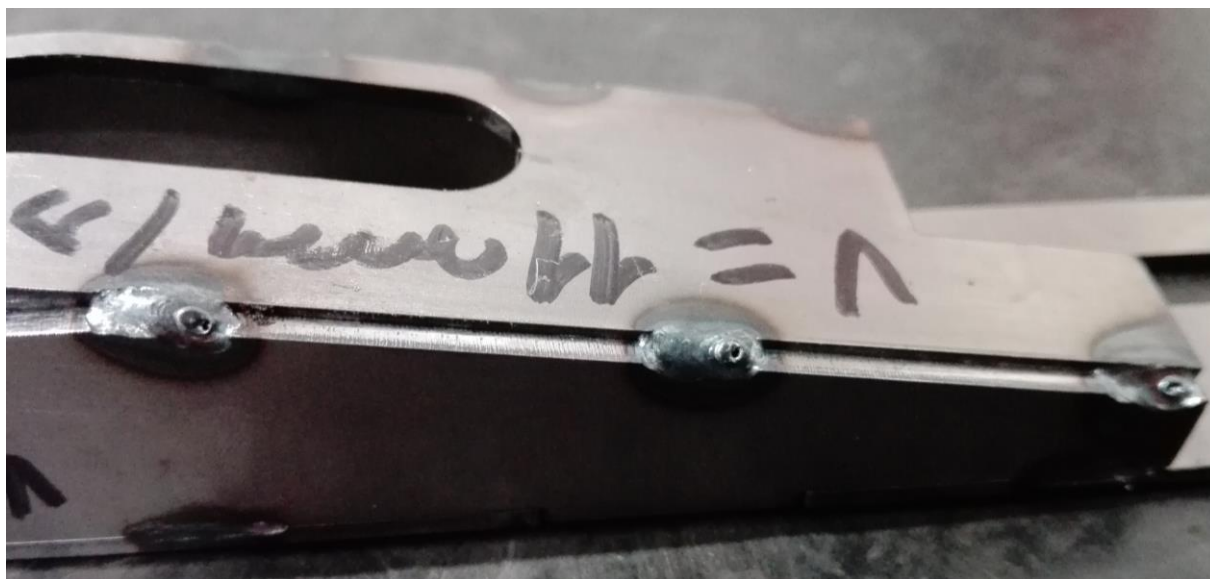


Figura 86 - Porosidade exterior nos cordões de soldadura do conjunto 0657669/670

A próxima análise revela resultados de qualidade bastante superior quando se quantifica a penetração da soldadura, comparativamente aos registados nos ensaios anteriores. Verifica-se a existência de penetração total em todos os cordões de soldadura laser nas peças do conjunto 0657669/670. Como consequência da penetração total obtida, a falta de penetração da junta é inexistente.

O laser operou com a potência máxima disponível pela fonte em todos os casos, mas o aço ao carbono utilizado tem ponto de fusão e condutividade térmica muito semelhante ao aço inoxidável utilizado no conjunto 0657664. A diferença de penetração obtida justifica-se pela refletividade do aço inoxidável ser superior à do aço carbono. A refletividade de um material representa a percentagem de luz incidente não absorvida. Sendo o laser um feixe de luz, materiais com maior refletividade absorvem menos energia proveniente do laser. Deste modo, a penetração para o aço inoxidável será sempre menor que para o aço ao carbono.

Atendendo agora à penetração da soldadura de canto, na figura 89, já foi possível verificar que com o laser se conseguiu penetração total da espessura das chapas a soldar. Registou-se, no entanto, uma diminuição no valor da força máxima que quantifica a resistência da junta nos ensaios de dobragem da soldadura laser comparativamente à soldadura TIG, para soldadura de canto. Proceder à soldadura de uma junta em esquina sem material de adição é uma tarefa de difícil execução. Ao comparar as juntas obtidas por um processo e por outro (figura 86 e figura 89), é notável a diminuição na área da secção resistente das amostras obtidas por soldadura laser. Esta diminuição deu-se sobretudo pela falta do material de adição, que provoca o preenchimento da junta. A força registada nos

ensaios de dobragem foi inferior na soldadura laser, pela dependência direta que tem com a área da secção resistente.

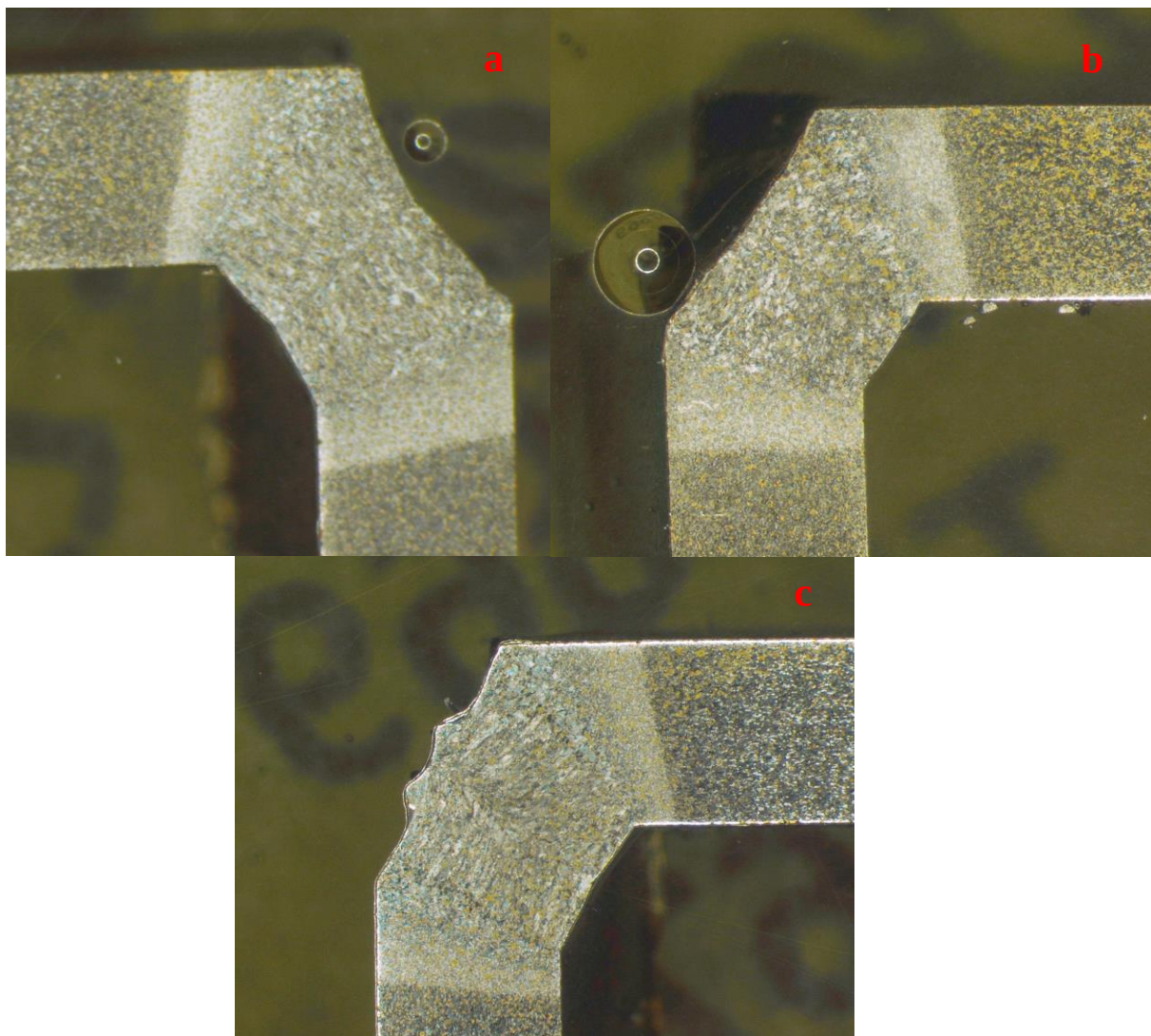


Figura 87 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MC1 (a), MC2 (b) e MC3 (c) do conjunto 0657669/670 por soldadura laser de canto

O ensaio metalográfico dos últimos provetes, na figura 90, demonstra, tal como na figura 89, que se obteve penetração total para soldadura topo a topo. O perfeito alinhamento do cordão de soldadura com a junta evidencia, mais uma vez, a superioridade da precisão e repetibilidade do braço robótico comparativamente a um soldador.

Por ter sido o único grupo de ensaios no qual se obteve penetração total e alinhamento da raiz do cordão de soldadura com a junta, os resultados dos ensaios de dobragem foram mais satisfatórios para soldadura laser topo a topo do que em qualquer outro caso. A superioridade dos ensaios de dobragem encontra-se justificada, tanto a nível de força máxima registada, como de regularidade nos valores obtidos.

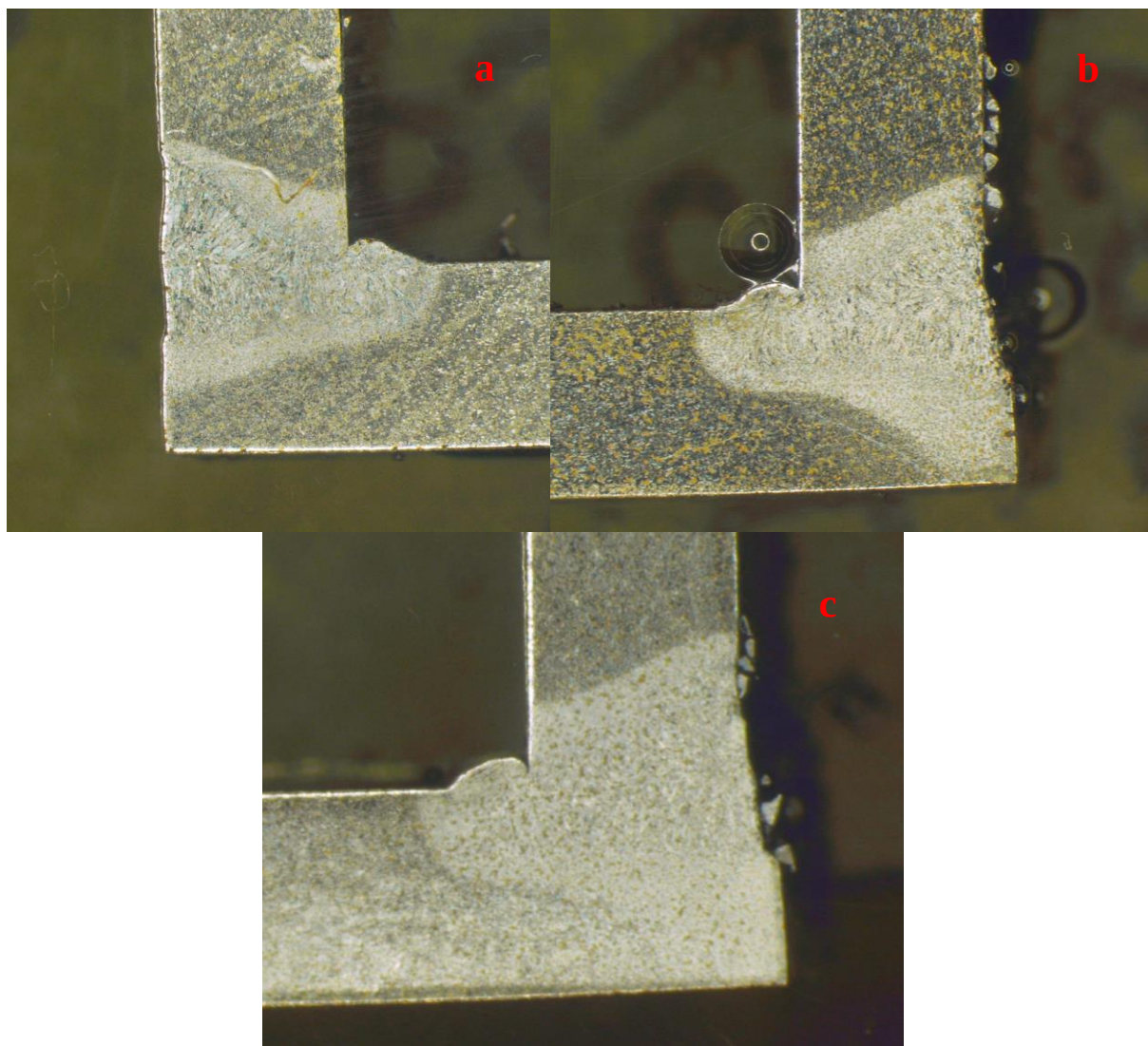


Figura 88 - Imagens obtidas no ensaio metalográfico dos provetes MT1 (a), MT2 (b) e MT3 (c) do conjunto 0657669/670 por soldadura laser topo a topo

Em síntese ao subcapítulo 4.2, é clara a superioridade que a soldadura laser manifesta comparativamente à soldadura TIG, em termos de resistência mecânica, penetração do cordão de soldadura e regularidade na execução dos cordões. Poderia, no entanto, haver uma superioridade ainda mais evidente, caso se optasse por utilizar azoto como gás de assistência ao corte para as peças de aço ao carbono. Com corte laser a azoto, a camada de óxido de ferro não estaria presente nas superfícies sujeitas ao corte. Consequentemente, beneficiaria a soldadura em termos estéticos, eliminando a porosidade exterior do cordão e possivelmente afetaria o resultado dos ensaios de dobragem. Seria necessário que se realizassem novos ensaios de dobragem para averiguar se as forças registadas seriam diferentes. O único inconveniente seria o encarecimento do processo de corte laser, pois o azoto tem um custo mais elevado comparativamente ao oxigénio.

5 Análise Económica

A designação de soldadura TIG e soldadura laser como processo de fabrico para os conjuntos refere-se unicamente ao método de união das peças. Existem outras operações com um custo associado, até chegar à operação final de soldadura, que requerem contabilização para o custo final de produção dos conjuntos. Nos subcapítulos 5.1, 5.2 e 5.3 são apresentadas todas as operações e matéria-prima utilizada com identificação do respetivo preço, até chegar ao que será o custo unitário de uma peça para a empresa Quantal S.A. Os resultados relativos à contabilização do tempo de operação encontram-se apresentados em minutos, de forma a facilitar a perceção da duração de cada operação. Tanto o custo de operação como a duração registada para cada operação, se encontram com arredondamento à décima. Deste modo, a perceção do preço e tempo associado às operações é mais objetiva e o erro associado não é significativo, ainda que seja para produção em série de elevadas quantidades.

5.1 Análise económica para soldadura TIG

Nas tabelas 20 a 24 encontram-se os custos, de operação e matéria-prima, assim como a duração de cada operação para produção dos conjuntos por soldadura TIG. A partir dos valores apresentados, são efetuados os cálculos necessários para obter o custo exato de cada operação e calcular o custo total de produção de uma unidade de cada conjunto por soldadura TIG, com todos os custos associados desde a chegada da matéria-prima à empresa, até à obtenção dos conjuntos para entrega ao cliente.

Tabela 20 - Custo de fabrico e processamento do conjunto 0657664 por soldadura TIG

Operação	Centro de trabalho	Custo por centro de trabalho [€/h]	Tempo de operação [min]	Custo da operação [€]
Desenho de engenharia	<i>Software Solidworks</i>	18	100	30
Programação corte laser	<i>Software TruTops</i>	35	5	2,9
Corte laser	<i>Trumpf Fibra</i>	80	0,6	0,8
Quinagem	<i>Trumpf 5085</i>	27	1,9	0,9
Soldadura TIG	<i>Fronius MagicWave 2200 Job</i>	30	5,2	2,6

Tabela 21 – Custo de fabrico e processamento dos conjuntos 0657669 e 0657670 por soldadura TIG

Operação	Centro de trabalho	Custo por centro de trabalho [€/h]	Tempo de operação [min]	Custo da operação [€]
Desenho de engenharia	<i>Software Solidworks</i>	18	44	13,2
Programação corte laser	<i>Software TruTops</i>	35	5	2,9
Corte laser	<i>Trumpf 3050</i>	71	0,4	0,5
Quinagem	<i>Trumpf 5085</i>	27	1,4	0,6
Soldadura TIG	<i>Fronius Transtig 1700</i>	30	2,6	1,3
Acabamento	Rebarbagem	12	1,5	0,3

Tabela 22 – Custos da matéria-prima necessária à produção de cada conjunto

Conjunto	Matéria-prima	Quantidade [kg]	Preço [€/kg]	Custo [€]
0657664	AISI 304	9,11	2,3	20,95
0657669/0657670	ST 12	0,22	0,67	0,15

Tabela 23 – Custo do material de adição utilizado para soldar cada conjunto por soldadura TIG

Conjunto	Material de adição	Preço [€/kg]	Custo aproximado por conjunto [€]
0657664	M316L (AISI 316)	9,1	0,02
0657669/0657670	ER70S-6 (ST 37)	6,85	0,01

Tabela 24 - Somatório de custos associados à produção unitária de cada conjunto por soldadura TIG

Conjunto	Custos fixos [€]	Custo produção [€]	Custo matéria-prima [€]	Custo de acessórios, ferramentas e consumíveis [€]	Custo total unitário [€]
0657664	32,9	4,3	20,95	0,02	58,32
0657669/0657670	16,1	2,7	0,15	0,01	18,96

5.2 Análise económica para soldadura laser

Quando se utiliza um processo de fabrico para união dos mesmos componentes em detrimento de outro, é necessário ajustar as operações que antecedem a soldadura do conjunto. Desta forma, é possível adaptar as peças e acrescentar acessórios essenciais, como por exemplo os gabarits e máscaras de soldadura laser. Nas tabelas 25 a 34, à semelhança do subcapítulo 5.1, podem ser observados os custos de produção dos conjuntos por soldadura laser, juntamente com os custos de produção de ferramentas, como os gabarits, e outros acessórios, como as máscaras de soldadura laser, para cada conjunto de peças.

Tabela 25 – Custo de fabrico e processamento do conjunto 0657664 por soldadura laser

Operação	Centro de trabalho	Custo por centro de trabalho [€/h]	Tempo de operação [min]	Custo da operação [€]
Desenho de engenharia	<i>Software Solidworks</i>	18	100	30
Programação corte laser	<i>Software TruTops</i>	35	5	2,9
Corte laser	<i>Trumpf Fibra</i>	80	0,6	0,8
Quinagem	<i>Trumpf 5085</i>	27	1,9	0,9
Soldadura Laser	<i>Kuka KR30HA</i>	120	1,3	2,6

Nas tabelas 26, 27 e 28 são apresentados os custos de produção de gabarits e de máscaras de soldadura laser, bem como o custo dos elementos acessórios utilizados para o conjunto 0657664. Os mesmos custos são apresentados nas tabelas 31 e 32 para o conjunto 0657669 e 0657670. Relativamente à matéria-prima utilizada nos gabarits, a tabela 33 quantifica o custo para ambos os conjuntos. Este é um custo adicional para realizar soldadura laser, como se pode constatar pela ausência destes custos no subcapítulo 5.1, e que se espera que seja orçamentalmente benéfico, traduzindo-se numa redução do tempo de produção e custo dos conjuntos.

Tabela 26 – Custo de fabrico do gabarit de soldadura laser para o conjunto 0657664

Operação	Centro de trabalho	Custo por centro de trabalho [€/h]	Tempo de operação [min]	Custo da operação [€]	
Desenho de engenharia	<i>Software Solidworks</i>	18	240	72	
Programação corte laser	<i>Software TruTops</i>	35	5	2,9	
Corte laser	<i>Trumpf 4030 (ST37)</i>	53	4,1	3,6	10,6
	<i>Trumpf 5030 (AISI 304)</i>	80	5,2	6,9	
Roscagem	<i>Gamor</i>	15	21	5,3	
Soldadura TIG	<i>Fronius MagicWave 3000 Job</i>	30	40	20	
Acabamento	Rebarbagem	12	15	3	

Tabela 27 - Custo dos elementos acessórios utilizados no gabarit de soldadura laser 0657664

Acessório	Quantidade	Preço unitário [€]	Custo total [€]
Parafuso DIN 912 (M16x25)	4	0,05 (zincado)	0,20
Parafuso DIN 912 (M4x8)	36	0,05 (inox)	1,80
Cavilha DIN 6325 (D8x16)	4	0,28	1,12
Cavilha DIN 6325 (D3x8)	1	0,14	0,14
Grampo Destaco 323-M-25	6	14,7	88,2

Tabela 28 - Custo de fabrico e processamento das máscaras de soldadura laser para o conjunto 0657664

Operação	Centro de trabalho	Custo por centro de trabalho [€/h]	Tempo de operação [min]	Custo da operação [€]
Desenho de engenharia	<i>Software Soldiworks</i>	18	20	6
Programação corte laser	<i>Software TruTops</i>	35	5	2,9
Corte laser	<i>Trumpf 3050</i>	71	1,4	1,7
Quinagem	<i>Trumpf 5085</i>	27	1,9	0,9

Tabela 29 – Custo da matéria-prima para produção das máscaras de soldadura laser para o conjunto 0657664

Matéria-prima	Quantidade [kg]	Preço [€/kg]	Custo [€]
ST 12	5,2	0,67	3,48

Tabela 30 – Custo de fabrico e processamento dos conjuntos 0657669 e 0657670 em soldadura laser

Operação	Centro de trabalho	Custo por centro de trabalho [€/h]	Tempo de operação [min]	Custo da operação [€]
Desenho de engenharia	<i>Software Soldiworks</i>	18	59	17,7
Programação corte laser	<i>Software TruTops</i>	35	5	2,9
Corte laser	<i>Trumpf 3050</i>	71	0,4	0,5
Quinagem	<i>Trumpf 5085</i>	27	1,4	0,6
Soldadura laser	<i>Kuka KR30HA</i>	120	0,4	0,8

Tabela 31 – Custo de fabrico do gabarit de soldadura laser para os conjuntos 0657669 e 0657670

Operação	Centro de trabalho	Custo por centro de trabalho [€/h]	Tempo de operação [min]	Custo da operação [€]
Desenho de engenharia	<i>Software Soldiworks</i>	18	240	72
Programação corte laser	<i>Software TruTops</i>	35	5	2,9
Corte laser	<i>Trumpf 4030</i>	53	3,6	3,2
Furação	<i>Ibarmia</i>	30	7	3,5
Roscagem	<i>Gamor</i>	15	9	2,3
Soldadura TIG	<i>Fronius MagicWave 2200 Job</i>	30	25	12,5
Acabamento	Rebarbagem	12	10	2

Tabela 32 - Custo dos elementos acessórios utilizados no gabarit de soldadura laser 0657669/0657670

Acessório	Quantidade	Preço unitário [€]	Custo total [€]
Parafuso DIN 912 (M5x8)	8	0,11	0,88
Cavilha DIN 6325 (D5x12)	1	0,22	0,22
Cavilha DIN 6325 (D7x16)	4	0,28	1,12
Grampo AMF 6800-1	2	20,18	40,36

Tabela 33 – Custo da matéria-prima associada à produção de gabarits

Conjunto	Matéria-prima	Quantidade [kg]	Preço [€/kg]	Material de adição	Custo ^[1] [€]
0657664	ST 37	16,1	0,62	ER70S-6 (ST 37)	47,96
	AISI 304	16,5	2,30	M316L (AISI 316)	
0657669/0657670	ST 37	3,9	0,62	ER70S-6 (ST 37)	2,43

[1] Custo inclui valor do material de adição da tabela 23

Tabela 34 – Somatório de custos associados à produção unitária de cada conjunto por soldadura laser

Conjunto	Custos fixos [€]	Custo produção [€]	Custo matéria-prima [€]	Custo de acessórios, ferramentas e consumíveis [€]	Custo total [€]
0657664	32,9	4,3	20,95	268,20	326,38
0657669/0657670	20,6	1,9	0,16	143,40	166,06

5.3 Análise económica comparativa entre soldadura TIG e soldadura laser

Quando se trata de comparar processos de fabrico é necessário analisar as vantagens e desvantagens que cada um deles tem para elevadas cadências de produção. A soldadura laser evidencia um tempo de produção substancialmente mais reduzido para os mesmos conjuntos. Apresenta, no entanto, mais etapas e custos de preparação, devido à produção de acessórios e programação do robot. É essencial fazer uma análise, de forma a entender qual dos dois métodos é mais rentável.

O método de calcular o ponto a partir do qual a automatização do processo se torna rentável, conseguindo que o preço unitário de cada peça seja inferior na produção por soldadura laser, será realizar uma análise para encontrar o ponto de equilíbrio (*break-even analysis*). Para esta análise, será deduzida a expressão geral que determina o custo unitário de cada peça em função do número de unidades a ser produzidas, para qualquer um dos processos de fabrico.

Com custos fixos e custos variáveis a ter em conta, o custo de produção unitário será dado pela soma do somatório dos custos fixos com o somatório dos custos variáveis, dividido pelo número de peças. É de realçar que os custos fixos só são contabilizados uma única vez e os custos variáveis são contabilizados o mesmo número de vezes que o número de peças a produzir. A equação que define o custo unitário de cada peça em função do lote a fabricar, é dada pela expressão:

$$c_p = \frac{\sum_{i=1}^n (c_{fi}) + \left[\sum_{i=1}^n (c_{vi}) \right] \cdot q}{q} \quad (5.1)$$

Onde:

c_p , é o custo de produção unitário, em euros [€]
 c_{fi} , é o custo fixo de índice i , em euros [€]
 c_{vi} , é o custo variável de índice i , em euros [€], e
 q , é a quantidade de peças a produzir, adimensional

Na tabela 35 foram compilados todos os custos fixos e variáveis, com o respetivo valor, inerentes a cada um dos processos de fabrico. É especificado também a qual dos processos de fabrico pertence cada custo e a descrição do mesmo. Esta especificação torna-se necessária pelo facto de os acessórios serem custo variável para soldadura TIG e custo fixo para soldadura laser.

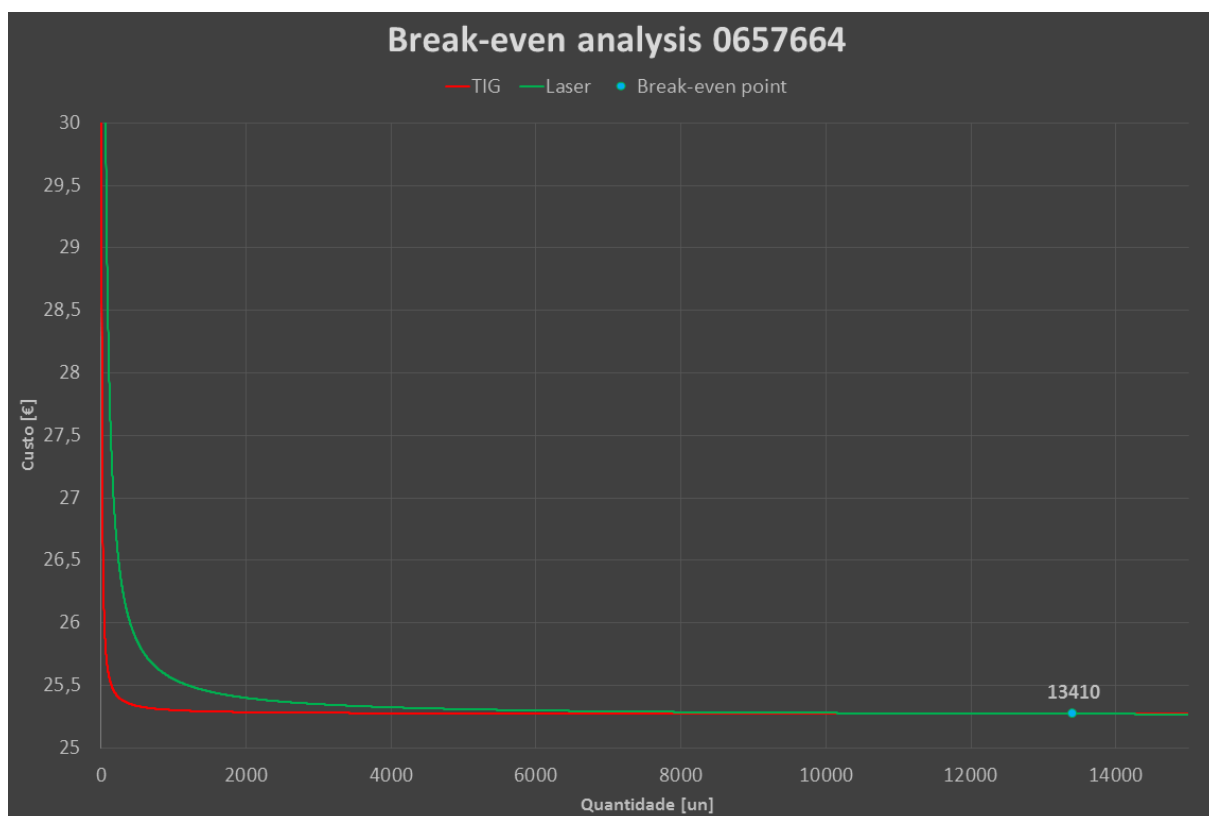
A ideia base que assenta neste tipo de análise, a nível empresarial, é a de fazer com que o aumento dos custos fixos seja compensado pela redução dos custos variáveis, e o investimento que foi feito no processo se torne mais lucrativo. Neste caso, na empresa Quantal S.A., o investimento nos gabarits e acessórios de soldadura foi realizado com o objetivo de reduzir o tempo de produção e custo de fabrico de cada peça, conduzindo a que as receitas referentes a estas encomendas sejam superiores.

Tabela 35 – Custos fixos e variáveis a considerar para realizar *break-even analysis* dos conjuntos de peças

Custo de índice i	Descrição	Processo de fabrico	Custo 0657664 [€]	Custo 0657669/670 [€]
Custo fixo 1	Custo de arranque da produção	TIG/Laser	32,9/32,9	16,1/20,6
Custo fixo 2	Custo de acessórios	Laser	-/268,2	-/143,41
Custo variável 1	Custo de produção unitário	TIG/Laser	4,3/4,3	2,7/1,9
Custo variável 2	Custo da matéria-prima	TIG/Laser	20,95/20,95	0,15/0,16
Custo variável 3	Custo de acessórios	TIG	0,02/-	0,01/-

Substituindo os valores da tabela 35 na equação 5.1, obtém-se a expressão que determina o custo unitário de cada conjunto, em função do lote a produzir. As expressões resultantes encontram-se representadas graficamente nas figuras 91 e 92, onde se pode visualizar também o *break-even point*.

O *break-even point* indica o ponto de interseção dos gráficos e, sobre esse ponto, está indicado o número de peças que deve ter o lote para que o custo unitário de cada conjunto se torne inferior para soldadura automática.

Figura 89 – *Break-even analysis* e representação do *break-even point* para o conjunto 0657664

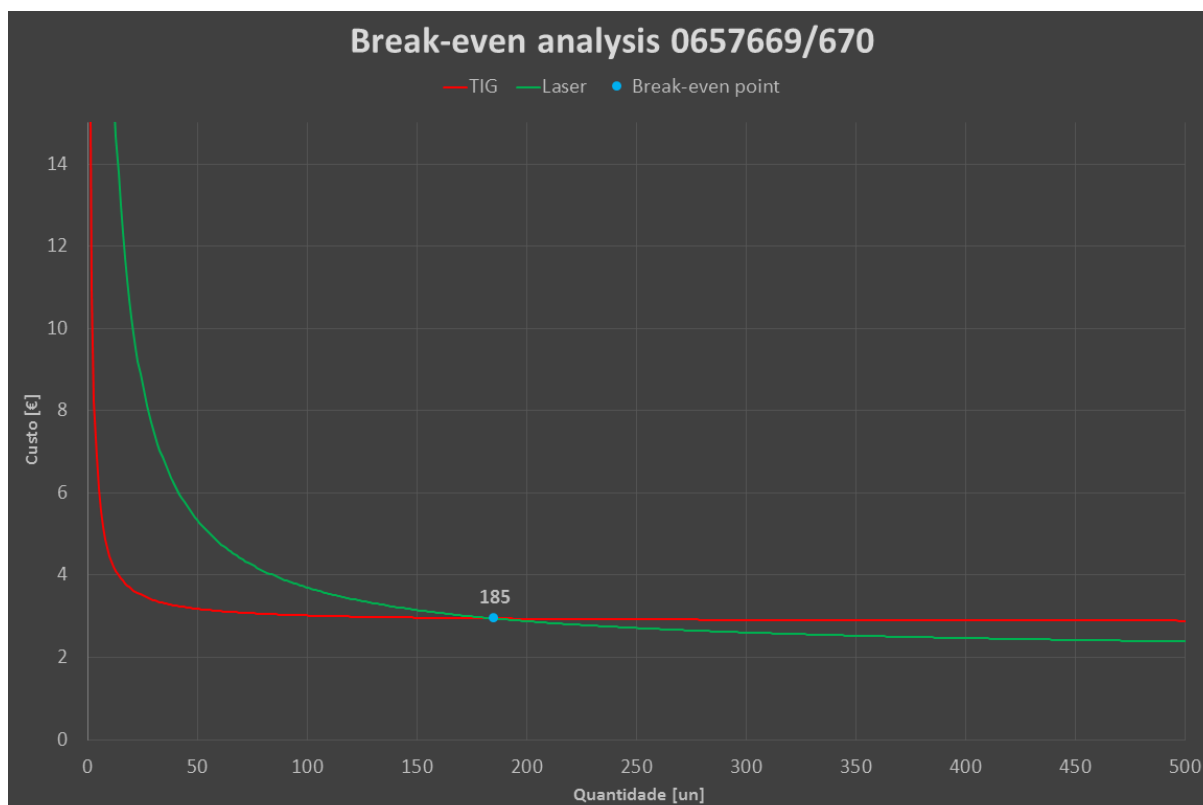


Figura 90 - Break-even analysis e representação do break-even point para o conjunto 0657669/670

O *break-even point* do conjunto 0657664 é representado pela quantidade de 13410 e do conjunto 0657669/670 é de 185 conjuntos. Estas quantidades representam uma gama de valores bastante aceitável para o conjunto 0657669/670. Tendo em conta que na empresa Quantal S.A. se recebem frequentemente encomendas cuja quantidade a produzir é superior a este valor, neste caso justificar-se-ia a automatização do processo com os parâmetros de trabalho mencionados até esta etapa.

O mesmo já não se verifica para o conjunto 0657664. Encomendas de quantidade superior a 10000 unidades não são frequentes. Como tal, torna-se necessário alterar os parâmetros de funcionamento do robot, para otimização máxima do processo. Para uma análise económica deste tipo, o parâmetro mais importante é a velocidade de operação do robot de soldadura laser.

Sabe-se que na empresa Quantal S.A., o robot de soldadura laser se encontra a operar segundo um pré-programa de segurança que reduz a velocidade dos movimentos não definidos nas linhas de código do programa de soldadura para 50% do respetivo valor. Alterando o valor da velocidade do pré-programa de segurança para 100%, ou não executando o mesmo para determinada operação de soldadura, levará a cabo que o robot se movimente com o dobro da velocidade nos instantes em que o laser não estiver em funcionamento.

Na soldadura do conjunto 0657664, o laser está fora de funcionamento a maior parte do tempo de operação, aproximadamente 90%. Deste modo, é possível fazer uma aproximação para recalcular o tempo de soldadura laser e respetivo custo associado. Caso o robot opere ao dobro da velocidade, é possível fazer uma estimativa de que a duração do tempo de soldadura passará a metade do que se encontra apresentado na última linha da tabela 25. Sendo o tempo apresentado de 1,3 minutos, a nova estimativa da duração do tempo de trabalho é de 0,65 minutos. Mediante este novo valor de duração, o custo da operação será metade do que está apresentado na tabela 25, 1,3 €, portanto. Substituindo o novo valor no somatório de custos que dá origem ao “custo variável 1”, obtém-se para soldadura laser do conjunto 0657664 que esta variável tomará o valor de 3 €, por conjunto.

Substituindo mais uma vez na expressão 5.1, obtém-se uma nova equação que define o custo e valor unitário de cada conjunto em função da quantidade a produzir. Esta equação encontra-se representada graficamente na figura 93, onde se realizou a *break-even analysis* para o conjunto 0657664 com produção otimizada.

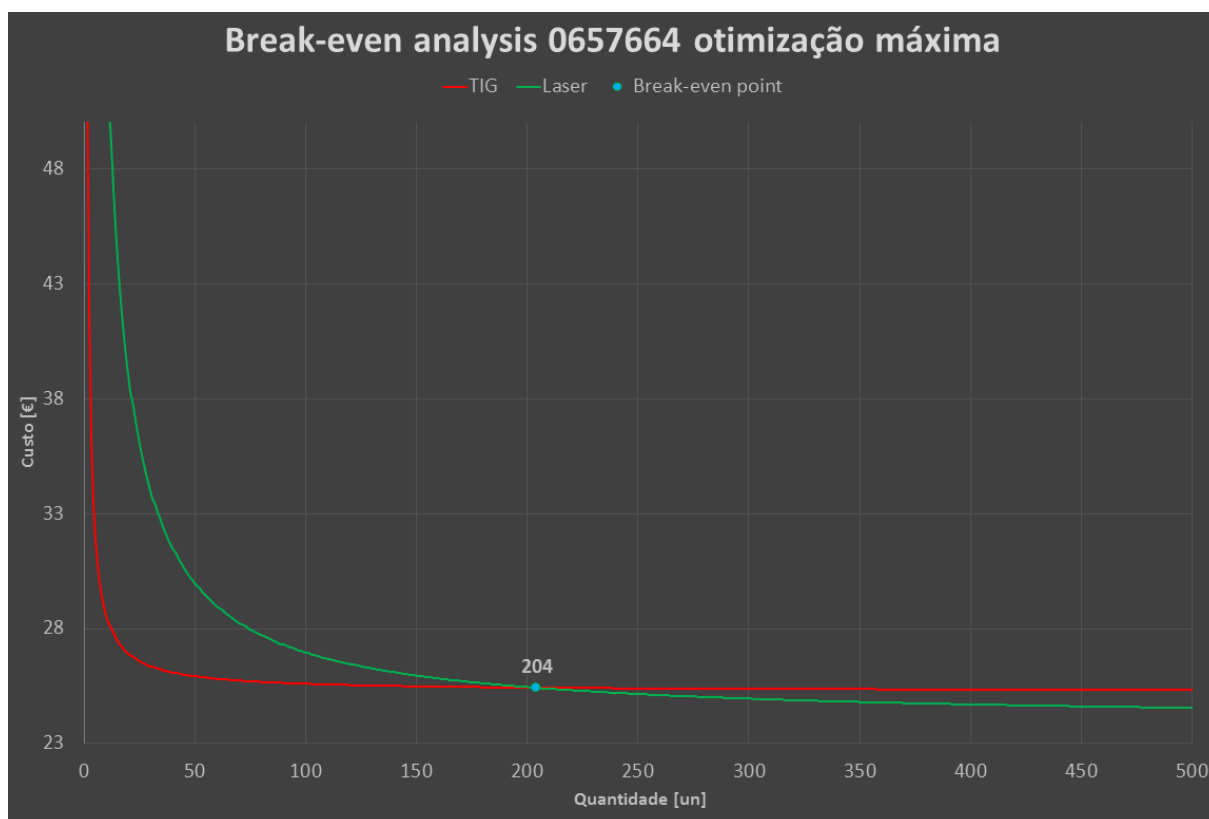


Figura 91 - *Break-even analysis* e representação do *break-even point* para o conjunto 0657664, otimizado

Observa-se, portanto, que a automatização do processo se torna rentável a partir de 204 unidades, pela representação do novo *break-even point*. Este valor é, sem dúvida, melhor comparativamente ao apresentado na figura 91. Para 204 unidades, já se justifica a automatização do processo. Ainda que possa não ser encomendada esta quantidade, muitas vezes os clientes solicitam encomendas do mesmo conjunto num futuro próximo e torna-se possível o reaproveitamento do gabarit, rentabilizando assim o processo na segunda encomenda.

Como forma de finalizar a análise económica, foi realizado o cálculo do custo e tempo de produção dos conjuntos estudados para a produção de um lote de 1000 unidades. Este valor foi selecionado tendo em conta a durabilidade aproximada do gabarit de soldadura laser, partindo do princípio que lotes desta dimensão, aproximadamente, poderão levar à necessidade de reparação ou até mesmo substituição do gabarit. Este valor não é de todo linear, considerando que o desgaste do gabarit está relacionado com a resistência do mesmo, o método de construção, matéria-prima utilizada e duração das operações de soldadura a ser executadas pelo robot. Os valores calculados encontram-se na tabela 36.

Tabela 36 – Análise comparativa de custo e tempo de produção por soldadura TIG e soldadura laser para lote de 1000 unidades

Conjunto	0657664	0657664	0657669/0657670	0657669/0657670
Processo de soldadura	TIG	Laser	TIG	Laser
Custo fixo [€]	32,9	32,9	16,1	20,6
Tempo de produção unitário [min]	7,7	3,15	5,9	2,2
Custo produção unitário [€]	4,3	3,0	2,7	1,9
Custo produção 1000 conjuntos [€]	4300	3000	2700	1900
Custo de acessórios, ferramentas e consumíveis [€]	20,0	268,20	10,0	143,41
Custo matéria-prima 1000 conjuntos [€]	20950	20950	150	160
Custo total 1000 conjuntos [€]	25302,9	24251,1	2876,1	2224,01
Tempo produção 1000 conjuntos [h]	128,3	52,5	98,3	36,7
Cadência de produção [unidades/h]	7,79	19,05	10,17	27,25
Custo produção em série [€/unidade]	25,30	24,25	2,87	2,22
Benefício automatização do processo [€]	1051,8		652,9	

De acordo com os valores calculados conclui-se que se economizam 1051,8 € para o conjunto 0657664, sendo o tempo de trabalho reduzido em 75,8 horas. No conjunto 0657669/670 a diferença apresentada não apresenta valores tão elevados pelo facto de se tratar de um conjunto de menores dimensões e de custo bastante inferior. Ainda assim, economizam-se 652,9 € para um lote de 1000 peças e reduz-se o tempo de operação em 61,6 horas.

6 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

6.1 Conclusões

Este trabalho consistiu na automatização de um processo de soldadura manual. Automatizar um processo de fabrico somente é justificado mediante um dos seguintes casos:

- Se o produto obtido de forma automática for de qualidade superior
- Se a automatização do processo de fabrico reduzir o custo de produção unitário
- Se a duração da operação for otimizada através da agilização do processo e/ou levar à eliminação de etapas realizadas manualmente
- Caso não seja possível, ou não se justifique, a produção de determinado produto de forma manual

Na tabela 37 apresenta-se, na globalidade desta dissertação, um resumo dos resultados obtidos. Com base na tabela 37 e na lista de tópicos do parágrafo anterior, serão verificadas quais destas condições se cumprem para justificar ou não a conversão de soldadura TIG em soldadura laser para os conjuntos de peças estudados nesta dissertação.

Tabela 37 – Processo de soldadura mais favorável em cada grupo de resultados obtidos na dissertação

Conjunto	0657664	0657669/0657670
Ensaio de dobragem em soldadura de canto	Laser	TIG
Ensaio de dobragem em soldadura topo a topo	Laser	Laser
Ensaio metalográfico em soldadura de canto	Laser	Laser
Ensaio metalográfico em soldadura topo a topo	Laser	Laser
Custo unitário para elevadas cadências de produção	Laser	Laser
Duração da operação de fabrico	Laser	Laser

Com esta dissertação é possível realizar um total de 12 comparações entre os dois processos de fabrico. Mediante o trabalho realizado experimentalmente e a análise económica, a soldadura laser revelou-se superior em 11 de 12 comparações realizadas. A automatização do processo cumpre 3 dos 4 requisitos mencionados na lista de tópicos apresentados no início deste capítulo, sendo que o quarto requisito não se aplica ao caso em estudo.

Foi possível verificar que a resistência dos cordões de soldadura é superior em 75% dos ensaios realizados. Esta percentagem poderá ser elevada a valores próximos de 100% com uma melhoria da construção dos gabarits de soldadura laser. Esta melhoria permitirá melhor posicionamento das peças através do aumento da força de fixação, levando a que os resultados dos ensaios de dobragem sejam substancialmente superiores. Outra vantagem do aumento da força de fixação será a redução do empeno das peças do conjunto 0657664, que já se verificou de forma ligeira, mas ainda poderá ser melhorada substancialmente.

A penetração do cordão de soldadura registada nos ensaios metalográficos, assim como a influência para a diminuição na falta de penetração da junta foi superior em 100% no processo de soldadura laser. Este fenómeno deve-se, em primeiro lugar, à potência disponibilizada pelo feixe laser e a forma como a cabeçote consegue concentrar a energia através da lente. De forma menos relevante, mas também com algum peso na contribuição para a superioridade da penetração em soldadura laser, o gabarit garante uma fixação mais apropriada da posição das peças, diminuindo a distância entre as juntas a soldar.

A partir da *break-even analysis* foi possível verificar que o conjunto 0657664 e o conjunto 0657669/670 diminuem o custo de produção unitário a partir da produção de 204 e 185 unidades, respetivamente, de forma automática. Assim economizam-se com a soldadura laser 1,30 € por cada conjunto 0657664 e 0,65 € por cada conjunto 0657669/670.

Para além de ser economicamente viável em termos de custos, a automatização do processo reduz o tempo de produção unitário para aproximadamente metade no conjunto 0657664 e um terço no conjunto 0657669/670.

Com a quase totalidade dos resultados obtidos nesta dissertação a favorecer a soldadura laser, encontra-se absolutamente justificada a automatização do processo de soldadura para estes dois conjuntos, na empresa Quantal S.A.

6.2 Trabalhos futuros

Conseguida uma melhoria significativa na globalidade do processo, deixam-se neste subcapítulo sugestões de trabalhos que permitam melhorar o produto e otimizar a produção a níveis que não foram abordados nesta dissertação.

Numa vertente mais teórica, realizar uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente para a resistência da junta de soldadura, mas determinada de forma analítica e por simulação numérica pelo método dos elementos finitos recorrendo a um *software* apropriado para o efeito (*Simulia Abaqus*, por exemplo).

Proceder a alteração sucessiva dos parâmetros de soldadura laser, nomeadamente potência do feixe laser, velocidade de avanço do cabeçote do robot e posição do ponto focal de forma a verificar a influência destes valores nos resultados experimentais.

Realizar uma análise experimental exclusivamente dedicada à posição do ponto focal, de forma a entender qual o papel deste parâmetro em soldadura laser. O objetivo seria a compreensão e influência da direção da entrega térmica para soldadura por condução, penetração ou *keyhole*. Em diferentes materiais, permitiria analisar qual a posição mais correta em função da refletividade, para melhorar a qualidade de soldadura obtida.

Solicitar nova operação de soldadura para as peças do conjunto 0657669/670, provenientes de corte laser que recorra a azoto como gás de assistência ao corte. Com este método de corte verificar, através de ensaios experimentais, se a não formação da camada de óxido de ferro durante o corte afeta a porosidade da soldadura e em que medidas este fenómeno ocorre.

Sujeitar outros conjuntos de peças da empresa Quantal S.A. a esta automatização de processo de fabrico, realizando apenas uma análise económica prévia semelhante à apresentada nesta dissertação. Partindo do princípio que as condições de soldadura serão semelhantes apenas terá interesse verificar a viabilidade económica da automatização, obtendo assim a redução de custo e tempo de operação em causa.

Submeter os conjuntos soldados pelos dois processos a ensaios destrutivos, através de colisões, de forma a entender como a soldadura executada no conjunto se comporta na globalidade.

Realizar novos programas a executar no robot de forma a tentar tornar o processo de soldadura automática mais célere e ter atenção especial à ordem de execução de cada cordão de soldadura, pois este último é fundamental para eliminar o empeno em peças de grandes dimensões.

Implementar um aparelho de adição de material no robot de soldadura laser com o objetivo de que a soldadura automática com adição de material na Quantal S.A. seja uma nova possibilidade. Esta última sugestão permitirá à empresa aumentar a gama de produtos a produzir, tornando-a mais competitiva no mercado.

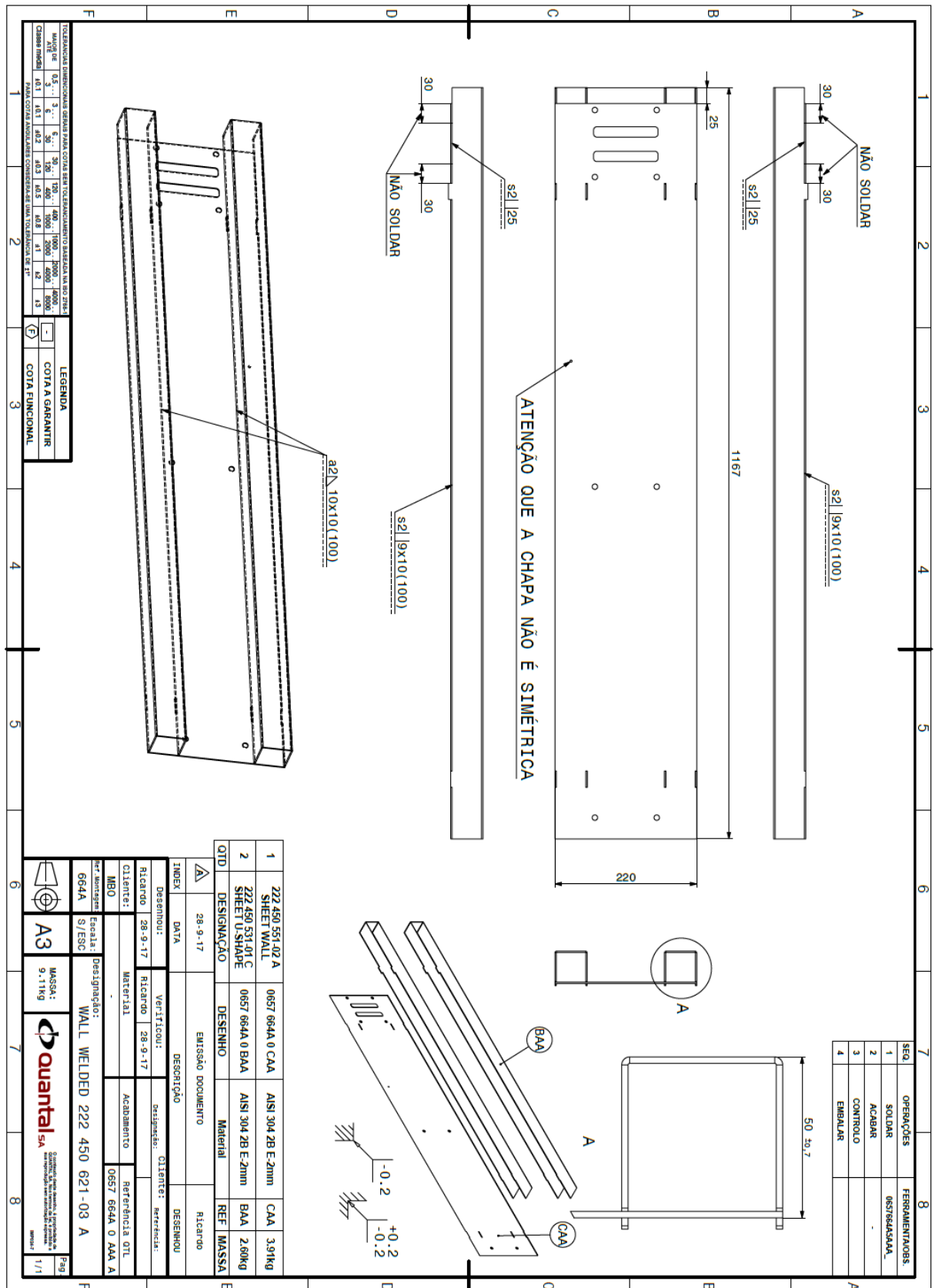
Referências

- [1] “Página Web Quantal.” [Online]. Available: <https://www.quantal.pt/historia/>. [Accessed: 05-Nov-2017].
- [2] M. Alves, “Apontamentos de Soldadura - Processos de Fabrico II,” *Feup*. 2007.
- [3] F. J. G. Silva, *Tecnologia da Soldadura - Uma Abordagem Técnico-Didática*, Publindúst. Porto, 2014.
- [4] A. A. Fernandes, *Processos de Fabrico II - Bloco Processos de Ligação de Metais*. 2007.
- [5] “Welding Technology: A Valuable Technology for Industry,” 2015. [Online]. Available: <https://siddhivinayaklaserfabrication.wordpress.com/2015/04/08/welding-technology-a-valuable-technology-for-industry/>. [Accessed: 15-Jan-2018].
- [6] B. Masters, “A History Human Color Vision from Newton to Maxwell,” no. January, pp. 43–47, 2011.
- [7] A. E. Siegman, “ICO Newsletter,” *The history of how the laser came to be*, 2009. [Online]. Available: <http://e-ico.org/node/38>. [Accessed: 18-Oct-2017].
- [8] A. Washington, “Press Reader,” *Theodore Maiman; Built the 1st Working U.S. Laser*, 2007. [Online]. Available: <http://www.pressreader.com/usa/the-washington-post/20070510/282046207664263>. [Accessed: 18-Oct-2017].
- [9] J. Pozo, “Landscape Shifting for Laser Materials Processing,” 2016. [Online]. Available: <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=60946>. [Accessed: 19-Oct-2017].
- [10] G. Overton, A. Noguee, D. Belforte, and C. Holton, “Laser Focus World,” *Annual Laser Market Review & Forecast: Where have all the lasers gone?* [Online]. Available: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-53/issue-01/features/annual-laser-market-review-forecast-where-have-all-the-lasers-gone.html>. [Accessed: 05-Dec-2017].
- [11] D. Boisselier, O. Frénaux, J.-P. Gauffillet, J. Hamy, and D. Marchand, *Thermal Welding Processes - Laser Welding*. E.G.R., 1998.
- [12] S. N. Bose, “Planck ’s Law and Light Quantum Hypothesis .,” *Zeitschrift für Phys.*, vol. 26, no. Received, pp. 1–4, 1924.
- [13] A. V. Borovsky, A. L. Galkin, O. B. Shiryaev, and T. Auguste, *Laser Physics at Relativistic Intensities*, 1st ed., vol. 34. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [14] Advanced Manufacturing Laboratory, “Laser Machining Processes.” [Online]. Available: <http://www.aml.engineering.columbia.edu/ntm/ch2index.html>. [Accessed: 04-Oct-2017].

- [15] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.aml.engineering.columbia.edu/ntm/level2/ch02/html/l2c02s01.html>.
- [16] Feup, “Física dos lasers,” *Physical Review Letters*. pp. 1–11, 2008.
- [17] J. C. Ion, *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [18] W. Steen and J. Mazumder, *Laser Material Processing*, 2nd ed. London: Springer-Verlag London, 1998.
- [19] G. Buchfink, *The Laser as a Tool*, 1st ed. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2007.
- [20] J. M. A. Tinoco, “Desenvolvimento de um sistema de troca automática do nozzle de corte para máquinas de corte por laser,” Feup, 2011.
- [21] J. P. M. J. Vilas, “Otimização de Parâmetros em Soldadura Laser Quantal SA,” Feup, 2013.
- [22] H. Bitzel, *The Fascinating World of Sheet Metal*. Trumpf GmbH, 1996.
- [23] R. C. Crafer and P. J. Oakley, *Laser processing in manufacturing*, 1st ed. London: Chapman & Hall, 1993.
- [24] J. C. I. Z. Sun, “Laser welding of dissimilar metal combinations,” *J. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 17, pp. 4205–4214, 1995.
- [25] “Fluid Motor Union,” 2017. [Online]. Available: <http://www.fluidmotorunion.com/merges-and-exits/>. [Accessed: 18-Jan-2018].
- [26] “Equestion Answers,” *Laser*, 2014. [Online]. Available: <http://www.equestionanswers.com/notes/laser.php>. [Accessed: 24-Oct-2017].
- [27] “Mini Physics,” *The Electromagnetic Spectrum*, 2010. [Online]. Available: https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html. [Accessed: 23-Oct-2017].
- [28] “Photon Science,” *Free-Electron Lasers and Conventional Lasers*. [Online]. Available: http://photon-science.desy.de/facilities/flash/the_free_electron_laser/how_it_works/lasers/index_eng.html. [Accessed: 25-Oct-2017].
- [29] R. Arieli, “KSU Physics Education Group,” *The “Laser Adventure.”* [Online]. Available: <https://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-4/F4s3t1p2.htm>. [Accessed: 26-Oct-2017].
- [30] A. Gasser, “Fraunhofer,” *VarioClad - Laser Metal Deposition with Variable Spot Sizes*. [Online]. Available: <https://www.ilt.fraunhofer.de/en/media-center/brochures/brochure-Varioclad-Laser-Metal-Deposition-with-Variable-spot-sizes.html>. [Accessed: 30-Oct-2017].
- [31] Rofin-Sinar GmbH, *Introduction to Industrial Laser Materials Processing*. Hamburg, 2000.
- [32] R. Fatme, “Slide Share,” *He-Ne Lasers*, 2014. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/Chuhdry/he-ne-lasers-1>.
- [33] T. M. C. C. de B. e Faro, “Estudo e Optimização do Corte LASER de Alta Velocidade em Chapa Metálica Fina,” Feup, 2006.
- [34] “Trumpf.” [Online]. Available: https://www.trumpf.com/en_INT/products/lasers/disk-lasers/. [Accessed: 25-Oct-2017].
- [35] “No Title,” *Double-clad fiber*. [Online]. Available:

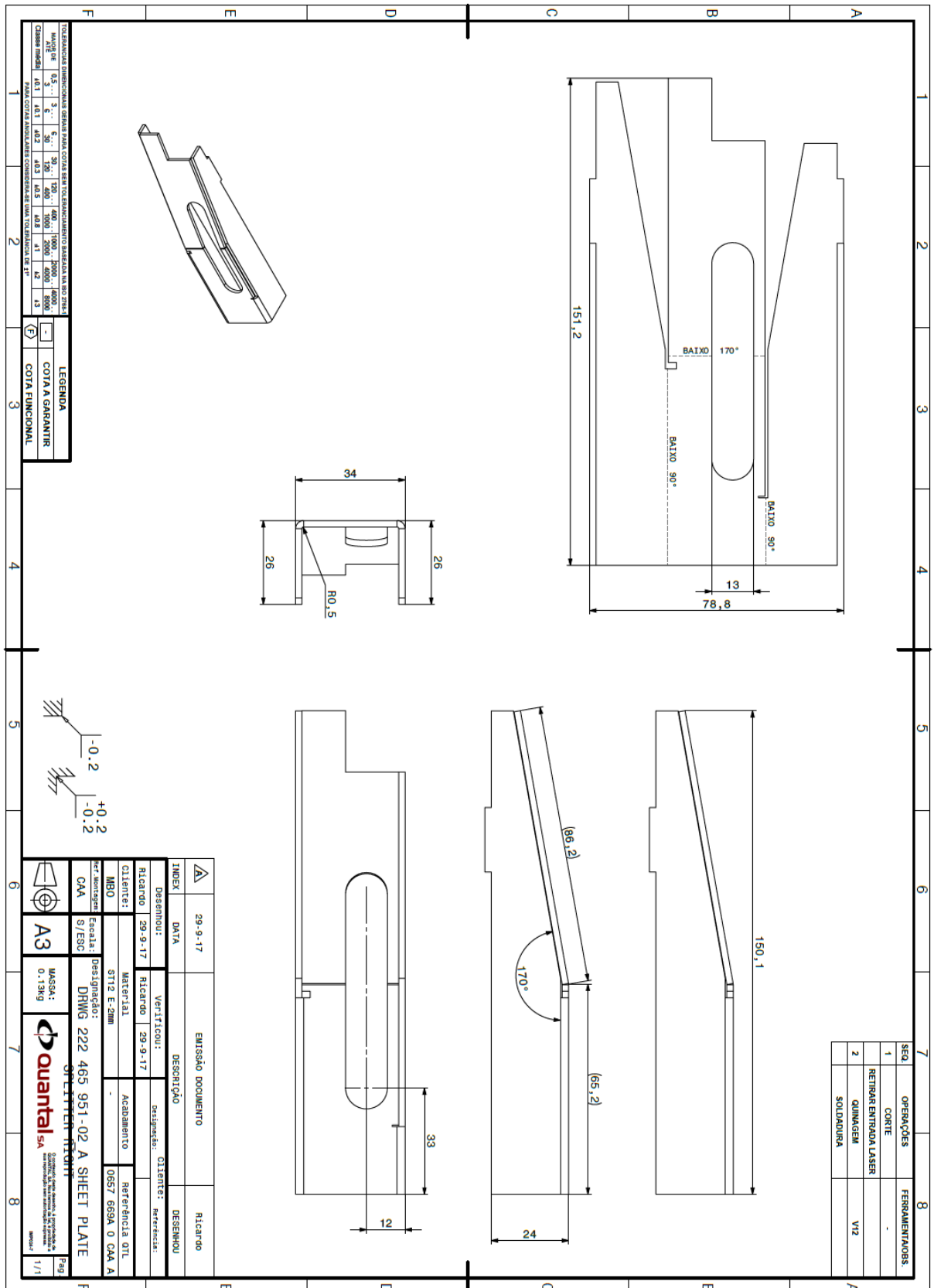
- https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/66/Schematic_diagram_of_high_power_fiber_laser_using_a_double-clad_fiber.svg. [Accessed: 06-Nov-2017].
- [36] Ionix, “Ionix,” *Laser Welding*. [Online]. Available: <http://www.ionix.fi/en/technologies/laser-processing/laser-welding/>. [Accessed: 08-Nov-2017].
- [37] Heat-tech, “Heat-tech,” *Heating of the shielding gas of laser welding*. [Online]. Available: <http://heater.heat-tech.biz/air-blow-heater/best-applications-list-air-blow-heater/10210.html>. [Accessed: 08-Nov-2017].
- [38] A. Rafique, “Weldpedia,” *10 causes of Weld Porosity and their practicable prevention*, 2014. [Online]. Available: <https://www.weldpedia.com/2014/08/10-causes-of-weld-porosity-and-their-practicable-preventions.html>. [Accessed: 12-Nov-2017].
- [39] T. Pfaller, “Welding Productivity,” *Unlocking aluminum welding*. [Online]. Available: <http://weldingproductivity.com/article/unlocking-aluminum-welding/>. [Accessed: 19-Nov-2017].
- [40] “Spartan Mechanics.” [Online]. Available: http://www.spartanmechanics.net/Welding_Notes_Handouts/welding_joints.htm. [Accessed: 18-Jan-2018].

0657664

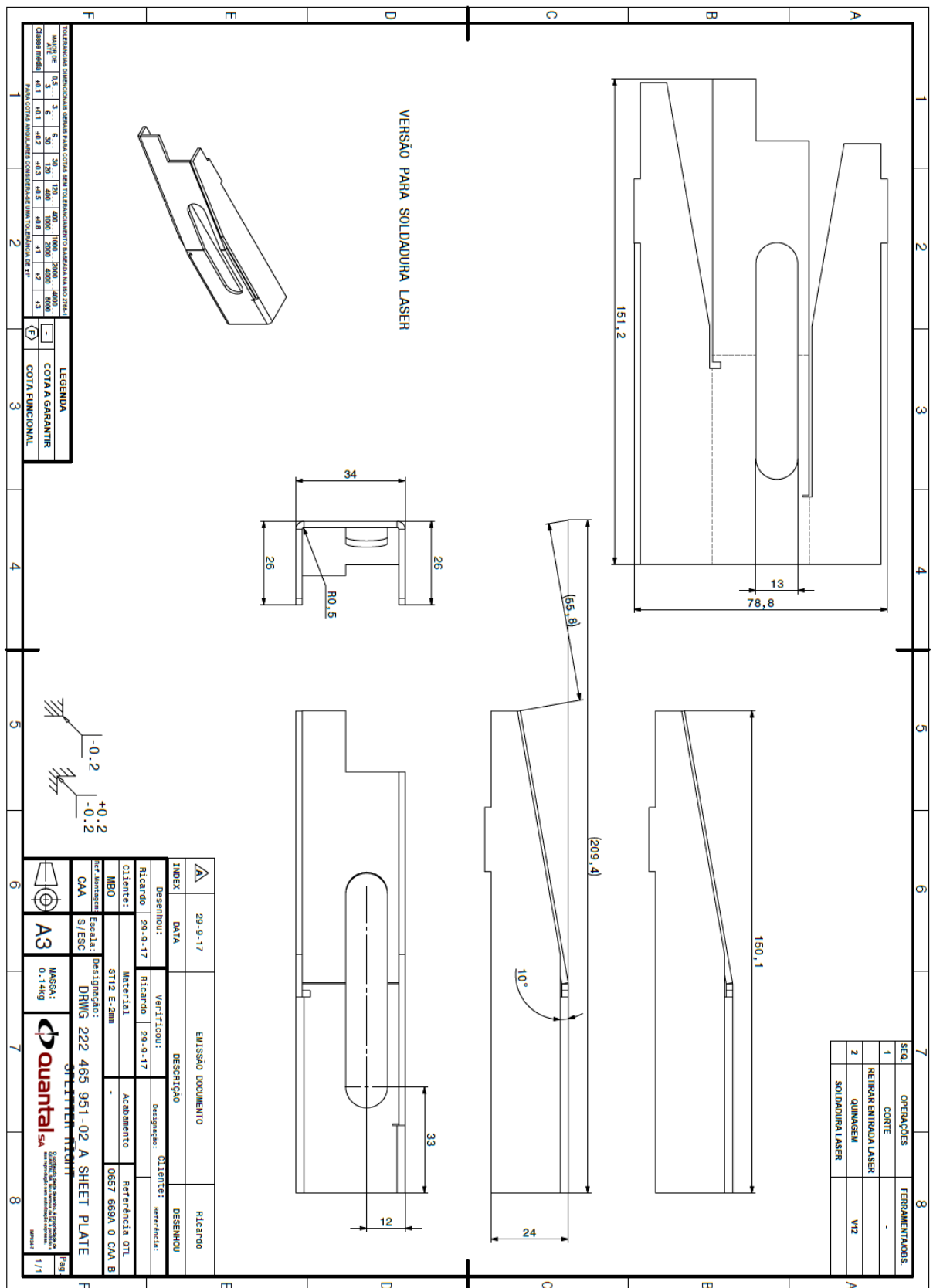




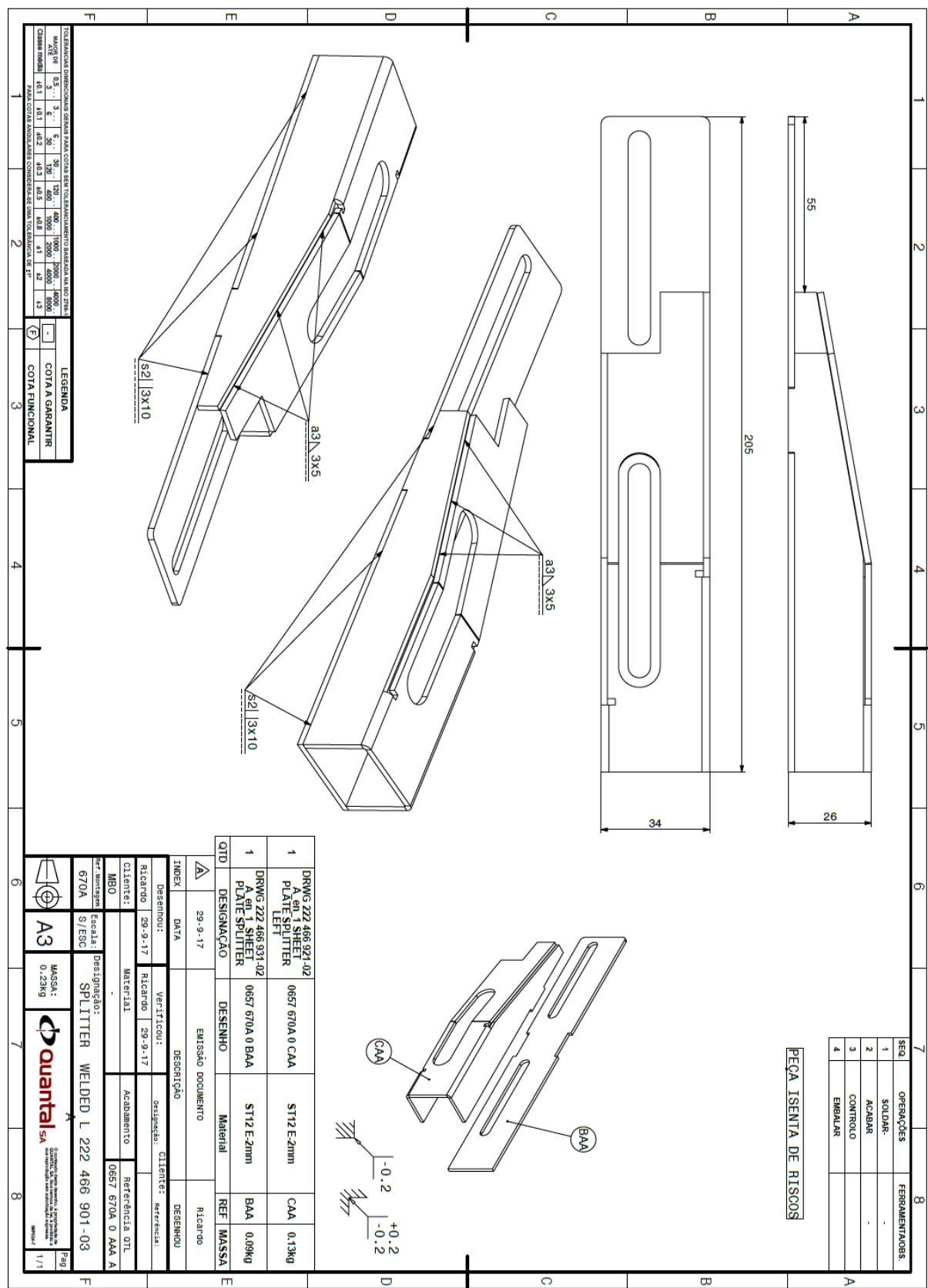
0657669 (peça superior) – Versão para soldadura manual



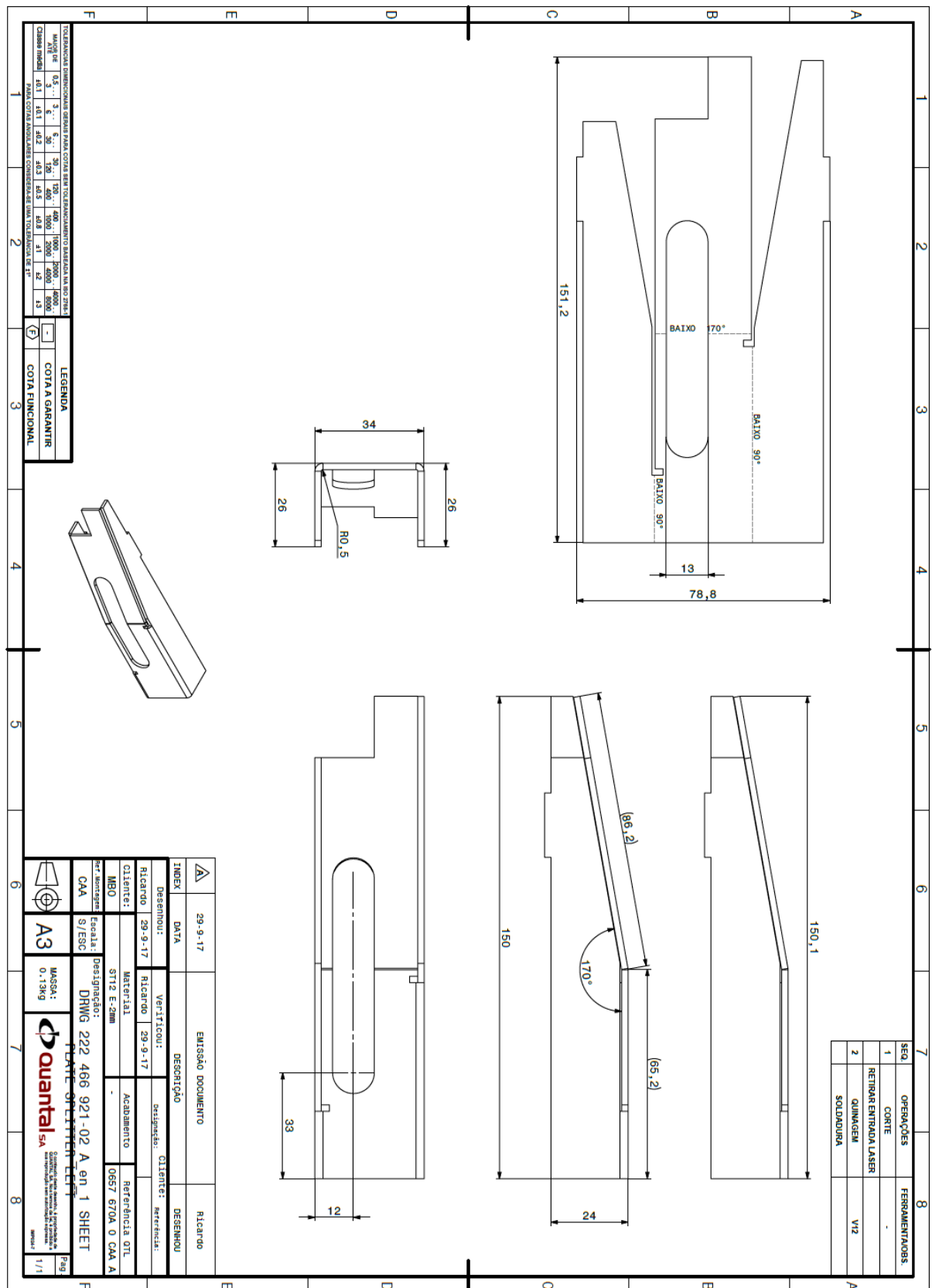
0657669 (peça superior) – Versão para soldadura laser



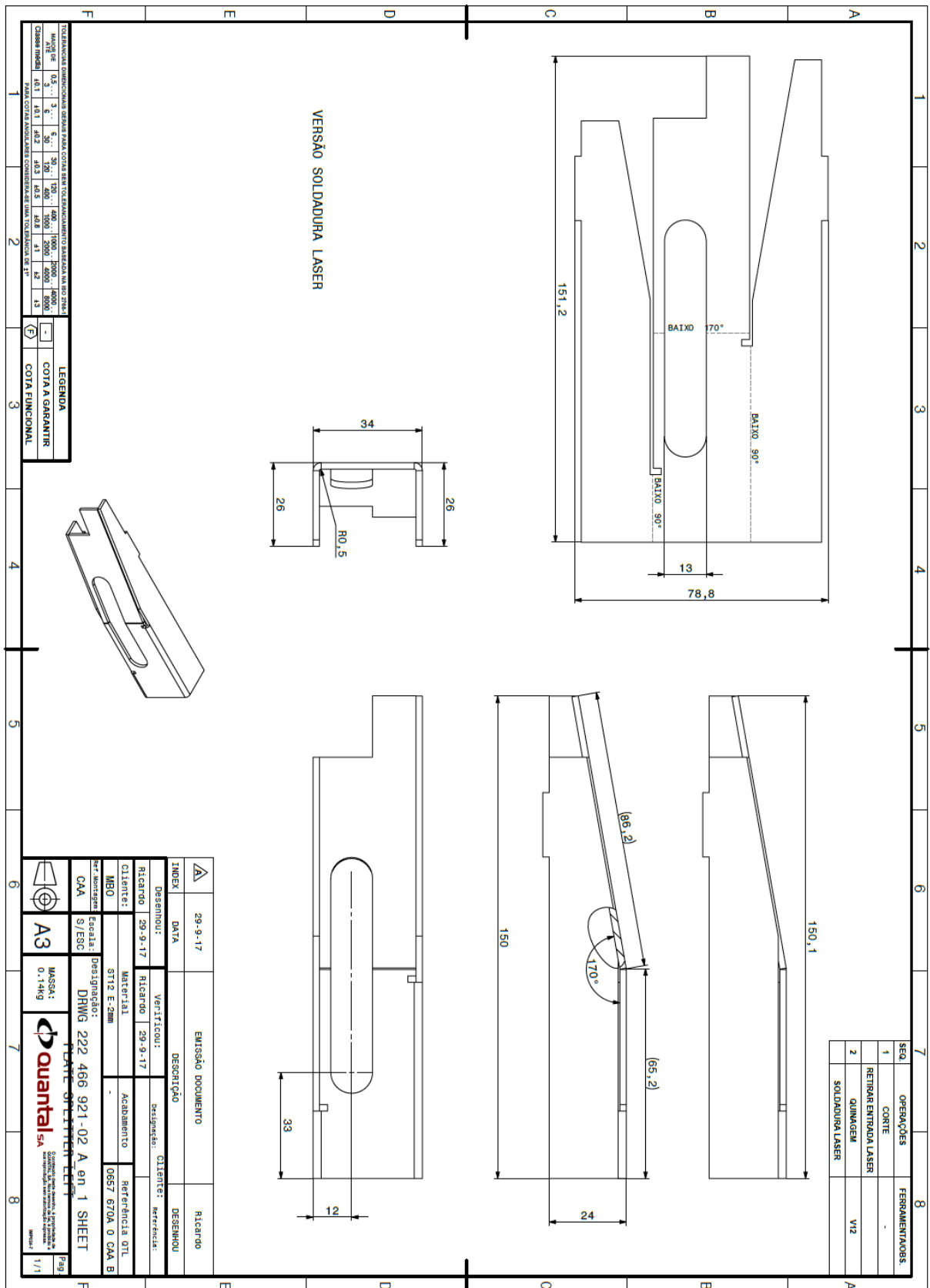
0657670



0657670 (peça superior) – Versão para soldadura manual

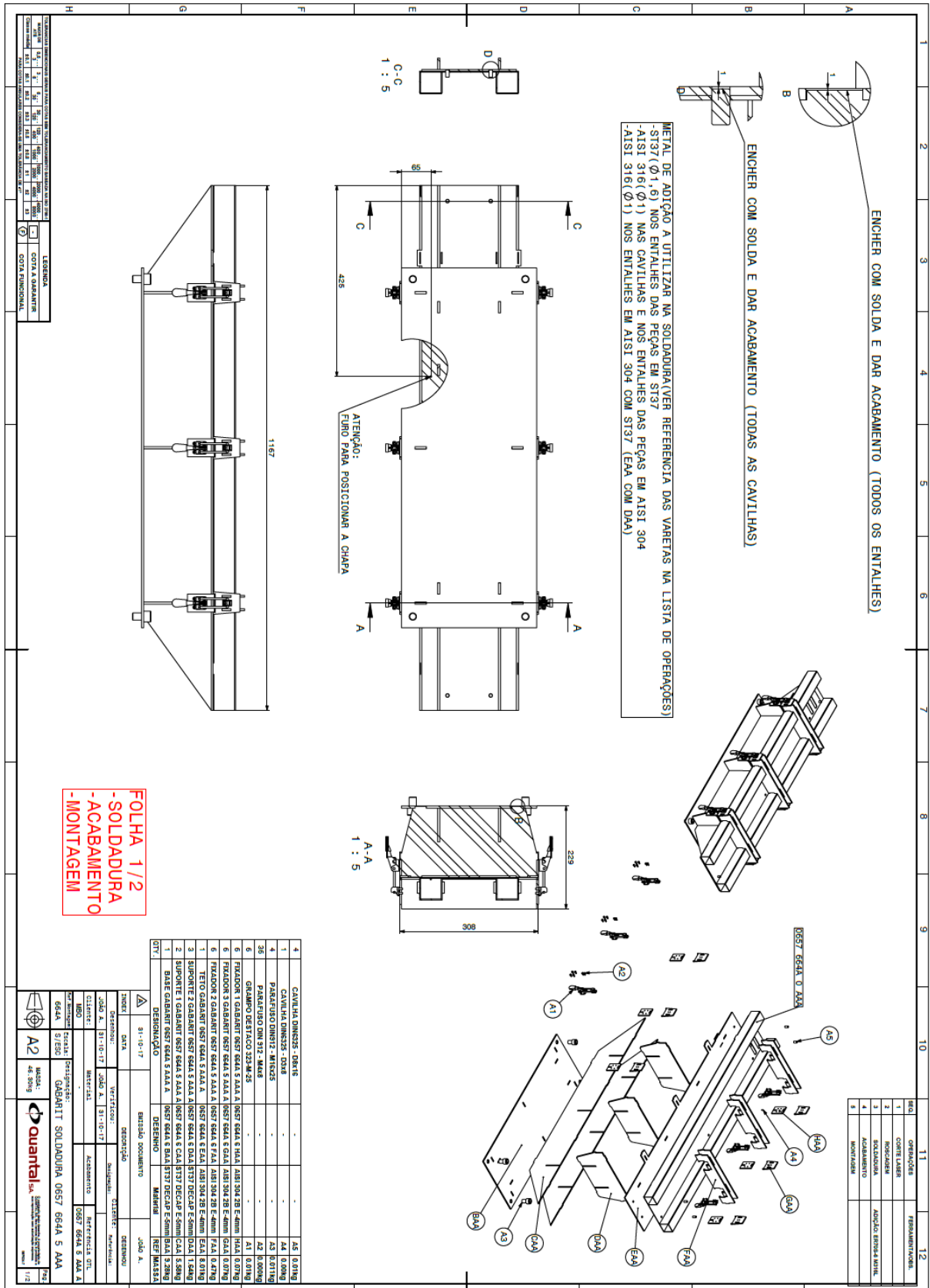


0657670 (peça superior) – Versão para soldadura laser

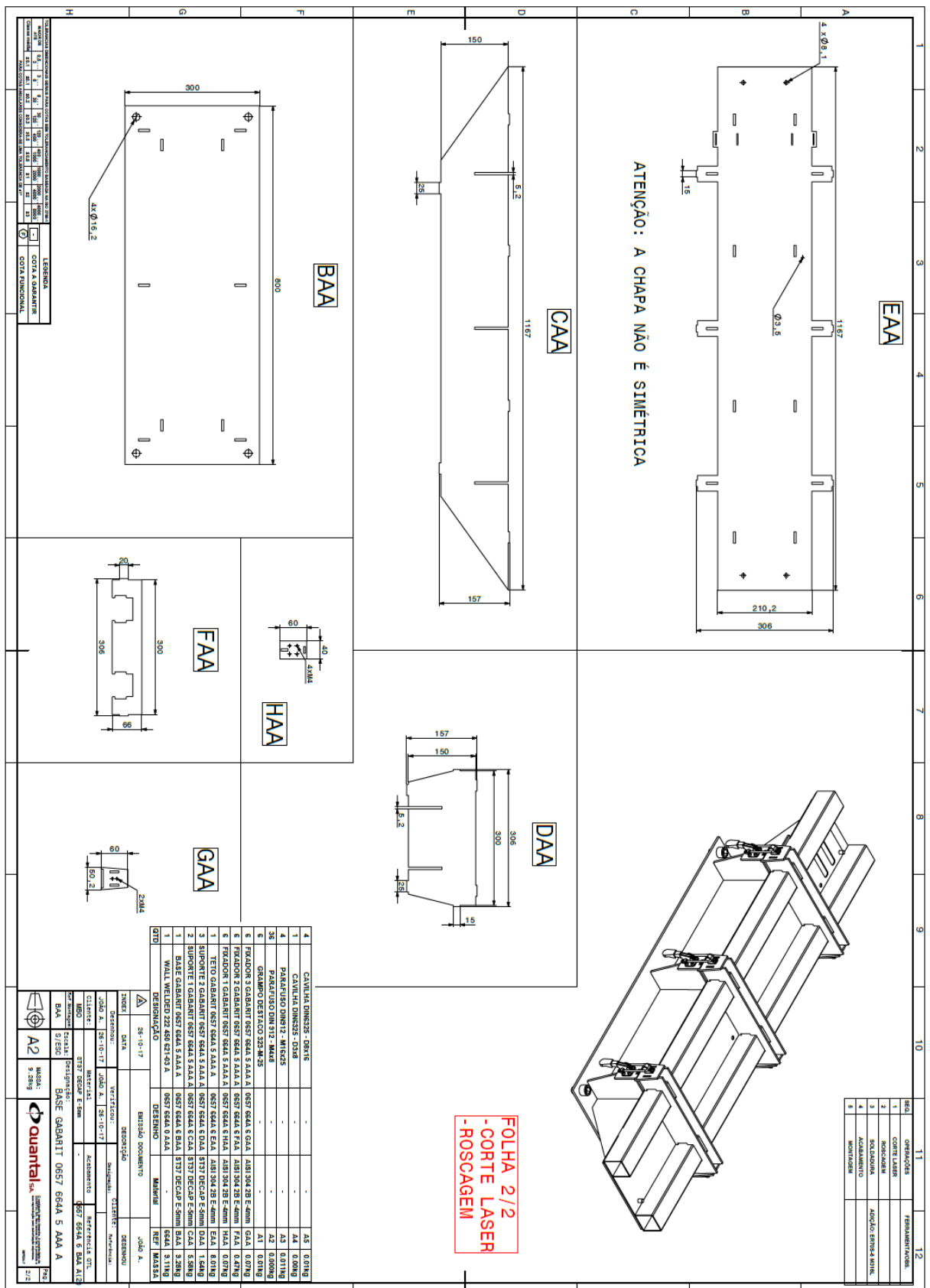


ANEXO B: Desenhos de conjuntos dos gabarits de soldadura laser

Gabarit de soldadura laser 0657664 (página 1/2)



Gabarit de soldadura laser 0657664 (página 2/2)





ANEXO C: Desenhos de conjunto de elementos acessórios

Máscaras de soldadura laser para programação do robot no conjunto 0657664

