

Corte a laser de tubos: Estudo do processo e metodologia de parametrização em função dos materiais a cortar e forma dos tubos

Paulo Alexandre Matos Abreu

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Ana Reis

Orientador na AMOB: Eng. Diogo Pontes

Orientador no INEGI: Eng. Rui Pedro Silva



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro de 2021

À minha mãe e ao meu pai,

Resumo

Esta dissertação foi realizada em colaboração com a AMOB e com o INEGI, no âmbito de um projeto que tem como objetivo desenvolver uma máquina de corte a laser de tubos. O propósito deste trabalho é otimizar a qualidade dos tubos processados pela máquina, que dispõe de uma fonte laser de fibra ótica com 2 kW de potência.

Inicialmente é realizada uma investigação teórica sobre o processo de corte a laser, com particular incidência sobre o corte de metais, onde são discutidos os mecanismos e parâmetros que afetam a qualidade do corte. Posteriormente, foram realizados ensaios experimentais utilizando a máquina em questão, com intuito de definir as combinações de parâmetros que otimizam a qualidade, no corte de tubos com secção retangular e circular, de diferentes materiais (aço de construção, aço inoxidável e alumínio) e espessuras.

Durante os ensaios experimentais foram variados 3 parâmetros do processo: a velocidade de corte, a posição focal e a pressão do gás de assistência. Posteriormente, foram medidas as características de qualidade resultantes das diferentes combinações de parâmetros ensaiadas, nomeadamente: a largura da fenda, a rugosidade da superfície de corte e a altura da escória aderente.

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente recorrendo ao método de Taguchi. A análise é dividida por material e espessura, com o objetivo de definir a combinação de parâmetros ótima para tubos com o mesmo material/espessura, mas com geometria de secção diferente. É também investigada a influência de cada um dos parâmetros nas diferentes características de qualidade.

Foi concluído que a posição focal é o parâmetro que mais afeta a largura da fenda, uma vez que define a área do feixe à superfície do tubo. Na maioria dos casos, posicionar o foco sobre a superfície do tubo, minimizou a largura da fenda. Contudo, para materiais mais espessos, foi necessário garantir fendas mais largas, para aumentar a eficácia na expulsão do material fundido.

Níveis mais elevados de velocidade de corte, para além de garantirem maior produtividade, minimizam a globalidade dos defeitos analisados. Relativamente à pressão do gás, foram identificadas diferenças significativas quando utilizado um gás inerte ou um gás reativo. A utilização de um gás reativo introduz ao processo uma fonte de calor adicional e como consequência, a pressão deve ser reduzida para minimizar a dissipação de calor da frente de corte para o material base, que origina fendas alargadas e estrias sobre a superfície de corte. Por outro lado, aumentar a pressão dos gases inertes aumenta a eficácia na expulsão do material do interior da fenda, uma vez que as tensões de corte exercida pelo gás sobre o material a expulsar são superiores, resultando em menos escória aderente, contudo a fenda é ligeiramente mais larga.

Com base nas conclusões e da informações presentes nesta dissertação, a AMOB é hoje mais capacitada para garantir a qualidade dos tubos processados pela sua máquina de corte a laser.

Abstract

Laser tube cutting: Study of the process and methodology of parameterization as a function of the materials to be cut and the shape of the tubes.

This master thesis was carried out in collaboration with AMOB and INEGI, as part of a project to develop a laser tube cutting machine. The purpose of this work is to optimize the quality of the tubes processed by the machine, which has a fiber laser source with 2 kW of power.

Initially, a theoretical investigation about the laser cutting process, with particular relevance to metal cutting, is performed together with a discussion of the process mechanisms and factors affecting laser cut quality. Subsequently, experimental tests were carried to find a combination of parameters that optimize the cut quality for tubes with rectangular and circular cross-sections, of different metallic materials (structural steel, stainless steel and aluminium) and thicknesses.

Through the experimental procedure, three process parameters were manipulated: the cutting speed, the focal position, and the assist gas pressure. The quality characteristics resulting from the different combinations of those parameters were measured, namely: the kerf width, the cut surface roughness, and the adherent dross.

The results were statically analysed using the Taguchi's method. The analysis was divided by material and thickness, to define the optimal combination of parameters to cut tubes with different cross-section geometry. The effect of each parameter on the different quality characteristics was also studied.

It was concluded that the focal position is the parameter that most affects the kerf width, as it defines the beam spot size at the tube surface. In most cases, placing the focus spot on the tube surface minimized the kerf width. However, for thicker materials, it was necessary to ensure wider kerfs, in order to increase the efficiency of the melt removal from the cut kerf.

Higher cutting speeds, not only ensures greater productivity, but also minimize the defects. Regarding the assist gas pressure, significant differences were identified when using an inert gas or a reactive gas. The use of a reactive gas introduces an additional heat source to the process and pressure must be kept low to minimize the sideways burning, which causes wider kerfs and produce very rough cutting surfaces. On the other hand, increasing the pressure of an inert gas, increases the efficiency of the melt removal from the cut kerf, since the shear stresses exerted by the gas on the molten material are higher, resulting in less adhering dross, however the kerf is slightly wider.

Based on these conclusions and on the information available on this thesis, AMOB is able to guarantee the quality of the tubes processed by its laser cutting machine.

Agradecimentos

Agradeço à AMOB S.A. e ao INEGI por terem tornado possível a realização desta dissertação em ambiente industrial, disponibilizando as instalações e os equipamentos essenciais para consumação da mesma.

Ao meu orientador na AMOB, engenheiro Diogo Pontes, que sempre se mostrou disponível para apoiar e acompanhar o desenvolvimento desta dissertação, garantindo rigorosamente a prontidão de todos bens necessários para dar seguimento às várias etapas do trabalho. Ao engenheiro Rafael Maciel por me ter ensinado a operar o software da máquina como também ao pessoal da secção de montagem que se disponibilizou para corrigir os problemas que surgiram.

À minha orientadora da FEUP, professora Ana Reis, pela oportunidade de poder ter sido integrado no projeto, pelas sugestões, orientações e supervisão do trabalho desenvolvido.

Ao meu orientador do INEGI, engenheiro Rui Pedro Silva, que teve um papel fundamental para o sucesso deste documento, partilhando comigo ideias e informações que me guiaram tanto na investigação, como no procedimento experimental. Um agradecimento especial ao engenheiro João Martins do INEGI, que me ensinou a operar a máquina e teve sempre disponível para me prestar auxílio.

Quero agradecer o financiamento recebido por parte do INEGI, que me ajudou nas despesas de deslocação e alimentação enquanto estive na AMOB. Mais uma vez agradeço à AMOB, que se disponibilizou prontamente a encomendar as matérias-primas e os consumíveis despendidos durante este trabalho.

À minha família e aos meus amigos, pelo apoio insubstituível.

Por último, agradeço à operação POCI-01-0247-FEDER-038454 – Smart2B – Solução de Corte Laser Integrada com Plataforma IoT, Projeto Individual (I&D Empresas), cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e à operação POCI-01-0247-FEDER-069933 – CUT3D - Desenvolvimento de sistemas inteligentes para um equipamento de laser de tubo 3D, Projeto em Copromoção (SI I&DT), cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

Índice de Conteúdos

1.	Introdução.....	1
1.1.	<i>Enquadramento do projeto</i>	<i>1</i>
1.2.	<i>Apresentação da AMOB S.A.</i>	<i>1</i>
1.3.	<i>Objetivos do projeto</i>	<i>3</i>
1.4.	<i>Metodologia adotada.....</i>	<i>4</i>
1.5.	<i>Estrutura da dissertação</i>	<i>5</i>
2.	Estado de Arte	7
2.1.	<i>Lasers.....</i>	<i>7</i>
2.1.1.	<i>Propriedades do feixe laser</i>	<i>8</i>
2.1.2.	<i>Emissão laser.....</i>	<i>12</i>
2.1.2.1.	<i>Transições atômicas</i>	<i>12</i>
2.1.2.2.	<i>Inversão da população</i>	<i>14</i>
2.1.3.	<i>Componentes e princípio de funcionamento da fonte laser</i>	<i>15</i>
2.1.4.	<i>Tipos de fontes laser</i>	<i>18</i>
2.2.	<i>Tecnologia de corte a laser.....</i>	<i>23</i>
2.2.1.	<i>Mecanismos de corte a laser</i>	<i>24</i>
2.2.2.	<i>Métodos alternativos para corte de metais.....</i>	<i>29</i>
2.2.3.	<i>Parâmetros do processo</i>	<i>31</i>
2.2.3.1.	<i>Velocidade de corte</i>	<i>31</i>
2.2.3.2.	<i>Gás de assistência.....</i>	<i>33</i>
2.2.3.3.	<i>Bico.....</i>	<i>36</i>
2.2.3.4.	<i>Distância “stand-off”</i>	<i>37</i>
2.2.3.5.	<i>Distância focal e Posição focal.....</i>	<i>37</i>
2.2.4.	<i>Parâmetros do material</i>	<i>40</i>
2.2.4.1.	<i>Propriedades térmicas</i>	<i>40</i>
2.2.4.2.	<i>Propriedades óticas.....</i>	<i>41</i>
2.2.4.3.	<i>Propriedades físicas.....</i>	<i>43</i>
2.2.5.	<i>Parâmetros do feixe Laser</i>	<i>43</i>
2.2.5.1.	<i>Potência e densidade de potência</i>	<i>43</i>
2.2.5.2.	<i>Modo espacial do feixe laser</i>	<i>43</i>
2.2.5.3.	<i>Diâmetro da mancha focada e profundidade de foco</i>	<i>45</i>
2.2.5.4.	<i>Polarização</i>	<i>46</i>
2.2.5.5.	<i>Modo temporal do feixe laser</i>	<i>49</i>
2.2.6.	<i>Corte a laser de materiais metálicos.....</i>	<i>51</i>
2.2.7.	<i>Qualidade de corte</i>	<i>56</i>
2.2.8.	<i>Corte a laser de tubos</i>	<i>68</i>
2.3.	<i>Parametrização do processo</i>	<i>75</i>
2.3.1.	<i>Planeamento de experiências (DoE)</i>	<i>75</i>
2.3.2.	<i>Método DoE de Taguchi.....</i>	<i>76</i>
3.	Procedimento experimental	81
3.1.	<i>Propósito do trabalho experimental.....</i>	<i>81</i>
3.2.	<i>Equipamento utilizado.....</i>	<i>81</i>
3.2.1.	<i>Materiais</i>	<i>81</i>
3.2.2.	<i>Máquina</i>	<i>83</i>
3.2.3.	<i>Instrumentos de medição</i>	<i>88</i>
3.3.	<i>Planeamento da experiência</i>	<i>90</i>
3.3.1.	<i>Definição dos níveis</i>	<i>95</i>
3.3.2.	<i>Medição das características de qualidade</i>	<i>106</i>

4. Apresentação dos Resultados Experimentais.....	109
4.1. Aço Estrutural, 3 mm de espessura	109
4.2. Aço Estrutural, 6 mm de espessura	111
4.3. Aço Inoxidável, 2 mm de espessura.....	114
4.4. Aço Inoxidável, 5 mm de espessura.....	118
4.5. Alumínio, 2 mm de espessura.....	120
4.6. Qualidade das superfícies de corte.....	123
4.7. Análise estatística e discussão.....	124
4.7.1. Aço Estrutural, 3 mm de espessura	125
4.7.1.1. Largura da fenda	125
4.7.1.2. Rugosidade da superfície	128
4.7.1.3. Parâmetros ótimos	131
4.7.2. Aço Estrutural, 6 mm de espessura	132
4.7.2.1. Largura da fenda	132
4.7.2.2. Rugosidade da superfície	134
4.7.2.3. Parâmetros ótimos	137
4.7.3. Aço Inoxidável, 2 mm de espessura.....	138
4.7.3.1. Largura da fenda	138
4.7.3.2. Rugosidade da superfície	140
4.7.3.3. Parâmetros ótimos	144
4.7.4. Aço Inoxidável, 5 mm de espessura.....	145
4.7.4.1. Largura da fenda	145
4.7.4.2. Rugosidade	147
4.7.4.3. Altura da escória aderente	150
4.7.4.4. Parâmetros ótimos	154
4.7.5. Alumínio, 2mm de espessura.....	155
4.7.5.1. Largura da fenda	155
4.7.5.2. Rugosidade	157
4.7.5.3. Altura da escória aderente	161
4.7.5.4. Parâmetros ótimos	164
5. Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.....	167
6. Referências.....	171
7. ANEXOS	177
ANEXO 1: Tubo aço estrutural (S275JOH), 3 mm de espessura, secção circular (Ø100mm).	179
ANEXO 2: Tubos aço estrutural (S275JOH), 6 mm de espessura, secção retangular (80x40 mm) e secção circular (Ø114.3 mm).	180
ANEXO 3: Tubos aço inoxidável (AISI 304), 2 mm de espessura, secção retangular (100x50 mm) e secção circular (Ø88.9 mm).	182
ANEXO 4: Tubo aço inoxidável (AISI 304), 5 mm de espessura, secção retangular (100x50 mm).	184
ANEXO 5: Tubos de alumínio (AW 6063), 2 mm de espessura, secção retangular (120x40 mm) e secção circular (Ø85 mm).	186

Índice de Figuras

Figura 1 - Instalações principais da AMOB em Louro, Vila Nova de Famalicão (AMOB S.A. 2021).	1
Figura 2 - Alguns equipamentos industriais comercializados pela AMOB. Adaptado de (Barros 2021).	2
Figura 3 - Diagrama de Gantt. Definição cronológica das diferentes tarefas do projeto.	5
Figura 4 - Espectro eletromagnético. Comprimento de onda dos principais lasers utilizados para corte de materiais. Adaptado de (Pannier Corporation 2019).	7
Figura 5 - Acontecimentos históricos no desenvolvimento da tecnologia laser (Lasagni 2019).	8
Figura 6 - Ilustração da perpendicularidade entre o campo elétrico e magnético numa onda de radiação eletromagnética (da Silva, Lucio e Brown 2015).	9
Figura 7 - (a): Coerência perfeita; (b): Feixe com coerência espacial e com coerência temporal τ_0 ; (c): Feixe incoerente (Kannatey-Asibu 2009).	10
Figura 8 - Comparação entre a largura de banda de uma lâmpada convencional e de uma fonte laser. Adaptado de (Kannatey-Asibu 2009).	11
Figura 9 - Esquematização do ângulo de divergência (θ_d) de um feixe laser (Lasagni 2019).	11
Figura 10 - Absorção estimulada entre dois níveis de energia. Adaptado de (Lasagni 2019).	12
Figura 11 - Emissão espontânea entre dois níveis de energia. Adaptado de (Lasagni 2019).	13
Figura 12 - Emissão estimulada entre dois níveis de energia. Adaptado de (Lasagni 2019).	13
Figura 13 - Emissão estimulada - Reação em cadeia (Kannatey-Asibu 2009).	14
Figura 14 - Distribuição da população (Chapman 2008). (a) - Em equilíbrio térmico. (b) - População invertida.	15
Figura 15 - Representação esquemática dos principais componentes de uma fonte de radiação laser. Adaptado de (Lasagni 2019).	15
Figura 16 - Configurações comuns para o bombeamento por radiação: (a) - Bombeamento longitudinal; (b) - Bombeamento transversal. Adaptado de (Kannatey-Asibu 2009).	16
Figura 17 - Princípio de funcionamento de uma fonte geradora de radiação laser. Adaptado de (Pocorni 2017).	17
Figura 18 - Laser CO ₂ , configuração <i>Slab</i> (Coherent 2019).	19
Figura 19 - Fibra ótica com duplo revestimento. Perfil dos índices de refração (n) da secção transversal da fibra (Montiel i Ponsoda 2013).	21
Figura 20 - Propagação da radiação no interior da fibra ótica de duplo revestimento (Montiel i Ponsoda 2013).	21
Figura 21 - Configuração de um sistema de laser de fibra. Adaptado de (Fujikura 2016).	22

Figura 22 – Representação esquemática do processo de corte a laser. Adaptado de (Havrilla e Anthony 1999; Pocorni 2017).	23
Figura 23 - Mecanismo de corte por fusão (Wandera 2006).	25
Figura 24 - Mecanismo de corte por fusão reativa (Wandera 2006).	26
Figura 25 - Comparação entre a velocidade de corte máxima utilizando Oxigénio (gás ativo) e Árgon (gás inerte). Temperatura de fusão para diferentes metais e seus óxidos. Energia gerada durante as respectivas reações exotérmicas (ΔH°_{296}) (Kannatey-Asibu 2009).	27
Figura 26 - Mecanismo de corte por vaporização (Wandera 2006).	28
Figura 27 – Velocidade de corte em função da espessura do material (Kannatey-Asibu 2009).	31
Figura 28 - Velocidade de corte máxima para diferentes metais. Corte com laser de 3 kW de potência (Berkmanns e Faerber 2008b).	32
Figura 29 - Velocidade máxima de corte para aço macio em função da: espessura, potência do laser, tipo de laser e pressão do oxigénio de assistência (Ahmadi et al. 2009).	32
Figura 30 - Viscosidade [cP] em função da temperatura [K] para o ferro (Fe) e óxido de ferro (FeO) (Powell et al. 2008; Pocorni 2017).	34
Figura 31 - Efeito da pureza do oxigénio na velocidade de corte de aço macio com 2mm de espessura. Laser CO ₂ com 800W de potência (Sun e Brandt 2013).	34
Figura 32 - Ilustração das forças que atuam sobre a camada de material fundido (Riveiro et al. 2019)	35
Figura 33 - Consumo de gás de assistência em função da pressão do gás de assistência e do diâmetro do bico (d). (Berkmanns e Faerber 2008b).....	36
Figura 34 - Diferentes tipos de bicos (Eltawahni 2011).	36
Figura 35 – Parâmetros de focagem. Entrega por fibra ótica (Abdullah 2010).	37
Figura 36 - Influência da posição focal na escória aderente. Adaptado de (Shane 2019).	39
Figura 37 - Absorção dos metais em função do comprimento de onda da radiação incidente, à temperatura ambiente (Berkmanns e Faerber 2008b).	42
Figura 38 - Absorção em função da temperatura para o aço e alumínio (Havrilla e Anthony 1999).	42
Figura 39 - Modos eletromagnéticos transversos (TEM) para cavidades de ressonância com secção: (a) - retangular; (b) - circular (Taylor 2019).	44
Figura 40 - Comparação entre o feixe gaussiano e um feixe real (Coherent 2009).	44
Figura 41 - Definição da profundidade de foco através da distância de Rayleigh. Feixe gaussiano (Lapointe e Kashyap 2015).	46
Figura 42 – Energia absorvida pelo material, para diferentes ângulos (ψ) entre o vetor de polarização plana (p) e o vetor de velocidade de corte (c) (Wandera 2006).	46
Figura 43 – (a): Ângulos da frente de corte (Pocorni 2017) ; (b): Funções de Fresnel, que demonstram a absorção do ferro para diferentes comprimentos de onda, ângulos de incidência e direção de polarização (feixe s-polarizado: traço interrompido; feixe p-polarizado: traço contínuo) (Costa Rodrigues, Vorkov e Duflou 2018).	47

Figura 44 - Polarização do feixe em relação à direção de corte. Influência na qualidade da superfície corte (Kannatey-Asibu 2009).....	48
Figura 45 - Influência do ângulo ψ na qualidade da superfície de corte. Aço de baixa liga, 5 mm de espessura (Golyshev, Orishich e Shulyatyev 2017).....	48
Figura 46 - Cortes complexos realizados para diferentes modos temporais de operação (Berkmanns e Faerber 2008a).....	49
Figura 47 - Modos temporais de operação (Steen e Mazumder 2010).....	50
Figura 48 – Parâmetros do modo pulsado (Laser Lab Source 2017).	50
Figura 49 – Influência da posição do plano de foco na largura da fenda de corte. Posição 0: plano de foco à superfície do material. Posição 7: plano de foco 7 mm acima da superfície. Posição -10: Plano de foco 10mm abaixo da superfície.	56
Figura 50 - Perpendicularidade da fenda de corte (u) (European Committee for Standardization 2002).....	57
Figura 51 - Classes de qualidade em função da perpendicularidade da fenda. Norma EN-ISO 9013:2002 (European Committee for Standardization 2002).....	58
Figura 52 - Diferentes padrões de estrias na superfície de corte. Zona 1: Região de penetração direta (escoamento laminar); Zona 2: Região de expulsão/arrasto (escoamento turbulento). Adaptado de (Sun e Brandt 2013).	59
Figura 53 – (a): Separação do escoamento (Steen e Mazumder 2010). (b): Influência da posição focal na formação de estrias e na profundidade de separação do escoamento. Aço inoxidável, 10 mm de espessura (Wandera, Salminen e Kujanp 2009).	59
Figura 54 - Representação esquemática da formação de estrias no processo de corte a laser, pelo mecanismo de corte por fusão reativa. Adaptado de (Wandera 2006).	60
Figura 55 - Média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade (R_{z5}) (European Committee for Standardization 2002).	61
Figura 56 – Classes de qualidade em função da rugosidade (R_{z5}). Norma EN-ISO 9013:2002 (European Committee for Standardization 2002).	62
Figura 57 - Influência da pressão do gás de assistência (Azoto), no corte de aço inoxidável com 10 mm de espessura. Laser de fibra 4 kW, distância focal 190 mm, diâmetro do bico 2.5 mm, posição focal -8 mm, velocidade de corte 1 m/min (Wandera 2016).....	63
Figura 58 - Identificação da camada resolidificada (CR), zona termicamente afetada (ZTA) e material base (MB). Corte de aço macio com 12 mm de espessura (Goppold et al. 2020).....	64
Figura 59 – Contaminação da superfície interior do tubo. (a): Representação esquemática (García-López et al. 2018); (b): Exemplo para aço de construção; (c): Exemplo para Alumínio.	65
Figura 60 – Degradação térmica no corte a laser de tubos. (a): Representação esquemática. Adaptado de (García-López et al. 2018); (b): Exemplo para aço de inoxidável (AISI 304).....	66
Figura 61 - Sistemas de extração de detritos. (a): Colher de extração (TRUMPF 2016); (b): Dispositivo de aspiração (BLM Group 2016).	67
Figura 62 - Aplicações do corte a laser de tubos. (a) - Ligação curvada (TRUMPF 2021); (b) - Encaixe (TRUMPF 2021; Jensen e Petersen 2012); (c) e (d) - Corte em chanfro para posterior aplicação de soldadura (TRUMPF 2021); (e) e (f) - Componentes estéticos (Hunkjet Technocraft 2019).	69

Figura 63 - Máquina de corte a laser de tubos. Disponibilizado pela AMOB.	70
Figura 64 - Módulo alimentador de uma máquina de corte a laser de tubos. Disponibilizado pela AMOB.	71
Figura 65 - Eixos principais de uma máquina de corte a laser de tubos (COREMARK Metals 2020).	72
Figura 66 - Corte bidimensional e tridimensional na realização de contornos em chanfro. Tubos de secção circular (Kloeckner Metals UK 2016).	72
Figura 67 - Capacidade de corte, em espessura, para diferentes fontes laser de fibra. Máquina LC5 da BLM (BLM Group 2021).	74
Figura 68 – Representação das variáveis (<i>inputs</i>) que controlam a resposta (<i>outputs</i>) de um processo/sistema. Adaptado de (Rodrigues 2013).	75
Figura 69 - Função de perda de Taguchi (Rodrigues 2013).	77
Figura 70 – Máquina de corte a laser de tubos utilizada no trabalho experimental. Autorizado pela AMOB.	83
Figura 71 - Fonte laser Rofin-Sinar FL020 Compact. Autorizado pela AMOB.	85
Figura 72 - Cabeça de corte Precitec ProCutter C6 (©Precitec 2018). (a): Cabeça de corte; (b): Posição focal nula (Faro 2006; Jensen e Petersen 2012).	87
Figura 73 - Instrumentos utilizados para medição dos parâmetros de qualidade. (a): Lupa estereoscópica Olympus SZH; (b): Câmara Leica MC170 HD.	88
Figura 74 - Medição da rugosidade da superfície de corte (R_{z5}).	89
Figura 75 - Diagrama causa-efeito (ou espinha de peixe) para a qualidade do corte no processo de corte a laser. Adaptado de (Madić e Radovanović 2012).	90
Figura 76 - Geometria dos cortes realizados em tubos de secção retangular.	93
Figura 77 - Geometria dos cortes realizados em tubos de secção circular. Planificação de 180°	94
Figura 78 - Cortes realizados com incremento de velocidade (Aço estrutural, 3mm de espessura). $V_1 = 0.5$ m/min; $V_{13} = 6.5$ m/min; Incremento = 0.5 m/min.	96
Figura 79 - Superfícies de corte. Testes de incremento da pressão do gás de assistência (Aço estrutural, 6mm de espessura, tubo de secção retangular).	98
Figura 80 - Cortes realizados com incremento de velocidade (Tubo de aço inoxidável, 5mm de espessura). Vista de cima (contornos retangulares).	100
Figura 81 - Superfícies de corte. Testes de incremento da posição focal (Aço inoxidável, 5 mm de espessura).	101
Figura 82 – Cortes realizados com incremento de velocidade (Tubo de secção retangular em alumínio, 2 mm de espessura). Vista de cima (contornos retangulares).	103
Figura 83 - Cortes realizados com incremento de velocidade (Tubo de secção retangular em alumínio, 2 mm de espessura). Vista de baixo (contornos lineares).	104
Figura 84 - Níveis empregues nos ensaios finais para os diferentes materiais e espessuras.	105
Figura 85 – Exemplo: medição da largura da fenda.	106

Figura 86 – Exemplo: medição da altura da escória aderente.	107
Figura 87 - Descoloração da superfície do tubo de secção retangular: Aço inoxidável, 2mm de espessura.	114
Figura 88 – Qualidade das superfícies de corte obtidas em função da rugosidade (Rz_5), de acordo com a norma EN-ISO 9013:2002.....	123
Figura 89 - Efeito dos parâmetros do processo na largura de fenda. Aço estrutural com 3 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da largura da fenda [μ m].	126
Figura 90 - Efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço estrutural com 3 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da rugosidade das superfícies de corte [μ m].	129
Figura 91 - Efeito dos parâmetros do processo na largura de fenda. Aço estrutural com 6 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da largura da fenda [μ m].	133
Figura 92 - Efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço estrutural com 6 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da rugosidade das superfícies de corte [μ m].	135
Figura 93 - Efeito dos parâmetros do processo na largura da fenda. Aço inoxidável com 2 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da largura da fenda [μ m].	139
Figura 94 - Efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço inoxidável com 2 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da rugosidade das superfícies de corte [μ m].	142
Figura 95 - Efeito dos parâmetros do processo na largura de fenda. Aço inoxidável com 5 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da largura da fenda [μ m].	146
Figura 96 - Efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço inoxidável com 5 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da rugosidade das superfícies de corte [μ m].	148
Figura 97 - Efeito dos parâmetros do processo na altura da escória aderente. Aço inoxidável com 5 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da altura da escória aderente [μ m].	152
Figura 98 - Efeito dos parâmetros do processo na largura de fenda. Alumínio com 2 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da largura da fenda [μ m].	156
Figura 99 - Efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Alumínio com 2 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da rugosidade das superfícies de corte [μ m].....	159
Figura 100 - Efeito dos parâmetros do processo na altura da escória aderente. Alumínio com 2 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da altura da escória aderente [μ m].	162
Figura 101 – Cortes complexos realizados em alumínio com 2 mm de espessura, utilizando a combinação de parâmetros definida como ótima.	165

Índice de Tabelas

Tabela 1 -Propriedades típicas de fontes laser a gás (Silfvast 2004).	19
Tabela 2 - Propriedades típicas de fontes laser de estado sólido (Silfvast 2004).	20
Tabela 3 - Comparação qualitativa entre os tipos de laser mais utilizados para o corte de materiais (Jensen e Petersen 2012).	22
Tabela 4 - Mecanismos de corte a laser para diferentes materiais (os mecanismos aplicáveis são indicados por ✓). Adaptado de (Ion 2005; Wandera 2006).	24
Tabela 5 - Comparação entre processos de corte de materiais metálicos. Adaptado de (Ion 2005; Caristan 2004; Havrilla e Anthony 1999)	30
Tabela 6 – Relação entre distância focal da lente de focagem, área da mancha focada, profundidade de foco e manutenção da unidade de focagem (Havrilla e Anthony 1999).	38
Tabela 7 - Propriedades térmicas dos metais (Ashby 2011).	41
Tabela 8 - Defeitos relacionados com a escolha indevida dos parâmetros do processo (Eltawahni 2011).	67
Tabela 9 - Comparação entre máquinas de corte a laser de tubos disponíveis no mercado.	74
Tabela 10 - Composição química dos materiais utilizados (European Committee for Standardization 2008, 2005, 2006).	81
Tabela 11 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados (European Committee for Standardization 2008, 2005, 2006).	82
Tabela 12 - Características dos tubos de secção circular utilizados.	82
Tabela 13 - Características dos tubos de secção retangular utilizados.	83
Tabela 14- Especificações da máquina de corte a laser utilizada no trabalho experimental. Disponibilizado pela AMOB/INEGI.	84
Tabela 15 - Limitações de velocidade e aceleração dos eixos da máquina. Disponibilizado pela AMOB/INEGI.	85
Tabela 16 - Especificações técnicas da fonte laser e do caminho ótico (ROFIN-SINAR 2017).	86
Tabela 17 - Especificações técnicas da cabeça de corte (©Precitec 2018)	87
Tabela 18 - Especificações técnicas do rugosímetro utilizado no trabalho experimental (©Mitutoyo 2009).	89
Tabela 19 - Parâmetros do processo mantidos ao longo do trabalho experimental.	91
Tabela 20 – Matriz de ensaios, segundo o arranjo ortogonal L9.	95
Tabela 21 - Níveis admitidos para o procedimento DoE. Aço estrutural, 3 mm de espessura.	97
Tabela 22 - Níveis admitidos para o procedimento DoE. Aço estrutural, 6 mm de espessura.	99

Tabela 23 - Níveis admitidos para o procedimento DoE. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	100
Tabela 24 - Níveis admitidos para o procedimento DoE. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	102
Tabela 25 - Níveis admitidos para o procedimento DoE. Alumínio, 2 mm de espessura.	104
Tabela 26 - Resultados do procedimento DoE: Aço estrutural, 3 mm de espessura, tubo de secção circular. ..	109
Tabela 27 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço estrutural, 3 mm de espessura, tubo de secção circular.	110
Tabela 28 - Resultados do procedimento DoE: Aço estrutural, 6 mm de espessura, tubo de secção circular e retangular.....	111
Tabela 29 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço estrutural, 6 mm de espessura, tubo de secção circular.	112
Tabela 30 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço estrutural, 6 mm de espessura, tubo de secção retangular.	113
Tabela 31 - Resultados do procedimento DoE: Aço inoxidável, 2 mm de espessura, tubo de secção circular e retangular.....	114
Tabela 32 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço inoxidável, 2 mm de espessura, tubo de secção circular.	116
Tabela 33 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço inoxidável, 2 mm de espessura, tubo de secção retangular.	117
Tabela 34 - Resultados do procedimento DoE: Aço inoxidável, 5 mm de espessura, tubo de secção retangular.....	118
Tabela 35 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço inoxidável, 5 mm de espessura, tubo de secção retangular.	119
Tabela 36 - Resultados do procedimento DoE: Alumínio, 2 mm de espessura, tubo de secção circular e retangular.....	120
Tabela 37 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Alumínio, 2 mm de espessura, tubo de secção circular.....	121
Tabela 38 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Alumínio, 2 mm de espessura, tubo de secção retangular.	122
Tabela 39 – Factores S/N para as larguras de fenda. Aço estrutural, 3 mm de espessura.	125
Tabela 40 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a largura de fenda. Aço estrutural, 3 mm de espessura.	125
Tabela 41 - Resultado das médias das larguras de fenda [µm]. Aço estrutural, 3 mm de espessura.	125
Tabela 42 - Parâmetros ótimos para redução da largura de fenda. Aço estrutural, 3 mm de espessura.	126
Tabela 43 - ANOVA à média das respostas para a largura de fenda. Aço estrutural, 3 mm de espessura.	127
Tabela 44 - Factores S/N para a rugosidade das superfícies de corte (R _{z5}). Aço estrutural, 3 mm.....	128

Tabela 45 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a rugosidade das superfícies de corte (Rz ₅). Aço estrutural, 3 mm de espessura.	128
Tabela 46 - Resultado das médias da rugosidade das superfícies de corte (Rz ₅) [μm]. Aço estrutural, 3 mm de espessura.	128
Tabela 47 - Parâmetros ótimos para redução da rugosidade da superfície de corte (Rz ₅). Aço estrutural, 3 mm de espessura.	129
Tabela 48 - ANOVA à média das rugosidades das superfícies de corte (Rz ₅). Aço estrutural, 3 mm de espessura.	130
Tabela 49 - Níveis ótimos e percentagem de contribuição para cada uma das características de qualidade analisadas. Aço estrutural, 3mm de espessura.	131
Tabela 50 - Factores S/N para as larguras de fenda. Aço estrutural, 6 mm de espessura.	132
Tabela 51 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a largura de fenda. Aço estrutural, 6 mm de espessura.	132
Tabela 52 - Resultado das médias das larguras de fenda [μm]. Aço estrutural, 6 mm de espessura.	132
Tabela 53 - Parâmetros ótimos para redução da largura de fenda. Aço estrutural, 6 mm de espessura.	133
Tabela 54 - ANOVA à média das respostas para a largura da fenda. Aço estrutural, 6 mm de espessura.	133
Tabela 55 - Factores S/N para a rugosidade das superfícies de corte (Rz ₅). Aço estrutural, 6 mm de espessura.	134
Tabela 56 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a rugosidade das superfícies de corte (Rz ₅). Aço estrutural, 6 mm de espessura.	135
Tabela 57 - Resultado das médias da rugosidade das superfícies de corte (Rz ₅) [μm]. Aço estrutural, 6 mm de espessura.	135
Tabela 58 - Parâmetros ótimos para redução da rugosidade da superfície de corte (Rz ₅). Aço estrutural, 6 mm de espessura.	136
Tabela 59 - ANOVA à média das rugosidades das superfícies de corte (Rz ₅). Aço estrutural, 6 mm de espessura.	136
Tabela 60 - Níveis ótimos e percentagem de contribuição para cada uma das características de qualidade analisadas. Aço estrutural, 6 mm de espessura.	137
Tabela 61 - Factores S/N para as larguras de fenda. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	138
Tabela 62 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a largura de fenda. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	138
Tabela 63 - Resultado das médias das larguras da fenda [μm]. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	138
Tabela 64 - Parâmetros ótimos para redução da largura da fenda. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	139
Tabela 65 - ANOVA à média das respostas para a largura da fenda. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	139
Tabela 66 - Factores S/N para a rugosidade das superfícies de corte (Rz ₅). Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	141

Tabela 67 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a rugosidade das superfícies de corte (Rz ₅). Aço inoxidável, 2 mm de espessura.....	141
Tabela 68 - Resultado das médias da rugosidade das superfícies de corte (Rz ₅) [μm]. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	141
Tabela 69 - Parâmetros ótimos para redução da rugosidade da superfície de corte (Rz ₅).Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	142
Tabela 70 - ANOVA à média das rugosidades das superfícies de corte (Rz ₅). Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	143
Tabela 71 - Níveis ótimos e percentagem de contribuição para cada uma das características de qualidade analisadas. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.	144
Tabela 72 - Factores S/N para as larguras de fenda. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	145
Tabela 73 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a largura de fenda. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	145
Tabela 74 - Resultado das médias das larguras de fenda [μm]. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.....	145
Tabela 75 - Parâmetros ótimos para redução da largura de fenda. Aço inoxidável, 5 mm de espessura	146
Tabela 76 - ANOVA à média das respostas para a largura de fenda. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	146
Tabela 77 - Factores S/N para as rugosidades das superfícies de corte (Rz ₅). Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	147
Tabela 78 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a rugosidade da superfície de corte (Rz ₅). Aço inoxidável, 5 mm de espessura.....	148
Tabela 79 - Resultado das médias da rugosidade da superfície de corte (Rz ₅) [μm]. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	148
Tabela 80 - Parâmetros ótimos para redução da rugosidade da superfície de corte (Rz ₅) Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	149
Tabela 81 - ANOVA à média das rugosidades das superfícies de corte (Rz ₅). Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	149
Tabela 82 - Factores S/N para as alturas da escória aderente. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	151
Tabela 83 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a altura da escória aderente. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	151
Tabela 84 - Resultado das médias para a altura da escória aderente [μm]. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	151
Tabela 85 - Parâmetros ótimos para redução da altura da escória aderente. Aço inoxidável, 5 mm de espessura	152
Tabela 86 - ANOVA à média das respostas para a altura da escória aderente. Aço inoxidável, 5mm de espessura.	152
Tabela 87 - Níveis ótimos e percentagem de contribuição para cada uma das características de qualidade analisadas. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.	154

Tabela 88 – Factores S/N para as larguras de fenda. Alumínio, 2 mm de espessura.	155
Tabela 89 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a largura de fenda. Alumínio, 2 mm de espessura.	155
Tabela 90 - Resultado das médias das larguras de fenda [μm]. Alumínio, 2 mm de espessura.....	155
Tabela 91 - Parâmetros ótimos para redução da largura de fenda. Alumínio, 2 mm de espessura.	156
Tabela 92 - ANOVA à média das respostas para a largura de fenda. Alumínio, 2 mm de espessura.	157
Tabela 93 – Factores S/N para a rugosidade das superfícies de corte (R_{z5}). Alumínio, 2 mm de espessura.	158
Tabela 94 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a rugosidade das superfícies de corte (R_{z5}). Alumínio, 2 mm de espessura.	158
Tabela 95 - Resultado das médias da rugosidade das superfícies de corte (R_{z5}) [μm]. Alumínio, 2mm de espessura.	158
Tabela 96 - Parâmetros ótimos para redução da rugosidade da superfície de corte (R_{z5}). Alumínio, 2 mm de espessura.	159
Tabela 97 - ANOVA à média das rugosidades da superfície de corte (R_{z5}). Alumínio, 2 mm de espessura.	160
Tabela 98 – Factores S/N para as alturas da escória aderente. Alumínio, 2 mm de espessura.	161
Tabela 99 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a altura da escória aderente. Alumínio, 2 mm de espessura.	161
Tabela 100 - Resultado das médias para a altura da escória aderente [μm]. Alumínio, 2 mm de espessura.	162
Tabela 101 - Parâmetros ótimos para redução da altura da escória aderente. Alumínio, 2 mm de espessura..	162
Tabela 102 - ANOVA à média das respostas para a altura da escória aderente. Alumínio, 2 mm de espessura.	163
Tabela 103 - Níveis ótimos e percentagem de contribuição para cada uma das características de qualidade analisadas. Alumínio, 2 mm de espessura.	164

Abreviaturas e Símbolos

Lista de siglas, acrónimos e abreviaturas

ANOVA	Análise de variância (<i>Analyses of Variance</i>).
BPP	<i>Beam Parameter Product</i> .
CR	Camada resolidificada.
CW	Feixe contínuo (<i>Continuous wave</i>).
DoE	Planeamento de experiências (<i>Design of Experiments</i>).
EDM	Maquinagem por Eletroerosão (<i>Electrical Discharge machining</i>).
FBG	<i>Fiber Bragg Granting</i> .
FEDER	Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
IoT	<i>Internet of Things</i> .
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> .
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> .
MASER	<i>Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> .
MB	Material Base.
NA	Abertura numérica (<i>Numerical Aperture</i>).
S/N	Factor Sinal/Ruído (<i>Signal-to-Noise ratio</i>).
TEM	<i>Transverse Eletromagnetic Mode</i> .
YAG	Granada de Ítrio e Alumínio (<i>Yttrium Aluminium Garnet</i>).
ZTA	Zona Termicamente Afetada.

Lista de símbolos

λ	Comprimento de onda.
ν	Frequência da onda eletromagnética.
A	Amplitude da onda eletromagnética.
E	Energia de um fóton.
c	Velocidade de propagação da luz no vácuo.
h	Constante de Planck.
θ_d	Ângulo de divergência.

ΔE	Diferença de energia entre dois níveis enérgicos.
N_n	População por unidade de volume no nível de energia n .
E_n	Energia do nível n .
k_B	Constante de Stefan Boltzmann.
n	Índice de refração.
d	Diâmetro da mancha focada.
$\emptyset_c$	Diâmetro do núcleo da fibra ótica.
f	Distância focal da lente de focagem.
f_c	Distância focal da lente de colimação.
L	Profundidade de foco.
c_p	Calor específico a pressão constante.
I_0	Intensidade total do feixe de radiação eletromagnética.
I_a	Intensidade da radiação eletromagnética absorvida pelo material.
I_t	Intensidade da radiação eletromagnética transmitida pelo material.
I_r	Intensidade da radiação eletromagnética refletida pelo material.
P_d	Densidade de potência.
P	Potência do feixe laser.
M^2	Factor de qualidade do feixe (<i>Beam Quality Factor</i>).
Z_R	Comprimento de Rayleigh.
Θ	Ângulo de divergência medido a jusante da cintura do feixe laser.
ψ	Ângulo entre o vetor de polarização e o vetor de velocidade de corte.
φ_{IN}	Ângulo de incidência.
T	Período.
Y	Resposta.
X	Factores controláveis.
Z	Factores de ruído.
u	Perpendicularidade da fenda de corte.
Δa	Redução de espessura.
Rz_5	Média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade.
l_r	Comprimento de base.
L_n	Comprimento de avaliação.
H_0	Hipótese nula.
H_1	Hipótese alternativa.

1. Introdução

1.1. Enquadramento do projeto

O presente trabalho foi realizado no âmbito do projeto: “Smart2B .: Solução de corte laser integrada com plataforma IoT”, onde duas instituições parceiras, o INEGI e a AMOB, unem esforços para desenvolver uma máquina de processamento de tubos por corte a laser. O projeto Smart2B visa a potencializar tecnologicamente o equipamento, capacitando-o com sistemas de produção, manipulação e de segurança avançados, em linha com o paradigma IoT. Este projeto integra umas das operações apoiadas pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE-2020) e cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), com o objetivo temático de reforçar a investigação, o desenvolvimento tecnológico e a inovação.

Com esta dissertação, sendo parte do projeto de desenvolvimento da máquina, é pretendido que seja elaborada uma metodologia experimental para otimizar a qualidade de corte nos tubos processados pelo equipamento, através do ajuste dos parâmetros que regem o processo.

1.2. Apresentação da AMOB S.A.

A AMOB - Máquinas Ferramentas S.A., é uma empresa portuguesa que desenvolve, projeta e fabrica equipamentos para a indústria metalomecânica, prestando também serviços de assistência técnica aos seus clientes. Especializada na tecnologia de curvatura de tubos, perfis e de conformação de externos, as suas soluções são aplicadas nos mais variados sectores industriais, como o setor: automóvel, naval, aeroespacial, mobiliário, construção civil, estruturas metálicas, entre outros (Barros 2020).



Figura 1 - Instalações principais da AMOB em Louro, Vila Nova de Famalicão (AMOB S.A. 2021).

Fundada em 1960 por António Martins Oliveira Barros, nome que deu origem ao acrónimo AMOB, mais tarde sucedido pelo seu filho Manuel Barros e pelos netos Inês Barros e Manuel António Barros, hoje emprega cerca de 160 pessoas na suas instalações principais (Figura 1) em Louro, Vila Nova de Famalicão, cobrindo uma área de 18000 m² (Barros 2020).

Estas instalações são equipadas com a mais avançada tecnologia para processamento de materiais metálicos (centros de maquinação, fresadoras CNC, tornos, máquinas de corte a laser de chapa, puncionagem, etc.). O investimento constante, quer em ativos tecnológicos, quer em recursos humanos, garante a elevada competitividade da marca AMOB face às restantes empresas do seu setor de atividade, disponibilizando no mercado internacional, maquinaria e ferramentas de elevada qualidade e fiabilidade, todas elas fabricadas à medida das necessidades de cada cliente (AMOB S.A. 2021; Barros 2020). Recentemente a AMOB fez um avultado investimento na tecnologia laser, com intuito de potencializar a capacidade de produção das suas instalações, como também complementar o portfólio de máquinas comercializadas. Assim, a empresa espera atingir novos mercados, nomeadamente o mercado de máquinas de corte a laser de tubos, continuando a posicionar-se como uma das principais fornecedoras de soluções para o processamento de tubos e perfis a nível internacional.

É sobretudo uma empresa com um perfil exportador, tendo uma taxa média de exportação próxima aos 90 % (Barros 2020). Com mais de 12 mil máquinas instaladas em cerca de 90 países, foi considerada em 2021, a terceira maior fabricante de máquinas de curvar tubo do mundo (Barros 2021). Para além das máquinas de curvar tubo, a AMOB também comercializa um software de curvatura, máquinas de arquear, conformadoras de externos, perfiladoras, prensas hidráulicas e, num futuro próximo, máquinas de corte a laser de tubos. A empresa aposta num relacionamento próximo com todos os seus clientes, disponibilizando-se também a fornecer-lhes outras soluções customizadas e inovadoras, que satisfaçam e cumpram com distinção as suas exigências específicas. Na Figura 2 são apresentados alguns exemplos de máquinas produzidas e comercializadas pela AMOB.



Figura 2 - Alguns equipamentos industriais comercializados pela AMOB. Adaptado de (Barros 2021).

Nos últimos anos os produtos comercializados pela AMOB têm sofrido alterações, com intuito de incorporar nos seus equipamentos a tecnologia mais avançada disponível no mercado. Máquinas totalmente elétricas e integradas na indústria 4.0, têm sido o principal foco, quer no desenvolvimento de futuros projetos, quer no aperfeiçoamento dos modelos existentes. Deste modo, com 10 novos modelos de máquina a apresentar em 2021 e com a recente aposta em máquinas de corte a laser, a AMOB continuará na vanguarda da tecnologia de processamento de tubos e perfis (Barros 2021, 2020).

1.3. Objetivos do projeto

O principal objetivo desta dissertação é desenvolver uma metodologia experimental para otimização da qualidade corte de tubos processados por laser, através ajuste dos parâmetros subjacentes ao processo.

Este trabalho foi realizado nas instalações da AMOB, empresa que atualmente desenvolve um equipamento de processamento de tubos por corte laser. Esta tecnologia possibilita a realização de cortes em tubos metálicos com a precisão, qualidade e flexibilidade, não encontrada nos restantes processos alternativos para corte de metais. Com este equipamento a AMOB espera potencializar a capacidade de produção das suas instalações, permitindo dar resposta às necessidades de mercados com maiores exigências produtivas e posicionar-se como um dos principais *players* do seu setor de atividade a nível internacional.

De forma a potencializar o conhecimento teórico sobre o processo em causa, numa fase inicial do presente trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica tendo como objetivo:

- Adquirir conhecimento sobre o princípio de funcionamento e sobre os diferentes tipos de fontes de radiação laser;
- Estudar os fenómenos físicos e químicos que regem o processo de corte a laser para diferentes materiais metálicos;
- Conhecer os principais parâmetros afetos ao processo;
- Investigar as metodologias utilizadas para avaliação da qualidade de corte e a influência dos parâmetros do processo nas diferentes características de qualidade;
- Compreender as metodologias habitualmente adotadas para parametrização de máquinas.

Tendo como fundamento a pesquisa realizada, na fase experimental do trabalho, através da realização de ensaios experimentais utilizando a máquina em questão, é pretendido:

- Definir uma metodologia para determinar o conjunto de parâmetros do processo que maximizam a qualidade de corte, para tubos de diferentes materiais, espessuras e geometrias;
- Minimizar a influência da geometria do tubo na definição dos parâmetros de corte;
- Garantir a repetibilidade dos cortes efetuados;
- Analisar a influência dos parâmetros de corte em diferentes características de qualidade.

É esperado que esta dissertação seja parte fundamental do projeto de investigação e desenvolvimento da máquina de corte a laser de tubos da AMOB. No final deste trabalho, é pretendido que a empresa fique capacitada a garantir a qualidade dos tubos processados por corte a laser.

1.4. Metodologia adotada

Esta dissertação foi maioritariamente realizada em ambiente industrial, nas instalações principais da AMOB (Louro, Vila Nova de Famalicão). O primeiro mês, fevereiro de 2021, foi destinado ao estabelecimento de contacto com todos os intervenientes do projeto e ao processo de adaptação à empresa. Paralelamente, foi desenvolvido um estudo aprofundado sobre o processamento de materiais por corte a laser, estudo que se estendeu até meados do mês de maio, tendo como objetivo a aquisição dos conhecimentos indispensáveis para a elaboração desta dissertação.

No mês de março de 2021, foram delineados os objetivos do trabalho e planeada a metodologia experimental que seria adotada daí em diante. Nesta fase e com base na pesquisa bibliográfica realizada, foram decididas quais as características de qualidade a avaliar, bem como o conjunto de parâmetros que seriam otimizados. Ao mesmo tempo, foram estabelecidos os primeiros contactos com a máquina onde, acompanhado pelo engenheiro João Martins do INEGI, foi possível adquirir os princípios necessários para operar autonomamente o equipamento e os softwares a este inerentes.

Ao terceiro mês foram especificados os materiais a encomendar e contactados diferentes fornecedores de tubos. Esta tarefa prolongou-se por mais de um mês, face à incompatibilidade entre o plano delineado e a oferta dos respetivos fornecedores.

A definição da geometria de corte e da matriz de ensaios foi iniciada com a chegada dos materiais encomendados às instalações da AMOB. A matriz de ensaios foi definida tendo por base o método de planeamento experimental de Taguchi. Numa fase inicial foram efetuados vários cortes aos diferentes tubos, variando individualmente cada um dos parâmetros a otimizar. Assim, foi possível identificar, para cada parâmetro, um intervalo de níveis que garantisse o corte completo de toda a geometria admitida, de forma a serem inseridos na matriz de ensaios finais.

Com base nos intervalos de níveis anteriormente definidos, foram realizados os ensaios finais de acordo com uma matriz ortogonal L9, variando os parâmetros a otimizar (velocidade de corte, a posição focal e a pressão do gás de assistência), segundo três níveis distintos. Destes ensaios resultaram as amostras posteriormente avaliadas em termos de qualidade.

Em junho de 2021, deu-se início à avaliação das características de qualidade nos laboratórios do INEGI. As características de qualidade admitidas foram: a largura da fenda, a rugosidade da superfície de corte e a altura da escória aderente à aresta inferior desta superfície. Através de uma lupa estereoscópica foram adquiridas imagens das respetivas superfícies e das fendas resultantes de cada combinação de parâmetros, a partir das quais foram efetuadas as medições recorrendo a um software de processamento de imagem. Foi também medida a rugosidade das superfícies através de um rugosímetro.

Já numa fase avançada do trabalho, os dados foram estatisticamente manipulados e analisados de acordo com o método de Taguchi, possibilitando a definição dos níveis de parâmetros que garantem a qualidade de corte. Foi também realizada uma análise de variância (ANOVA) aos dados coletados, onde foi possível identificar a percentagem de contribuição de cada parâmetro para as diferentes características de qualidade.

Na Figura 3 é apresentado um diagrama de Gantt, que ilustra cronologicamente o avanço das diferentes tarefas desempenhadas ao longo do projeto.

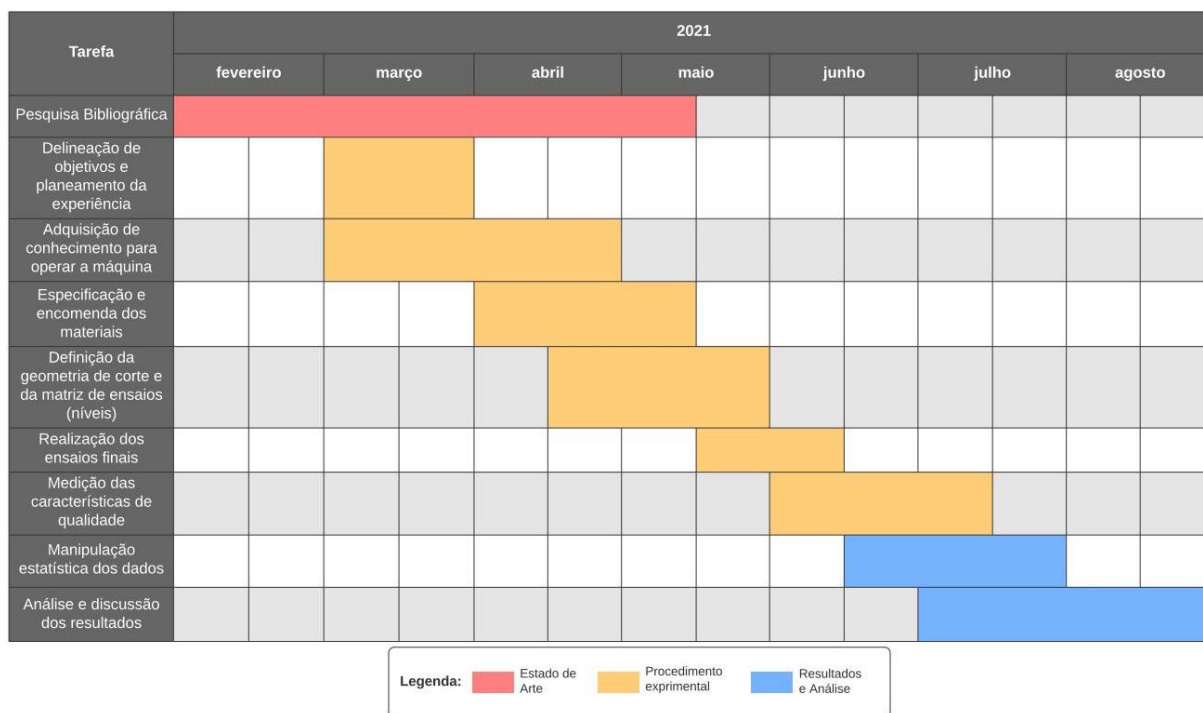


Figura 3 - Diagrama de Gantt. Definição cronológica das diferentes tarefas do projeto.

1.5. Estrutura da dissertação

Esta dissertação é dividida em 7 capítulos. No capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos subjacentes ao processo de corte a laser, fundamentos que serviram como alicerces para definição do procedimento experimental e para argumentação dos resultados obtidos. Este capítulo está subdividido em 4 partes. Inicialmente, é feita uma abordagem ao princípio de funcionamento de diferentes fontes de radiação laser. De seguida, é realizado um estudo sobre os fenómenos e parâmetros que regem o processo, bem como apresentadas as várias metodologias habitualmente usadas para avaliar a qualidade de corte. Posteriormente, é realizada uma abordagem às máquinas de processamento de tubos por corte a laser, onde é feita uma comparação entre as características de algumas das máquinas disponíveis no mercado. Por último, são estudados os métodos utilizados na parametrização de processos, com principal incidência sobre o método de Taguchi.

No capítulo 3 são especificados os equipamentos e materiais utilizados na realização do trabalho experimental. É definida a metodologia empregue para determinação das matrizes de ensaios e na medição das características de qualidade. Neste capítulo são também expostas as observações efetuadas durante os ensaios iniciais, ou seja, durante a manipulação individual de cada um dos parâmetros a otimizar.

No capítulo 4 são apresentadas as matrizes de ensaios, bem como os resultados obtidos na medição das características de qualidade. Ainda no mesmo capítulo, estes dados são estatisticamente manipulados de acordo com o método de Taguchi, permitindo, assim, a definição da combinação de parâmetros ótima para maximizar a qualidade e a análise ao efeito dos parâmetros sobre os diferentes defeitos avaliados.

O capítulo 5 é destinado às conclusões, onde é feita uma abordagem resumida ao conhecimento adquirido durante a investigação teórica realizada, como também são expostas as principais ilações retiradas do procedimento experimental. No capítulo 6 são apresentadas as

diferentes fontes de informação utilizadas para desenvolvimento deste documento. Por último, no capítulo 7 e como anexos, são apresentadas fotografias adquiridas aos tubos ensaiados.

2. Estado de Arte

2.1. Lasers

A designação LASER surge como acrónimo para o termo “*light amplification by stimulated emission of radiation*” e é um dispositivo que amplifica a intensidade luminosa pelo fenómeno de emissão estimulada, possibilitando a obtenção de um feixe com características únicas que o distingue dos restantes feixes de radiação eletromagnética. Luz pode ser definida como a radiação eletromagnética visível ao olho humano, tendo um comprimento de onda que varia desde 0.37 μm até 0.75 μm , situando-se entre a radiação ultravioleta e a radiação infravermelha. Os feixes laser são também feixes de radiação eletromagnética, no entanto, podem apresentar comprimentos que variam de 0.2 μm até 500 μm , indo desde os raios-X, passando pelo espectro ultravioleta e visível, até aos infravermelhos (Kannatey-Asibu 2009). Na Figura 4 são representados os intervalos de comprimentos de onda para os diversos tipos de radiação no espectro eletromagnético, bem como a localização dos lasers mais utilizados para corte de materiais.

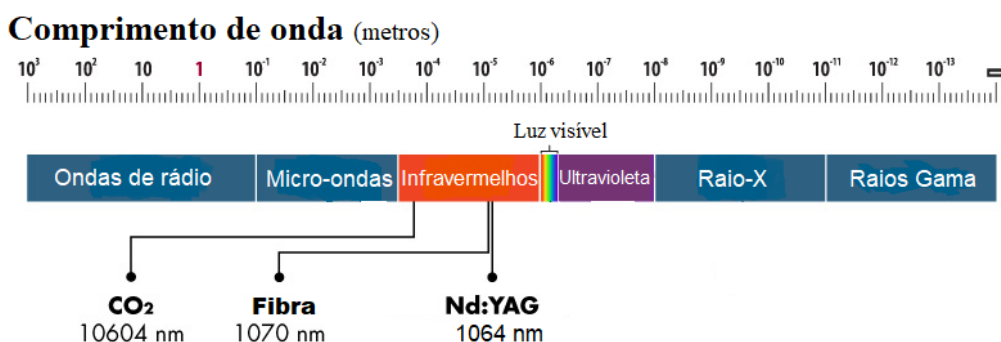


Figura 4 - Espectro eletromagnético. Comprimento de onda dos principais lasers utilizados para corte de materiais. Adaptado de (Pannier Corporation 2019).

O princípio de funcionamento de uma fonte laser tem por base a teoria de emissão estimulada proposta por Albert Einstein, em 1917, na qual concluiu que um fóton, quando entra em contacto com um átomo, pode “estimular” o decaimento de um dos eletrões desse átomo para um nível mais baixo de energia, resultando na emissão de um fóton adicional com a mesma quantidade de energia do fóton incidente. Em 1947, Willis Lamb e Robert Retherford foram os primeiros a demonstrar este fenómeno na prática, através da amplificação da radiação emitida por moléculas de hidrogénio, com objetivo de medir a energia de uma transição molecular específica (Tinoco 2011). Mais tarde, em 1954, Charles Townes manipulou o processo de emissão estimulada de forma a ser empregue num dispositivo amplificador de radiação eletromagnética na ordem das micro-ondas, pela invenção do primeiro MASER (“*microwave amplification by stimulated emission of radiation*”). O primeiro maser era de vapor de amoníaco, sendo que a transição ocorria entre dois níveis de energia, produzindo ganho num comprimento de onda de 1.25 cm (Silfvast 2003). Charles Townes continuaria os seus trabalhos na eletrónica quântica desenvolvendo em 1958, com a colaboração de Arthur Schawlow, os princípios teóricos do amplificador ótico e da cavidade de ressonância, que lhe permitiriam estender o princípio de funcionamento do maser para comprimentos de onda abrangidos pelo espectro infravermelho e visível, criando, assim, o que foi inicialmente designado por “*optical maser*” que mais tarde viria a ser reconhecido por laser (Silfvast 2003; Moreira 2017).

O primeiro dispositivo laser foi inventado por Theodore Maiman em 1960, que aplicando os conceitos estudados por Townes e Schawlow, propôs a utilização de um cristal de rubi sintético, em forma de varão, como meio de ganho, tendo como fonte de bombeamento uma lâmpada flash helicoidal. O varão de rubi apresentava extremidades planas, sendo uma delas revestida total e outra parcialmente por um material altamente refletor (prata), formando assim a cavidade de ressonância. Durante a operação, um intenso feixe de cor encarnada surgia a partir da face parcialmente revestida quando a lâmpada flash entrava em funcionamento. Estava inventado o primeiro laser de estado sólido. Em 1961 surgiu o primeiro laser de estado gasoso, tendo como meio ativo uma mistura de gases de Hélio e Néon. Mais tarde, em 1966, surge o primeiro laser de estado líquido (laser de corantes) (Silfvast 2003).

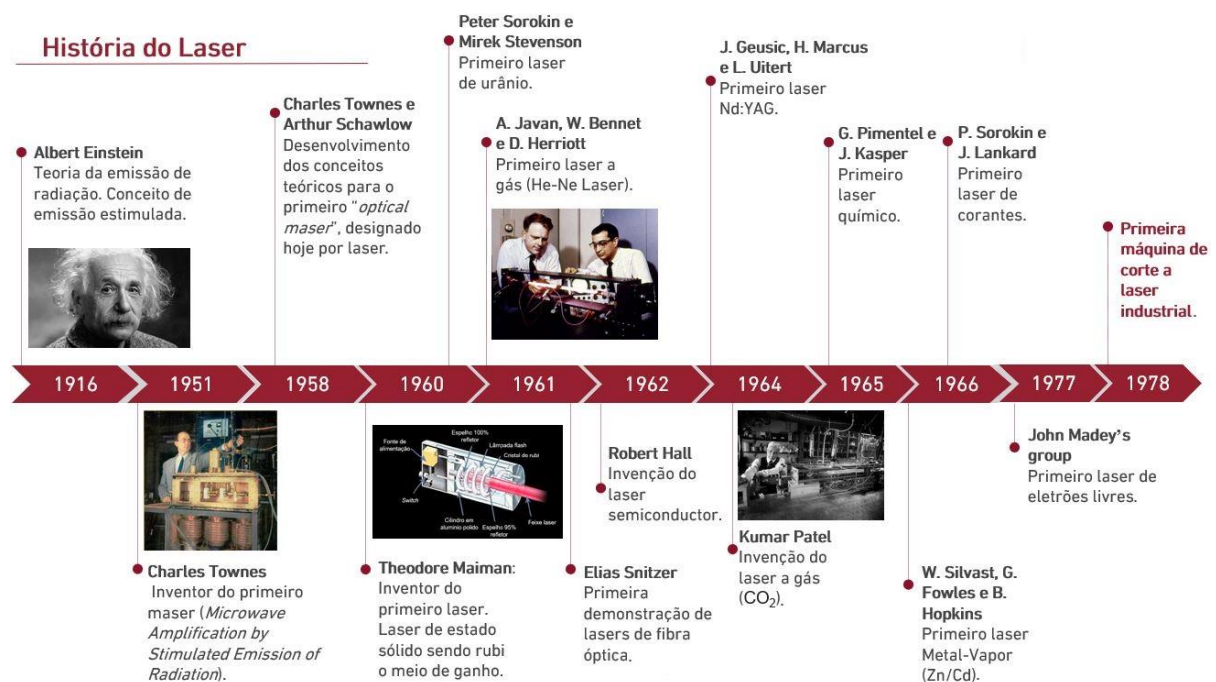


Figura 5 - Acontecimentos históricos no desenvolvimento da tecnologia laser (Lasagni 2019).

2.1.1. Propriedades do feixe laser

Um feixe laser é uma forma de radiação eletromagnética e como tal, é energia que se propaga no meio tanto sob forma de onda eletromagnética transversal, como sob forma de um sistema de partículas com quantidade de energia discreta, partículas denominadas por fótons. Assim, a radiação apresenta a dualidade de comportamento onda-partícula (Hitz, Ewing e Hecht 2012).

Ondas são oscilações periódicas de uma ou mais grandezas físicas e caracterizam-se por 3 propriedades principais: amplitude (A), comprimento de onda (λ) e frequência (ν). No caso das ondas eletromagnéticas, as grandezas físicas que oscilam são campos elétricos e campos magnéticos. Uma alteração no campo magnético gera um campo elétrico. São as sucessivas variações num dos campos que dão origem às ondas eletromagnéticas (Silfvast 2004).

Estas ondas são ditas transversais uma vez que, tanto os campos elétricos, como os magnéticos, desenvolvem-se perpendicularmente à direção de propagação da onda. O campo magnético propaga-se na direção horizontal e o campo elétrico propaga-se na direção vertical, tal como indica a Figura 6. Ao contrário das ondas mecânicas, como é o caso das ondas sísmicas

e ondas sonoras, que se propagam por vibração ou perturbação do meio, seja este sólido, líquido ou gasoso, as ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio para se propagarem, tornando possível a sua propagação no vácuo. A radiação eletromagnética propaga-se no vácuo a uma velocidade de aproximadamente $c = 3.0 \cdot 10^8$ m/s, designada por velocidade da luz (Hitz, Ewing e Hecht 2012).

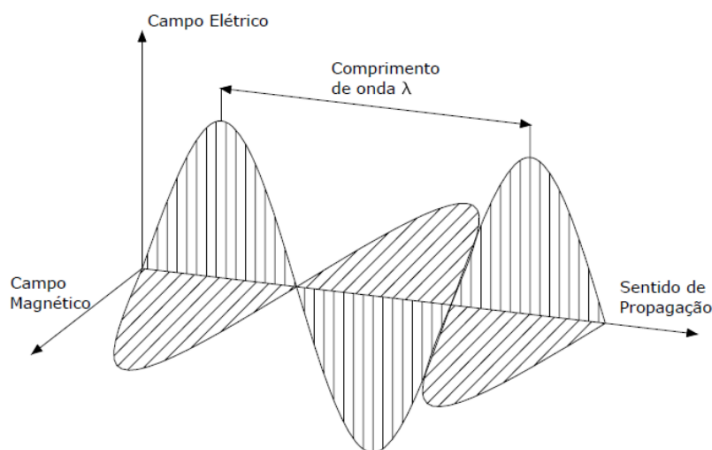


Figura 6 - Ilustração da perpendicularidade entre o campo elétrico e magnético numa onda de radiação eletromagnética (da Silva, Lucio e Brown 2015).

Por outro lado, a radiação tem também o comportamento de pequenas partículas com uma quantidade discreta de energia, designadas por fotões. Os fotões possuem momento, não têm massa e deslocam-se à velocidade da luz. A energia de um fotão (E) é diretamente proporcional à frequência da radiação (ν), sendo calculada pela **Equação 2.1** (Lasagni 2019; Ready 1997).

$$E = h * \nu = h * \frac{c}{\lambda} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde h é a constante de Planck ($h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), c a velocidade da luz e λ o comprimento de onda. Maior intensidade luminosa não significa fotões mais energéticos, mas sim uma maior quantidade de fotões. Em contrapartida, quanto maior o comprimento de onda, menor será a energia por fotão, ou seja, modificar a cor da luz irá alterar a quantidade de energia por fotão, pois há mudança no comprimento de onda da radiação eletromagnética, indicando, por exemplo, que os fotões presentes num feixe luminoso de cor encarnada possuem menos energia que um feixe idêntico de cor azul (Hitz, Ewing e Hecht 2012).

Abordados os conceitos fundamentais sobre radiação eletromagnética, serão agora explicadas as propriedades que distinguem os feixes laser dos restantes feixes de radiação, nomeadamente o facto de se apresentarem: coerentes, monocromáticos e colimados.

- **Coerência**

Coerência é o termo utilizado para descrever a existência de uma relação de fase entre duas ondas ou entre dois pontos distintos da mesma onda. A coerência está intimamente relacionada com a possibilidade de ondas luminosas exibirem, ou não, efeitos de interferência. A radiação é caracterizada como coerente se existir uma relação de fase fixa entre valores do campo elétrico, em diferentes localizações e/ou instantes. Assim sendo, a coerência é um fenômeno dependente do espaço e/ou do tempo, por isso pode ser classificada como espacial ou temporal, respectivamente (Kannatey-Asibu 2009).

A coerência espacial (ou lateral) significa que existe uma forte relação de fase entre os campos elétricos e magnéticos em qualquer posição da secção transversal do feixe, sendo esta relação independente do tempo (Moreira 2017). É por isso um requisito essencial para garantir a direcionabilidade do feixe laser (Maddaloni, Bellini e De Natale 2016).

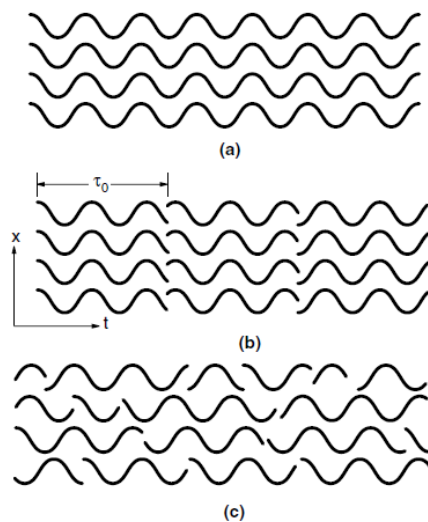


Figura 7 - (a): Coerência perfeita; (b): Feixe com coerência espacial e com coerência temporal τ_0 ; (c): Feixe incoerente (Kannatey-Asibu 2009).

A coerência temporal refere-se à situação onde as diferenças entre a frente de onda num instante t e a frente de onda num instante $t + \tau_0$, mantêm-se constantes (Kannatey-Asibu 2009). Nesse caso, é dito que a onda apresenta coerência temporal de τ_0 , tal como indicado na Figura 7 (b). Este tipo de coerência determina a capacidade do feixe se manter numa única frequência (monocromático), como também possibilita a previsão da fase da onda numa dada posição do feixe (Moreira 2017). A coerência de um feixe laser é conseguida quando os fótons estimulados estão em fase com os fótons que os estimulam (Moreira 2017).

- **Monocromatismo**

Um feixe luminoso é monocromático se apresentar um único comprimento de onda. Embora nenhum feixe luminoso seja perfeitamente monocromático, os lasers combinam uma largura de banda reduzida e por isso são considerados monocromáticos. A largura de banda depende do tipo de laser, podendo ir desde $\Delta \lambda = 10 - 11 \mu\text{m}$ ($\Delta \nu = 500 \text{ Hz}$) para lasers a gás de alta qualidade com $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$, até $\Delta \lambda = 6 - 10 \mu\text{m}$ ($\Delta \nu = 1 \text{ GHz}$) para lasers de estado sólido. Comparado os lasers com lâmpadas convencionais, pode ser aferido pela representação esquemática da Figura 8, que a largura de banda das lâmpadas é bastante vasta, na ordem dos

Giga Hertz. Quanto mais monocromático for o feixe laser, ou seja, quanto menor a largura de banda, maior será a sua capacidade de focagem (Kannatey-Asibu 2009).

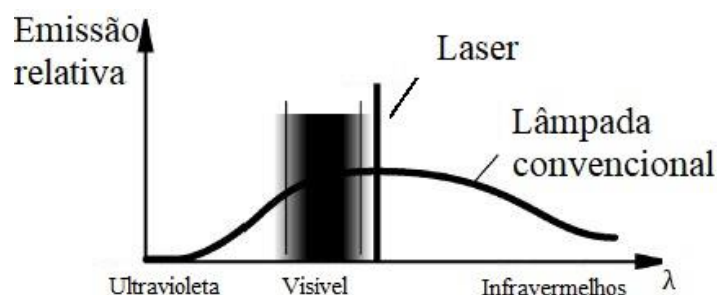


Figura 8 - Comparação entre a largura de banda de uma lâmpada convencional e de uma fonte laser. Adaptado de (Kannatey-Asibu 2009).

- **Colimação**

A radiação gerada por uma fonte luminosa comum é uniformemente radiada em todas as direções. Um feixe laser é caracterizado por ser pouco divergente, ou seja, existe um aumento da secção transversal do feixe à medida a que se afasta da fonte, contudo este aumento é reduzido – ângulo de divergência (θ_d) na ordem dos miliradianos (Figura 9) (Hitz, Ewing e Hecht 2012; Kannatey-Asibu 2009). Tal é explicado pela colimação, que é um atributo dos feixes lasers, significando que as ondas e partículas que compõem o feixe propagam-se segundo direções praticamente paralelas.

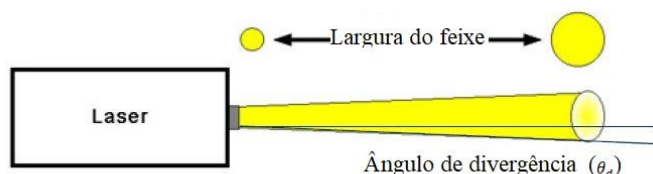


Figura 9 - Esquematização do ângulo de divergência (θ_d) de um feixe laser (Lasagni 2019).

O feixe laser resulta de sucessivas reflexões da luz no interior da cavidade de ressonância. Apenas os raios luminosos que estão devidamente alinhados com a linha central da cavidade é que são refletidos um número suficiente de vezes para que seja obtido um ganho satisfatório e, assim, serem transmitidos. Uma vez que apenas os raios bem alinhados é que contribuem para o feixe laser final, está justificada a elevada colimação/direccionalidade destes feixes luminosos (Hitz, Ewing e Hecht 2012).

2.1.2. Emissão laser

Pelos conceitos básicos da química, um átomo consiste num núcleo (composto por neutrões e prótons), que é rodeado por eletrões. Os prótons possuem carga positiva, os eletrões carga negativa e os neutrões são eletricamente neutros. A estrutura atômica na sua forma mais simplista pode ser explicada através do modelo de Bohr, no qual os eletrões se movimentam em torno do núcleo segundo orbitas circulares de raio específico, correspondendo cada orbita a níveis discretos de energia. A orbita de menor raio é a que corresponde ao nível de energia mais baixo, nível designado por estado fundamental. As orbitas de raios superiores apresentam níveis mais elevados de energia, sendo estes níveis múltiplos inteiros da energia do estado fundamental (Kannatey-Asibu 2009).

Sob condições específicas, os eletrões podem transitar para orbitas de nível de energia superior ou inferior. Esses fenómenos são designados por transições atômicas, durante os quais ocorre a absorção ou emissão de energia por parte dos átomos.

2.1.2.1. Transições atômicas

As transições atômicas acontecem quando os eletrões de um átomo mudam de orbita. A maioria dos feixes laser são gerados pela variação da energia dos eletrões que compõem o meio de ganho, quando estes transitam entre níveis de energia discretos de um átomo (Silfvast 2003). Para que as transições ocorram, pode ser necessária uma fonte de energia externa. Existem três tipos de transições: absorção estimulada, emissão espontânea e emissão estimulada. De forma a explicar cada uma dessas transições, seja agora considerado um átomo com apenas dois níveis de energia.

- **Absorção estimulada**

Se os eletrões de um átomo estão no seu nível de energia mais baixo E_1 , designado por estado fundamental, estes eletrões podem ser excitados/estimulados através de radiação proveniente do exterior. Caso esta radiação seja constituída por fotões com energia ($E = h \cdot \nu$), igual à diferença de energia entre os dois níveis $\Delta E = E_2 - E_1$, quando incide sob os eletrões que se encontram no estado fundamental, estes transitarão para o nível mais elevado de energia (E_2), tal como indica a Figura 10 (Carvalho 2007).

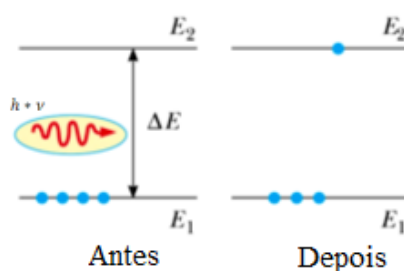


Figura 10 - Absorção estimulada entre dois níveis de energia. Adaptado de (Lasagni 2019).

Uma vez que alguns eletrões do átomo estão, agora, num nível superior de energia, estes podem fazer uma transição subsequente para o nível mais baixo, acompanhada com a emissão de radiação eletromagnética (Kannatey-Asibu 2009).

- **Emissão espontânea**

Tendo elétrons alocados no nível de energia superior, caso não sejam estimulados por qualquer radiação do exterior, estes têm tendência a regressar ao equilíbrio com o passar do tempo, ou seja, ao estado fundamental. A transição espontânea de um elétron do nível E_2 para o nível E_1 , é acompanhada com a emissão de um fóton de frequência proporcional à diferença de energia entre os dois níveis, como sugere a Figura 11. Contudo se os elétrons se apresentarem completamente estáveis no estado excitado, a emissão espontânea não ocorrerá (Kannatey-Asibu 2009).

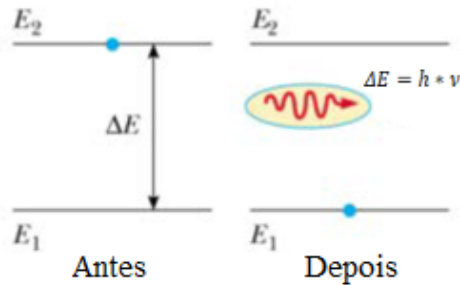


Figura 11 - Emissão espontânea entre dois níveis de energia. Adaptado de (Lasagni 2019).

Os fótons transmitidos pela emissão espontânea são independentes entre si e, por isso, não estão em fase, nem existe qualquer relação direcional entre eles. Como consequência, estes fótons não contribuem para o desenvolvimento de um feixe laser (Kannatey-Asibu 2009).

- **Emissão estimulada**

Os elétrons alojados no nível de energia superior, podem ser estimulados por radiação proveniente de uma fonte externa, resultando na sua transição para o nível com energia inferior. Esta transição só ocorrerá caso o fóton incidente se apresente com energia igual à diferença energética entre os dois níveis, emitindo deste modo um fóton com essa mesma energia, como sugerido pela Figura 12 (Carvalho 2007).

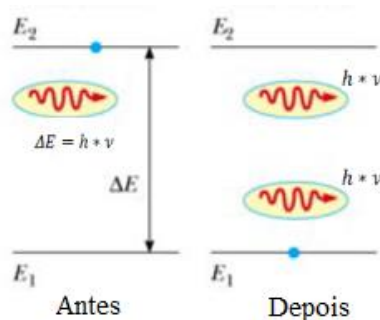


Figura 12 - Emissão estimulada entre dois níveis de energia. Adaptado de (Lasagni 2019).

Os fótons emitidos a partir desta transição, sobrepõem-se aos fótons incidentes, reforçando/amplificando a radiação proveniente da fonte externa. Tanto os fótons emitidos, como os fótons incidentes, têm a mesma frequência, direção, estado de polarização e estão em fase, o que resulta num elevado grau de coerência (Kannatey-Asibu 2009). Se a emissão

estimulada for predominante face aos outros dois tipos de transição, poderá desenvolver-se a reação em cadeia, ou seja, a partir de um único fóton é possível gerar muitos, tal como indica a Figura 13.

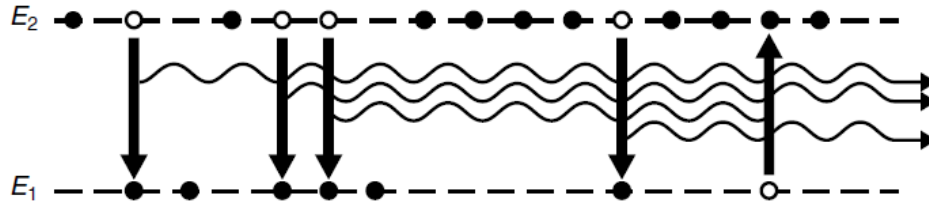


Figura 13 - Emissão estimulada - Reação em cadeia (Kannatey-Asibu 2009).

2.1.2.2. Inversão da população

Em condições de equilíbrio térmico, os níveis mais baixos de energia são os mais populosos. O conceito de população refere-se ao número de átomos, moléculas ou iões alocados em determinado nível de energia. É designado por E_n e N_n , a energia e a população por unidade de volume no nível n , respetivamente. Em condições de equilíbrio térmico e assumindo que não existem níveis de energia degenerados (níveis com a mesma energia), a distribuição da população é dada pela lei de Boltzmann. Tendo como exemplo os dois primeiros níveis de energia, a lei de Boltzmann é descrita pela **Equação 2.2** (Lasagni 2019).

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{-(E_2-E_1)}{k_B \cdot T}} = e^{\frac{-(h \cdot \nu)}{k_B \cdot T}} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde k_B é a constante de Stefan Boltzmann ($k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) e T a temperatura do sistema. Em equilíbrio térmico o estado fundamental é mantido como o mais povoado. A absorção estimulada será predominante face à emissão estimulada e, assim, a intensidade do feixe atenua à medida que se propaga no meio, pois os fótons vão sendo absorvidos pelos átomos (Carvalho 2007).

Contudo para haver amplificação da radiação, uma condição necessária é a inversão da população, ou seja, um dos níveis de energia superior tem de alojar mais eletrões do que um dos níveis com menor energia. Pela lei de Boltzmann (**Equação 2.2**), a inversão da população não é conseguida em equilíbrio térmico. Para que tal seja possível, é necessário excitar ou bombear os átomos para um estado de não equilíbrio, através de uma fonte de bombeamento externa. Uma vez que os átomos tendem a regressar ao estado de equilíbrio com o passar do tempo, é necessário manter a fonte de bombeamento ativa para que o sistema se mantenha no estado de não equilíbrio (Kannatey-Asibu 2009).

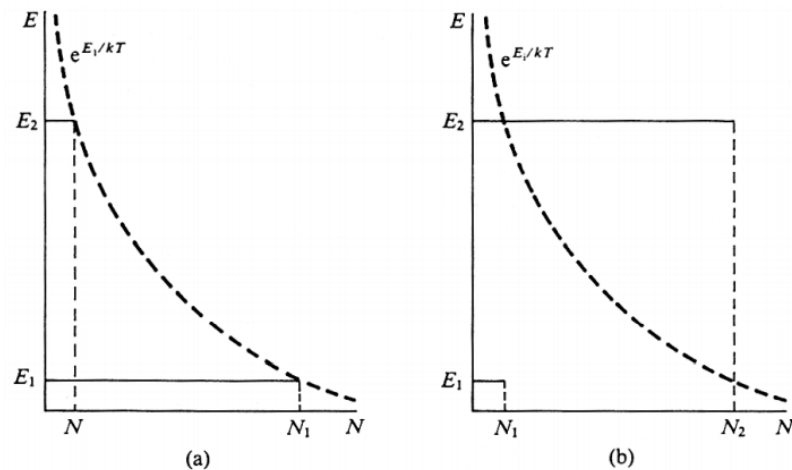


Figura 14 - Distribuição da população (Chapman 2008). (a) - Em equilíbrio térmico. (b) - População invertida.

O material onde a inversão de população é induzida designa-se por meio ativo ou meio de ganho. Os diferentes tipos de lasers distinguem-se principalmente pelo meio ativo, ou seja, pelo material que o constitui e pelo seu estado físico. Geralmente os meios ativos apresentam três ou quatro níveis de energia (Hitz, Ewing e Hecht 2012). Em materiais com apenas dois níveis de energia não é possível ser obtida a inversão de população, uma vez que os átomos deixam de realizar a absorção assim que a população do nível superior iguala a população do estado fundamental (Kannatey-Asibu 2009).

2.1.3. Componentes e princípio de funcionamento da fonte laser

Os principais componentes de uma fonte geradora de radiação laser são: a cavidade de ressonância, o meio de ganho e a fonte de bombeamento. Esses componentes são ilustrados na Figura 15.

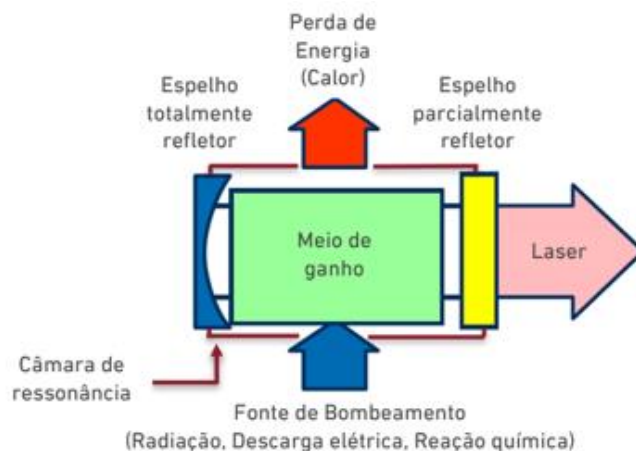


Figura 15 – Representação esquemática dos principais componentes de uma fonte de radiação laser. Adaptado de (Lasagni 2019).

- **Meio de ganho/Meio ativo:** é o material no qual os níveis de energia são conhecidos e ocupados de forma arbitrada, com intuito de ser obtida a inversão de população (Moreira 2017). Os lasers são designados de acordo com o seu meio de ganho, que se pode apresentar segundo diferentes estados físicos: sólido, líquido e gasoso.
- **Fonte de bombeamento:** é responsável pela inversão de população no meio de ganho. Visto que os átomos tendem em regressar ao estado de equilíbrio, a fonte de bombeamento fornece energia suficiente ao sistema para garantir que o estado de desequilíbrio seja mantido. O meio de bombeamento pode ser uma fonte de radiação (lâmpada flash, laser de díodos), uma descarga elétrica ou até uma reação química. As duas configurações mais comuns para o bombeamento por radiação são: o bombeamento longitudinal – realizado a partir de um dos topos do meio ativo – e o bombeamento transversal – efetuado radialmente através das faces laterais do meio ativo (Kannatey-Asibu 2009). Na Figura 16 são apresentados estes dois tipos de configuração.

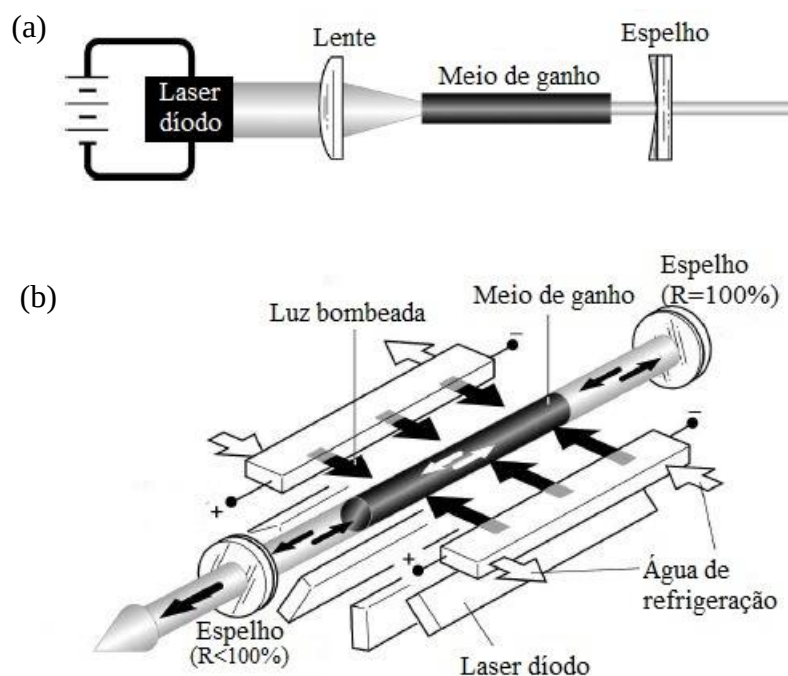


Figura 16 – Configurações comuns para o bombeamento por radiação: (a) - Bombeamento longitudinal; (b) - Bombeamento transversal. Adaptado de (Kannatey-Asibu 2009).

- **Cavidade de ressonância:** é geralmente constituída por dois espelhos situados em ambas as extremidades do meio de ganho. Os fótons resultantes da emissão estimulada, são refletidos pelos espelhos e obrigados a passagens sucessivas pelo meio de ganho, estimulando mais emissões a cada passagem e aumentando, desse modo, a intensidade do feixe resultante (Hitz, Ewing e Hecht 2012). Na maioria dos casos, é colocado um espelho totalmente refletor numa das extremidades e outro parcialmente refletor na outra. Tanto a forma dos espelhos (por exemplo: paralelos, côncavos...), a sua separação, como o formato do meio de ganho, têm influência sob os modos espaciais do feixe (Kannatey-Asibu 2009; Faro 2006). O espelho parcialmente refletor permite a transmissão de um feixe com um comprimento de onda específico, o feixe laser (Moreira 2017). A cavidade de ressonância não é obrigatória em todos os tipos de laser, como é o caso de alguns lasers de azoto, que devido ao imenso ganho numa única passagem (cerca de 10^9 fótons), dispensam as sucessivas reflexões (Hitz, Ewing e Hecht 2012).

O princípio de funcionamento de uma fonte de radiação laser é apresentado esquematicamente na Figura 17. Inicialmente, o meio de ganho está em equilíbrio térmico e, assim, os átomos que o constituem encontram-se no seu estado fundamental. Quando é fornecida energia por parte da fonte de bombeamento, os elétrons que estão estáveis começam a migrar para níveis com energia superior. Assim, alguns átomos do meio de ganho são excitados e a sua população é invertida.

Numa fase inicial, estes elétrons tendem a decair naturalmente para o estado fundamental e emissão espontânea é predominante face à estimulada. Contudo, com o aumento sucessivo dos fótons emitidos pelos átomos do meio, a emissão estimulada começa a crescer até ser obtido um feixe luminoso coerente, colimado e altamente monocromático, o feixe laser.

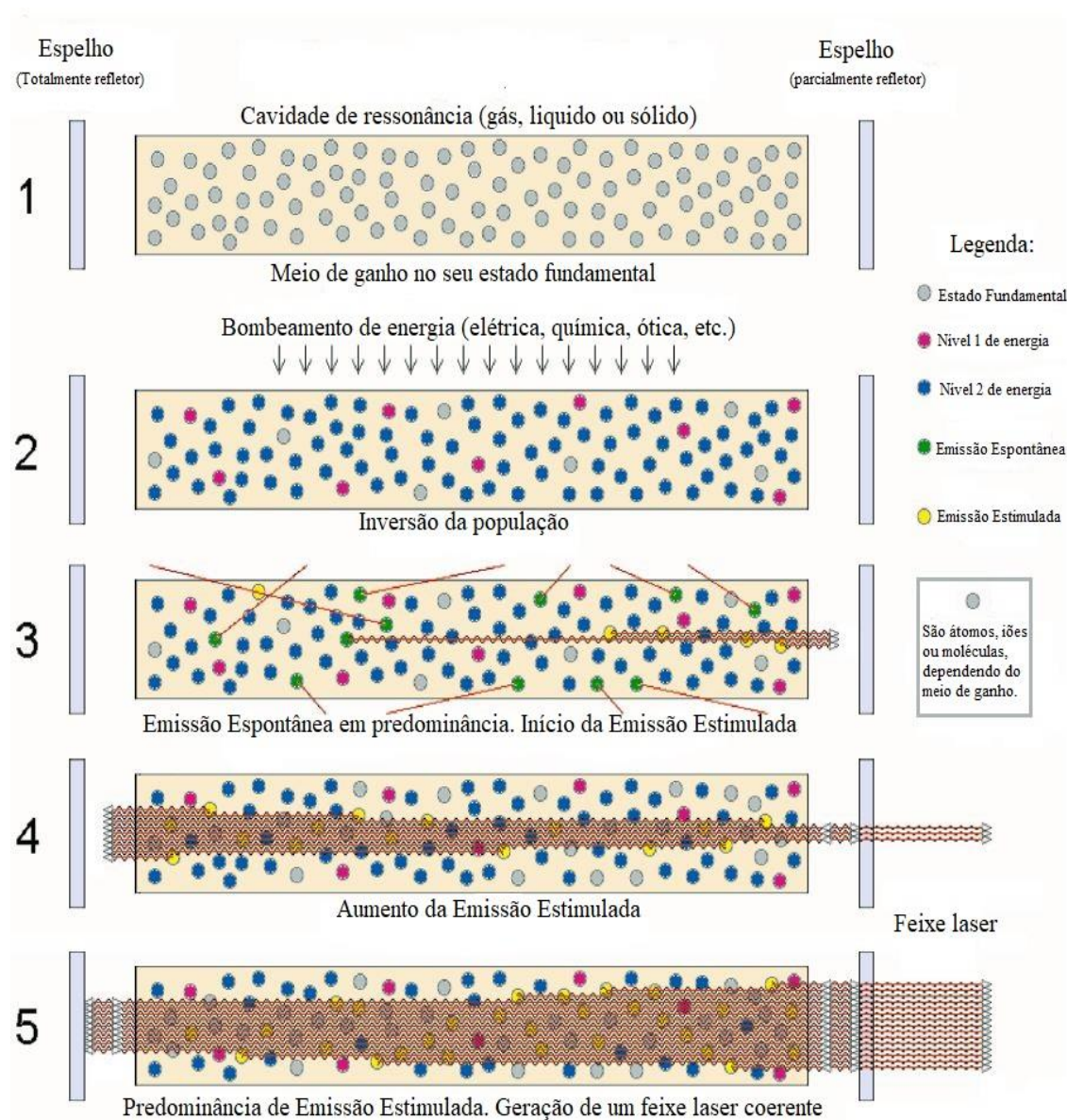


Figura 17 - Princípio de funcionamento de uma fonte geradora de radiação laser. Adaptado de (Pocorni 2017).

2.1.4. Tipos de fontes laser

A tecnologia laser é hoje utilizada em diversos setores, nomeadamente: em aplicações industriais como o processamento de materiais, controlo de qualidade, metrologia, em aplicações no âmbito da medicina, de ferramentas militares, telecomunicações, processamento de informação, entre outras. Existem disponíveis no mercado fontes laser com diferentes materiais aplicados ao meio de ganho, sendo que cada uma delas gera radiação com características distintas, tornando os lasers uma ferramenta versátil e por isso aplicada em diversos setores.

Os lasers são classificados de acordo com o estado físico do material que compõe o meio de ganho, existindo lasers de estado sólido, lasers a gás e lasers em que o meio de ganho está no estado líquido (laser de corantes). Todos eles podem ser classificados de acordo com o comprimento de onda, potência, modo temporal em que operam (pulsado, contínuo), modo espacial, tipo de fonte de bombeamento, etc. De seguida serão abordados os princípios de funcionamento dos tipos de laser mais utilizados para processos de corte de materiais, nomeadamente os lasers a gás e os lasers de estado sólido.

- **Laser a gás**

Nas fontes laser a gás a radiação laser é, na maioria dos casos, gerada pela aplicação de uma tensão entre dois elétrodos localizados nas extremidades do meio de ganho. O meio consiste num tubo cilíndrico contendo espécies atômicas sob forma de um gás a baixa pressão ou mesmo uma mistura de gases. Quando a tensão é aplicada aos elétrodos, uma descarga elétrica é conduzida no seio do meio gasoso, resultando numa corrente elétrica que se propaga ao longo do tubo. Esta corrente é estabelecida pela ionização dos átomos do meio libertando eletrões que se deslocam do cátodo para o ânodo. Estes eletrões possuem elevada energia e colidem com os restantes átomos do meio, excitando-os de forma a que seja conseguida a inversão da população e a emissão estimulada predomine (Silfvast 2004). Os parâmetros típicos de algumas fontes laser a gás comuns, são apresentados na Tabela 1.

Os lasers CO₂ são os lasers a gás mais utilizados para corte de materiais, uma vez que garantem a boa qualidade do feixe laser, mesmo em elevadas potências, tornando-se uma ferramenta útil para o processo, pois viabilizam a concentração da energia numa macha de área reduzida (Wandera 2016). A configuração dos lasers CO₂ mais comercializados para fins de corte de materiais, é apresentada na Figura 18 e é designada por configuração *Slab*, com potências que podem atingir os 8 kW. A cavidade de ressonância é composta por dois elétrodos de cobre planos, dispostos paralelamente e afastados 1-2 mm, entre os quais se encontra o gás. Os elétrodos excitam o meio por radiofrequência, mantendo o gás no estado de plasma estável. A radiação vai sendo refletida entre os espelhos da cavidade, até adquirir o ganho suficiente para ser transmitida pela janela de diamante. O feixe é depois encaminhado para um filtro espacial sendo direcionado por sucessivas reflexões através de espelhos devidamente alinhados, resultando num feixe laser de elevada qualidade à saída da fonte (Coherent 2019; Tinoco 2011).

Tabela 1 -Propriedades típicas de fontes laser a gás (Silfvast 2004).

Meio de ganho	Comprimento de onda [nm]	Potência	Modo temporal	Bombeamento	Aplicações comuns
CO ₂	9400-10600	1-10.000 [W]	Contínuo ou pulsado	Descarga elétrica	Processamento de materiais (Corte, Marcação, soldadura, tratamentos térmicos, etc.), Aplicações médicas e militares, Telecomunicações.
He-Ne	534.5-632.8	0.5-100 [mW]	Contínuo	Descarga elétrica	Interferometria, Impressão a laser, Leitor de código de barras, Apontadores.
Exímero	351 (XeF); 308 (XeCl); 248 (KrF); 193 (ArF)	1 [J/pulso]	Pulsado	Descarga elétrica	Processamento de materiais, Aplicações médicas, Fotolitografia, Fonte de bombeamento de lasers
Argon-Ion	488-514.5	0.1-50 [W]	Contínuo	Descarga elétrica	Fototerapia do olho, Fonte de bombeamento de lasers, Estereolitografia
Vapor de cobre	510.5-578.2	1 [MW/pulso]	Pulsado	Descarga elétrica	Fonte de bombeamento de lasers, Fotografia com flash a alta velocidade, Projeção ecrãs

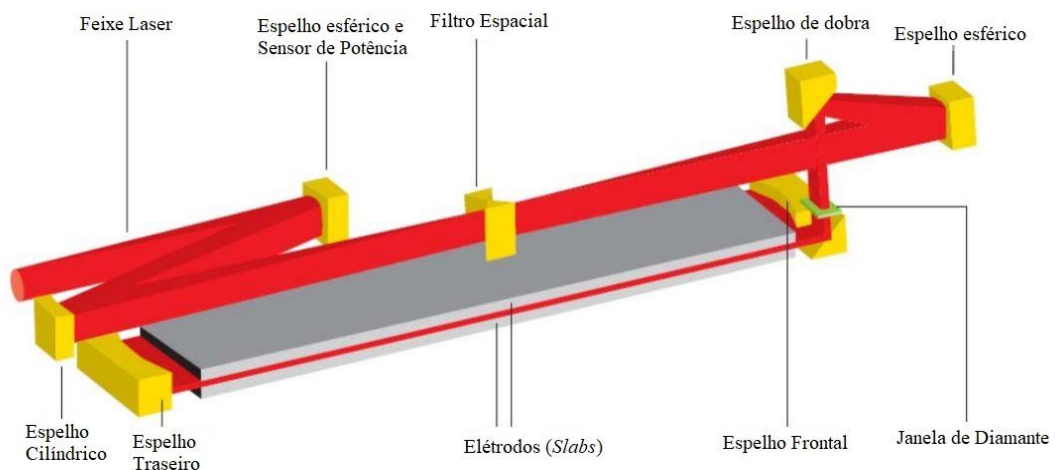


Figura 18 - Laser CO₂, configuração *Slab* (Coherent 2019).

- **Laser de estado sólido**

Os lasers de estado sólido são assim designados pois apresentam como meio de ganho um material base, no estado sólido e transparente ao comprimento de onda da radiação do laser, tipicamente cristais ou vidro. Este material base é dopado com íons de metais de transição ou de terras raras, que são a espécie ativa. Como material base, são tipicamente utilizados cristais de granada de ítrio e alumínio ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), cristais óxido de alumínio (Al_2O_3), vidro, entre outros. Como dopante são geralmente utilizados íons de: Neodímio, Crómio, Itérbio, Érbio, Titânio. Os lasers são designados tendo em conta o material base e o respetivo dopante, por exemplo, um laser Nd:YAG, tem como meio de ganho um cristal de granada de ítrio e alumínio (YAG - *Yttrium Aluminium Garnet*) e é dopado com íons de Neodímio (Nd) (Silfvast 2004; Silfvast 2003). Na Tabela 2 são apresentadas as características típicas de lasers de estado sólido e respetivas aplicações.

Os lasers de estado sólido, na maioria dos casos, utilizam fontes de radiação como fonte de bombeamento, nomeadamente lâmpadas flash ou outras fontes laser. A radiação emitida pelas lâmpadas flash, apenas consegue ser eficientemente absorvida pelos íons dopantes se estes apresentarem uma larga banda de absorção. Por outro lado, os lasers de díodos, que são lasers semicondutores, permitem realizar o bombeamento de radiação em comprimentos de onda específicos, garantindo menos desperdício de energia.

Tabela 2 - Propriedades típicas de fontes laser de estado sólido (Silfvast 2004).

Laser	Comprimento de onda [nm]	Potência	Modo temporal	Bombeamento	Aplicações comuns
Nd:YAG	1064	1– 10.000 [J/pulso]	Pulsado	Lâmpada flash ou Laser de díodos	Processamento de materiais (Corte, Marcação, soldadura, furação, tratamentos térmicos, etc.), Aplicações médicas e militares.
Nd:glass	1054-1062				
Yb:YAG	1030	>100 [W]	Contínuo ou Pulsado	Laser de díodos	
Rubi	694.3	< 100 [J/pulso]	Pulsado	Lâmpada flash	Holografia, Remoção de tatuagens.
Nd:YVO₄	1064.3	5 [W]	Contínuo ou pulsado	Laser de díodos	Estereolitografia, Impressão de placas de circuitos eletrónicos (PCB).

O meio de ganho dos lasers de estado sólido pode apresentar-se, quer como um material em bruto - por exemplo, como cristais sob a forma de varão (Figura 16) ou disco - quer como fibra ótica. Os lasers em bruto mais utilizados para processamento de materiais, nomeadamente no corte, são os lasers Nd:YAG e Yb:YAG. Em comparação com os lasers CO_2 , têm a vantagem de não necessitarem de gás lasante e possibilitarem a entrega do feixe por fibra ótica, dispensando a necessidade de alinhamento dos espelhos guia à saída da cavidade de ressonância (Figura 18). Além disso, os comprimentos de onda da radiação destes lasers é na ordem dos 1-2 μm , cerca de 10 vezes inferior aos da radiação dos lasers CO_2 , sendo por isso menos refletida e mais absorvida pela maioria dos metais (Berkmanns e Faerber 2008b). Contudo, os lasers em bruto são mais caros e mais instáveis devido à não uniformidade térmica do meio de ganho

durante o seu funcionamento, contribuindo para uma pior qualidade de feixe, face aos lasers CO₂ (Heston 2010).

Os lasers de fibra são também lasers de estado sólido, contudo são geralmente tratados em separado devido às diferentes características de guiamento da radiação. Estes têm como meio de ganho fibra ótica, que consiste numa fibra de vidro revestida por duas camadas. A fibra no núcleo é dopada com iões de terras raras, nomeadamente: Érbio (Er³⁺), Neodímio (Nd³⁺), Itérbio (Yb³⁺), Túlio (Tm³⁺) ou Praseodímio (Pr³⁺). O dopante mais comum nos lasers de fibra utilizados para o corte de materiais é o itérbio, em que é gerado um feixe de elevada potência (até os 10 kW), com um comprimento de onda compreendido entre 1.06-1.08 µm (Wandera 2016).

O índice de refração (n) dos materiais que compõem a fibra ótica diminui desde o núcleo até ao exterior, sendo mais elevado no núcleo seguindo-se a camada de revestimento interior e, por último, a camada exterior (Figura 19). Como fonte de bombeamento são geralmente utilizados lasers de díodos que são acoplados ao meio de ganho, também por cabos de fibra ótica (Montiel i Ponsoda 2013).

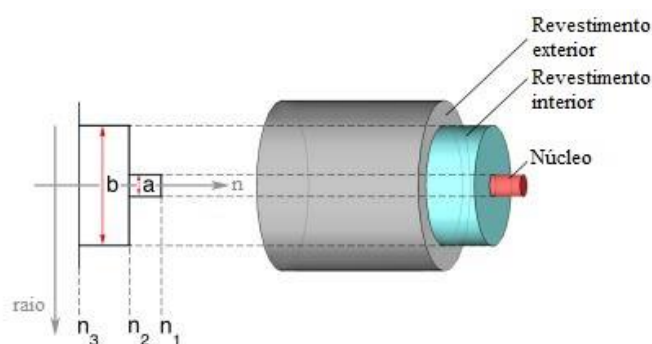


Figura 19 - Fibra ótica com duplo revestimento. Perfil dos índices de refração (n) da secção transversal da fibra (Montiel i Ponsoda 2013).

A diferença entre os índices de refração, garante que a radiação bombeada pelos lasers de díodos é confinada ao interior da fibra, refletindo e propagando-se ao longo de todo o seu comprimento. Como consequência a radiação bombeada vai estimulando os iões dopantes, de forma que se inicie a emissão da radiação laser, que é guiada pelo núcleo até que se atinja o ganho requerido (Figura 20).

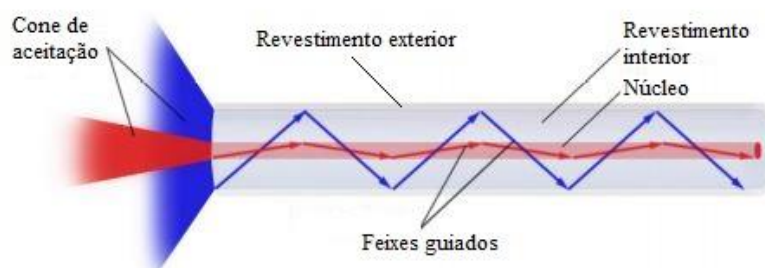


Figura 20 - Propagação da radiação no interior da fibra ótica de duplo revestimento (Montiel i Ponsoda 2013).

Para formar a cavidade de ressonância, nas extremidades do meio de ganho, são utilizados FBG's (*Fiber Bragg Grating*), que têm função semelhante à dos espelhos que formam as

cavidades de ressonância convencionais, ou seja, apenas irão refletir comprimentos de onda específicos sendo os restantes transmitidos. Os FBG's consistem num curto segmento de fibra ótica com variação periódica do índice refrativo na direção longitudinal que “filtram” radiação a um comprimento de onda específico e definem assim o comprimento de onda da radiação do laser em questão (Fujikura 2016). A configuração comum de um sistema de laser de fibra é apresentada na Figura 21.

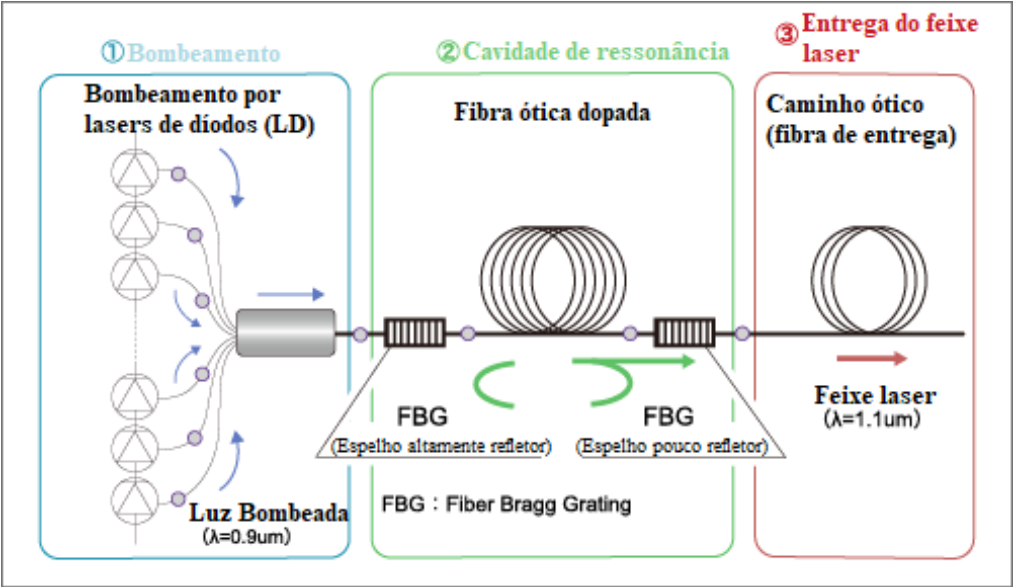


Figura 21 - Configuração de um sistema de laser de fibra. Adaptado de (Fujikura 2016).

Os lasers de fibra dominam o mercado dos lasers de estado sólido utilizados para o corte de materiais. Em comparação com os lasers em bruto de elevada potência, os lasers de fibra possibilitam uma distribuição de calor mais uniforme ao longo de todo o meio de ganho e assim garantem superior qualidade de feixe para elevadas potências. Além disso, os lasers de fibra são também uma solução compacta, de baixo custo de aquisição, necessitam pouca manutenção e têm elevada eficiência, tornando-os por isso atrativos para a indústria (Wandera 2016). Na Tabela 3 é apresentada uma comparação qualitativa entre os tipos de fonte laser mais utilizados para o corte de materiais.

Tabela 3 - Comparação qualitativa entre os tipos de laser mais utilizados para o corte de materiais (Jensen e Petersen 2012).

	Potência	Qualidade do feixe	Eficiência	Manutenção	Pegada ecológica	Custo de aquisição
Melhor Pior						
Laser de Fibra						
Laser CO ₂						
Nd:YAG Bombeamento por lâmpada flash						
Nd:YAG Bombeamento por laser de diodos						
Yb:YAG Laser de disco						

2.2. Tecnologia de corte a laser

Os lasers têm sido reconhecidos como fiáveis e eficientes ferramentas desde o seu surgimento na década de 60. Como aplicações industriais mais comuns para processar materiais, os lasers são empregues: na furação, na soldadura, no corte, em processos de fabrico aditivo, em tratamentos térmicos, na sinterização e na marcação (Gadallah e Abdu 2015). O feixe laser pode ser focado através de uma lente que o concentra numa reduzida mancha com elevada intensidade de energia térmica, tornando-se assim uma fonte de calor útil para os processos mencionados. A capacidade do feixe focado atingir elevadas densidades de potência, muitas vezes superiores a 10^6 W/cm^2 , quando direcionado para um material, fará com que a sua temperatura se eleve e ocorra a fusão, evaporação ou decomposição (Havrilla e Anthony 1999). No processo de corte a laser de metais, o corte é descrito por 4 etapas (Pocorni 2017):

1. O feixe é focado num ponto de área reduzida e com elevada intensidade;
2. O feixe aquece o material, formando uma pequena poça de fusão.
3. O material é expulso/ejetado da frente de corte por um gás pressurizado, direcionado coaxialmente ao feixe laser
4. O feixe movimenta-se em relação à superfície do material e com ele move-se a poça de fusão, formando a fenda de corte.

Em operações de corte a laser onde o corte é começado no interior da superfície do material, inicialmente é realizado um furo (“*piercing*”) que atravessa a totalidade da espessura, possibilitando a expulsão do material fundido da frente de corte. Posteriormente, este furo propaga-se formando a fenda, consequência do movimento relativo entre o material e o feixe (Figura 22 (b)). Caso o corte seja iniciado por uma das extremidades do material a cortar, não há necessidade de ser realizado o “*piercing*”, uma vez que o material é facilmente expulso pela superfície lateral (Figura 22 (a)). O material fundido não é simplesmente ejetado pela fenda/furo por ação da gravidade, sendo por isso direcionado à frente de corte, um gás de assistência a elevada pressão (Faro 2006; Steen e Mazumder 2010).

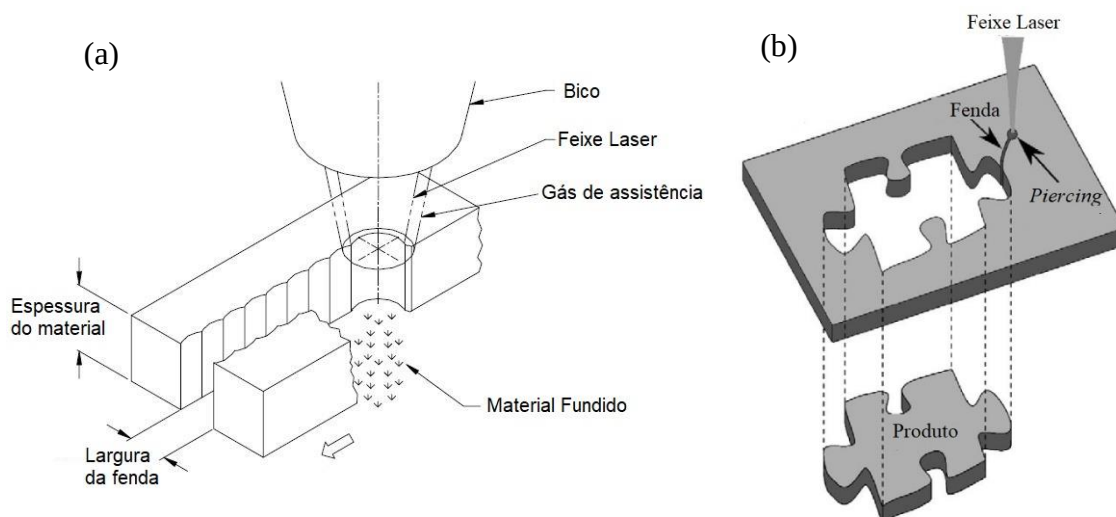


Figura 22 – Representação esquemática do processo de corte a laser. Adaptado de (Havrilla e Anthony 1999; Pocorni 2017).

O gás é direcionado através do bico e tem como principal função o auxiliar a expulsão do material através de forças de corte provocadas pelo arrasto do gás a elevadas pressões e velocidades. No corte a laser de metais, os gases utilizados podem ser divididos entre reativos e inertes. No caso de serem utilizados gases reativos, o gás de assistência reage quimicamente com o metal libertando calor. Isto torna processo mais “agressivo” e veloz, já que existe uma fonte de energia adicional. No entanto, a sua utilização só é aconselhada para alguns materiais, pois pode comprometer a qualidade de corte (Wandera 2006).

Posto isto, o corte a laser pode ser considerado um processo de natureza térmica no qual não existe contacto mecânico entre a ferramenta de corte e o material (Havrilla e Anthony 1999). Assim, os fenómenos físicos que governam o processo dependem principalmente das propriedades térmicas e óticas do material, como também das características do feixe laser e do gás de assistência utilizado (Genna et al. 2020).

2.2.1. Mecanismos de corte a laser

O corte a laser pode ser classificado de acordo com os mecanismos envolvidos na modificação do material. De acordo com Ion (2005), existem 5 mecanismos distintos: o corte por fusão, o corte por fusão reativa, o corte por vaporização, a degradação química e o *Scribing*.

Na maior parte dos casos, existe mais do que um mecanismo presente em simultâneo, contudo pode ser identificado o mecanismo predominante. Esse mecanismo depende do material a ser cortado, do tipo de gás de assistência utilizado e do tipo de laser (Ion 2005). Na Tabela 4 são apresentados os mecanismos aplicáveis aos diferentes materiais utilizados no processo de corte a laser.

Tabela 4 - Mecanismos de corte a laser para diferentes materiais (os mecanismos aplicáveis são indicados por ✓). Adaptado de (Ion 2005; Wandera 2006).

Material	Corte por fusão	Corte por fusão reativa	Corte por vaporização	Degradação química	<i>Scribing</i>
Metais	✓	✓	✓	-	-
Polímeros	✓ (termoplásticos)	✓ (termoendurecíveis)	✓ (PMMA)	✓ (termoplásticos)	-
Cerâmicos	✓	-	-	-	✓
Vidros	✓	-	-	-	✓
Elastómeros	-	-	-	✓	-
Compósitos	✓	-	-	✓ (madeiras)	✓

- **Corte por fusão**

O corte por fusão consiste na elevação da temperatura do material até uma temperatura superior à sua temperatura de fusão. Na presença deste mecanismo, o gás de assistência é totalmente ou parcialmente inerte, auxiliando apenas a devida ejeção do material fundido e, por isso, a energia empregue na fusão do material é exclusivamente proveniente do feixe laser (Eltawahni 2011; Kannatey-Asibu 2009). A absorção da radiação laser provoca a fusão do substrato e pressões de gás superiores a 10 bar são geralmente empregues para ejetar eficazmente o material, que tem tendência a permanecer no interior da fenda ou a aderir à aresta inferior do corte, solidificando como escória (Ready 1997).

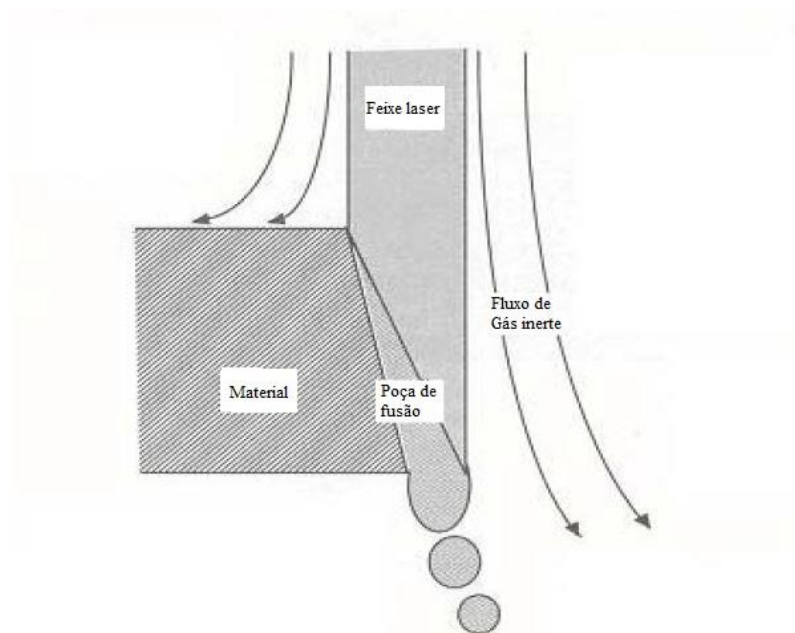


Figura 23 - Mecanismo de corte por fusão (Wandera 2006).

Quando a reação química entre o gás e o material é intolerada – no caso dos metais, a reação de oxidação – a utilização de azoto é uma solução viável, pois embora não seja um gás totalmente inerte, reage pouco com o material a cortar e protege-o da atmosfera envolvente. Árgon e Hélio são também utilizados e por serem mais inertes que o azoto, embora de valor acrescido, justificam a sua utilização no corte de materiais mais reativos, como o titânio (Ion 2005). Este mecanismo apresenta a vantagem de possibilitar superfícies de corte livres de óxidos e com a mesma resistência à corrosão do material do substrato (Eltawahni 2011; Wandera 2006). É um mecanismo adequado para o corte de materiais que fundem rapidamente quando aquecidos pelo feixe laser, como os metais e suas ligas, polímeros termoplásticos (ABS, PE, PP, Nylon), cerâmicos e também materiais compósitos de matriz polimérica (Ion 2005).

- **Corte por fusão reativa**

O corte por fusão reativa é assim designado devido ao tipo de gás de assistência utilizado e à sua interação com o material. Este mecanismo é maioritariamente utilizado no corte de ligas ferrosas, como também em alguns polímeros termoendurecíveis (Ion 2005). Tipicamente é usado como gás de assistência o oxigénio, ou até mesmo o ar, que para além de promoverem a expulsão do material fundido pela fenda, introduzem uma fonte de energia suplementar ao processo. Essa energia adicional, resulta da reação exotérmica que ocorre devido à interação gás-material. Assim, mais calor é gerado na frente de corte, possibilitando que sejam atingidas velocidades de corte superiores às aquelas utilizadas quando o corte é realizado por assistência de gases inertes (Figura 25) (Faro 2006). Além disso, é formada uma camada de óxido em torno da poça de fusão (Figura 24), resultando na maioria dos casos, num aumento da absorção da radiação laser. A formação de óxidos poderá também reduzir a viscosidade e tensão superficial da poça, facilitando assim a sua expulsão do interior da fenda de corte (Wandera 2006). Por outro lado, haverá deposição de uma camada de óxido na superfície de corte, podendo comprometer a qualidade do corte realizado.

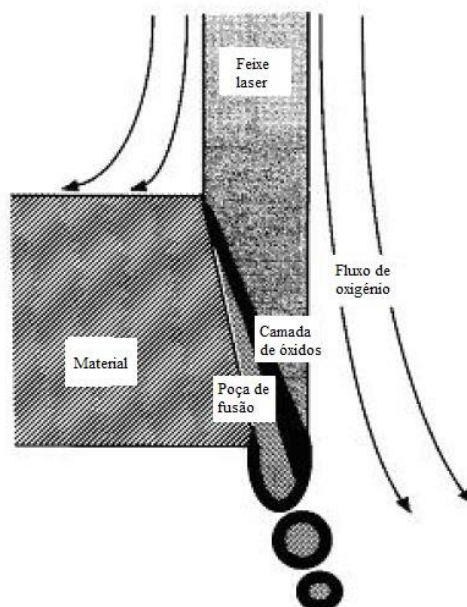


Figura 24 - Mecanismo de corte por fusão reativa (Wandera 2006).

A velocidade de corte máxima é função das propriedades térmicas do material. Para materiais com baixa temperatura de fusão e baixa condutividade térmica, as velocidades de corte não diferem muito caso seja usado um gás inerte ou reativo (Figura 25). Contudo no caso do titânio, da zircónia e do nióbio, a utilização de gases reativos aumenta significativamente a velocidade de corte, uma vez que a energia exotérmica associada a estes materiais é elevada (Kannatey-Asibu 2009). Estes materiais, embora possibilitem que sejam atingidas velocidades de corte mais elevadas, vêm a qualidade de corte comprometida, pois a energia térmica da reação exotérmica é de tal forma elevada que extrapola a região de corte, afetando o material do substrato. Por outro lado, apesar do alumínio libertar uma elevada quantidade de energia durante a reação exotérmica (Figura 25), a temperatura de fusão dos seus óxidos é superior à do metal, influenciando a velocidade máxima quando utilizado o mecanismo de corte por fusão reativa (Kannatey-Asibu 2009).

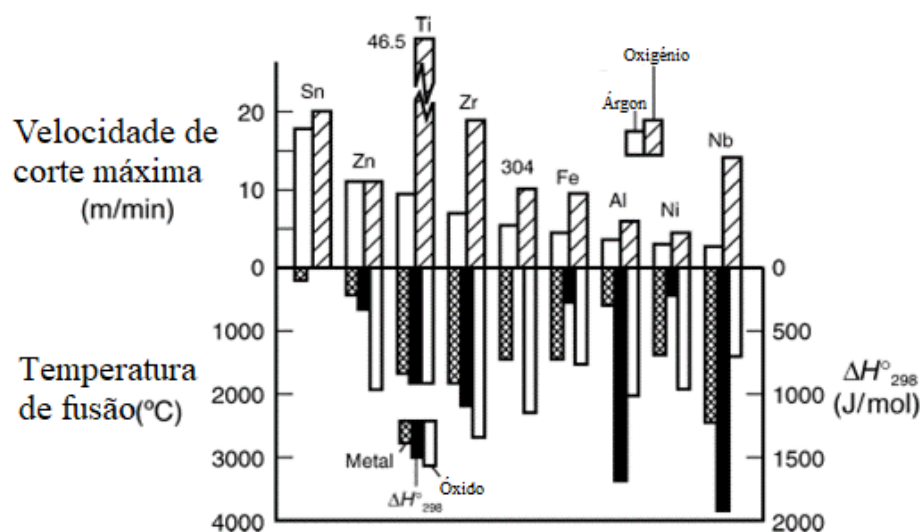


Figura 25 - Comparação entre a velocidade de corte máxima utilizando Oxigénio (gás ativo) e Árgon (gás inerte). Temperatura de fusão para diferentes metais e seus óxidos. Energia gerada durante as respetivas reações exotérmicas (ΔH°_{296}) (Kannatey-Asibu 2009).

Relativamente aos aços ao carbono, na maioria dos casos são utilizados gases de assistência reativos, pois a sua energia gerada pela reação exotérmica não é excessivamente elevada. Assim, a energia térmica é essencialmente limitada à zona de irradiação do feixe, garantindo superior qualidade de corte (Kannatey-Asibu 2009).

- **Corte por vaporização**

Neste mecanismo a elevada densidade de potência do feixe laser, eleva a temperatura do material até ao seu ponto de ebulição (Faro 2006). Atingida esta temperatura, o material é removido da superfície sob forma de vapor (Figura 26). Para ser possível a predominância da vaporização, o material terá de atingir a temperatura de ebulição antes que a transferência de calor por condução origine a poça de fusão (Ion 2005). O gás de assistência é direcionado à frente de corte de forma a expulsar o vapor e evitar que ocorra a condensação dos gases quentes no interior da fenda (Wandera 2006).

Este mecanismo é aplicado para o corte de materiais que não são facilmente fundidos como algumas madeiras e polímeros, utilizando lasers pulsados ou em lasers contínuos. Uma vez que a fusão de material é evitada, arestas de corte com excelente qualidade são obtidas, contudo no corte de metais as velocidades de corte são inferiores às dos restantes mecanismos (Ion 2005).

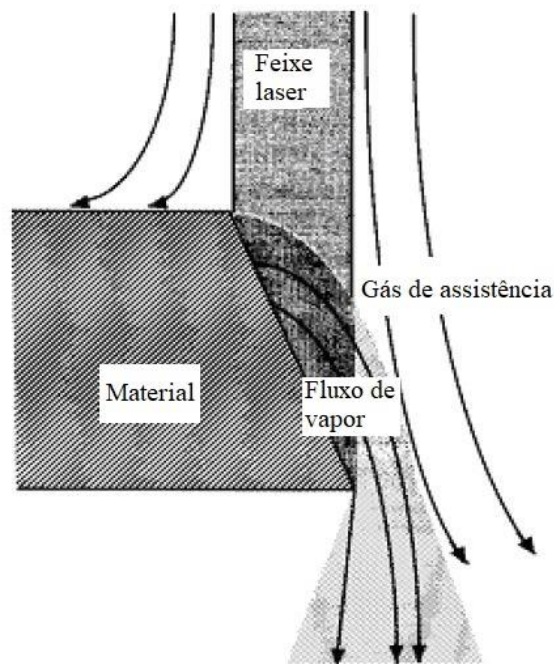


Figura 26 - Mecanismo de corte por vaporização (Wandera 2006).

- **Degradação química**

Neste mecanismo o feixe laser modifica a integridade do material através do rompimento das ligações químicas entre as moléculas que o compõem (Genna et al. 2020). É utilizado em materiais como a madeira, polímeros termoendurecíveis, elastômeros e alguns compósitos (Ion 2005). Por exemplo, ao cortar madeira este processo de degradação faz com que as grandes moléculas de celulose sejam reduzidas às suas partes constituintes, nomeadamente em carbono, vapor de água, entre outros (Powell 1998).

O corte por degradação química é em geral um processo lento, com temperaturas superiores à dos mecanismos abordados anteriormente, onde apenas estava envolvida uma única mudança de fase. A velocidade de corte é inferior à dos mecanismos de corte por fusão e a aresta de corte resultante apresenta-se plana e pouco rugosa, apesar de coberta com uma pequena camada residual de óxido (Powell 1998).

- **Scribing**

Neste mecanismo o feixe laser forma sulcos ou mesmo um conjunto de furos contínuos ao longo de uma geometria determinada. Estes acidentes geométricos induzem na sua proximidade concentrações de tensões e o corte é posteriormente conseguido por meios mecânicos, por exemplo, pela aplicação de uma força externa para induzir a fratura controlada que se propaga ao longo da geometria de corte desejada.

Este mecanismo de corte é principalmente adequado para materiais cerâmicos, como a alumina e o vidro, como também alguns materiais compósitos. Elevadas taxas de furação são possíveis utilizando lasers pulsados de elevada potência, sendo então um mecanismo que possibilita elevadas velocidades de corte (Eltawahni 2011; Ion 2005).

2.2.2.Métodos alternativos para corte de metais

Os métodos de corte alternativos ao processo de corte a laser podem ser divididos em 3 grupos, nomeadamente em: processos térmicos, processos mecânicos e processos elétricos. A tecnologia de corte a laser é um dos processos térmicos, tal como o corte por plasma e o oxicorte. Estes dois últimos pecam pela sua incapacidade de concentrar energia térmica numa área reduzida. Como consequência, é necessário fornecer mais calor ao material para serem obtidas densidades de potência da mesma ordem. Isto prejudica a qualidade do corte, resultando em defeitos associados ao excessivo fornecimento de calor, como o aumento da ZTA, o aumento da camada resolidificada, a distorção térmica do material, possíveis alterações metalúrgicas, entre outros (Havrilla e Anthony 1999). Porém, estes métodos são vantajosos a nível económico e mais adequados para cortar materiais espessos, uma vez que o corte a laser é limitado a espessuras de aproximadamente 30 mm (Caristan 2004; Ion 2005).

Os processos de corte mecânico envolvem contacto entre a ferramenta de corte e o material. Sendo assim, as propriedades mecânicas são as propriedades do material que mais influenciam estes processos e, por isso, o corte de materiais frágeis e/ou duros é dificultado. A necessidade de manutenção/substituição da ferramenta de corte e de fixação rígida do material a cortar, tal como o ruído, as vibrações e as deformações do material, são problemas associados ao corte por contacto e desvantagens face aos processos térmicos. Por outro lado, os processos mecânicos não são tão suscetíveis aos defeitos térmicos. Os processos de corte mecânico geralmente comparados ao corte a laser são: o corte por jato de água, a puncionagem, e alguns processos de maquinagem.

Relativamente aos processos elétricos, o corte é conseguido pelo efeito de erosão ou dissolução do material da região de corte através de uma descarga elétrica, como é o caso da maquinagem por eletroerosão (EDM) (Havrilla e Anthony 1999). Tal como nos processos térmicos, nestes não existe contacto e, embora sejam reconhecidos pela sua elevada precisão, estão limitados ao corte de metais. Os cortes realizados por este processo são de qualidade elevada (superior à do corte a laser no corte de materiais com espessura superior a 3 mm), contudo é um processo dezenas de vezes mais demorado (Havrilla e Anthony 1999). Na Tabela 5 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens de alguns dos processos mencionados.

Tabela 5 - Comparação entre processos de corte de materiais metálicos. Adaptado de (Ion 2005; Caristan 2004; Havrilla e Anthony 1999)

	Processos térmicos			Processo mecânico
	Corte a Laser	Corte por plasma	Oxicorte	Corte a jato de água
Espessura máxima [mm]	30	50	300	150 (não metais) 25 (metais)
Largura de Fenda [mm]	0.1-1.0	> 1	> 2	0.7-2.5
Largura da ZTA [mm]	0.05	> 0.4	> 0.6	0
Rugosidade (Ra) [µm]	1-10	Elevada	Elevada	2-6.5
Materiais	Todos	Metais	Metais	Todos
Energia Fornecida (relativa)	Baixa	Baixa	Elevada	Média
Custo (relativo)	1	0.1	0.01	1
Produtividade (relativa)	Alta	Média	Baixa	Média-Baixa
Superfície de corte	Estrias cíclicas, escória aderente, alterações metalúrgicas	Estrias cíclicas, aresta em chanfro, rugosa, escória aderente, alterações metalúrgicas	Rugosa, baixa perpendicularidade da fenda, escória aderente, alterações metalúrgicas	Rugosa, estrias cíclicas, livre de tensões térmicas
Vantagens	Preciso, muito veloz, flexível, fendas reduzidas, baixo custo de operação	Baixo custo do equipamento, veloz, fácil de operar	Compacto, fácil de operar, baixo custo do equipamento, corte de espessuras elevadas	Inexistência de ZTA, sem camada solidificada, sem escória aderente e sem fumos
Desvantagens	Elevado custo do equipamento, limitação de espessura, fumos	Elevado custo de consumíveis, fendas e ZTA largas, baixa precisão, distorção térmica do material	Lento, fendas e ZTA largas, precisão muito baixa, elevada distorção térmica do material	Elevado custo de operação, relativamente lento, fendas moderadas, consumíveis

2.2.3. Parâmetros do processo

2.2.3.1. Velocidade de corte

O processo de corte a laser destaca-se industrialmente face aos restantes processos de corte térmico pois permite realizar cortes precisos a altas velocidades. A velocidade de corte é o parâmetro que determina o movimento relativo entre a peça a cortar e o feixe laser, influenciando não só a qualidade de corte como também o tempo de processamento e, por isso, os custos de produção.

As velocidades de corte estão relacionadas não só com as propriedades do feixe laser, como também com as propriedades do material a ser cortado. Relativamente às propriedades do feixe, o tipo de laser e a densidade de potência são os factores mais significantes, uma vez que o comprimento de onda determina a resposta do dado material à energia disponibilizada pelo laser e a densidade de potência define a forma como a energia é concentrada sobre o material.

A velocidade máxima de corte é proporcional à densidade de potência e inversamente proporcional à densidade e à espessura do material a cortar (Havrilla e Anthony 1999). Para uma dada potência do laser, pode ser representado um gráfico da velocidade de corte em função da espessura do material, onde são definidos limites de acordo com a qualidade pretendida. Um limite superior acima do qual o corte é incompleto, e outro inferior, abaixo do qual surgem defeitos térmicos (Kannatey-Asibu 2009; Havrilla e Anthony 1999).

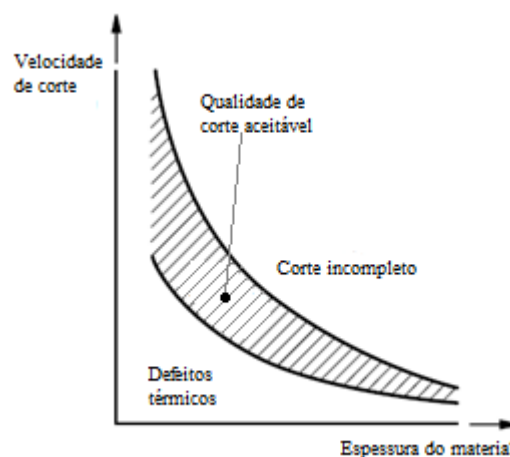


Figura 27 – Velocidade de corte em função da espessura do material (Kannatey-Asibu 2009).

A velocidade máxima de corte depende, também, das propriedades do material a cortar. Diferentes materiais interagem de maneiras distintas com o feixe laser e, como consequência, as velocidades máximas de corte também diferem de material para material, tal como sugerido pela Figura 28.

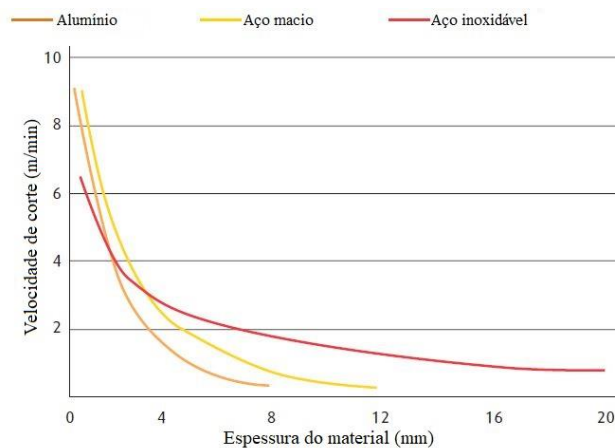


Figura 28 - Velocidade de corte máxima para diferentes metais. Corte com laser de 3 kW de potência (Berkmanns e Faerber 2008b).

Quanto aos restantes parâmetros do processo, quando usado um gás reativo como gás de assistência, pressões elevadas possibilitam um aumento da velocidade máxima de corte, pois há mais oxigênio direcionado à frente de corte, impulsionando o calor gerado pela reação de oxidação (Ahmadi et al. 2009). A Figura 29 sugere as velocidades máximas para o corte de aço macio em função da espessura do material, do tipo de laser, da sua potência e da pressão do oxigênio de assistência.

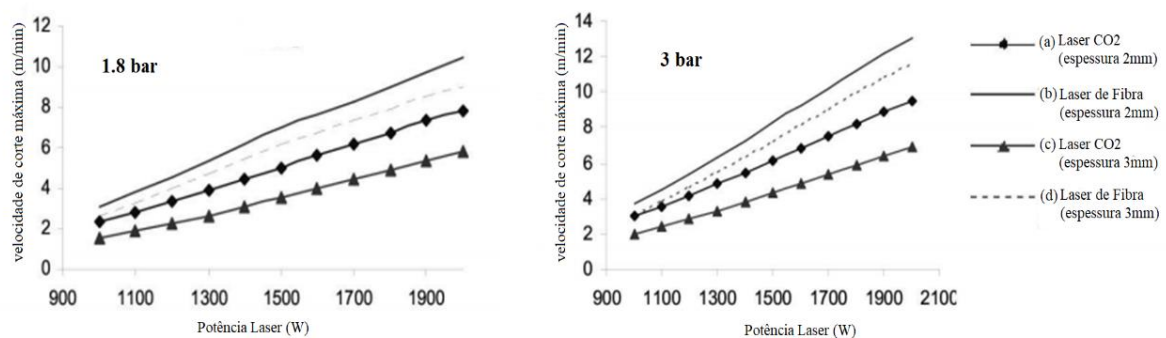


Figura 29 - Velocidade máxima de corte para aço macio em função da: espessura, potência do laser, tipo de laser e pressão do oxigênio de assistência (Ahmadi et al. 2009).

É possível aumentar a velocidade de corte caso seja:

- Aumentada a potência;
- Diminuída a área da mancha focada para uma dada potência, uma vez que resulta num aumento da densidade de potência – por exemplo, diminuindo a distância focal;
- Melhorado o modo espacial do feixe;
- Reduzida a espessura do material e/ou a densidade do material;
- Aumentada a capacidade de absorção da radiação laser por parte do material – por exemplo, mudando o comprimento de onda da radiação, ou seja, alterando o tipo de fonte laser;

- Utilizado um gás reativo;

Velocidades de corte demasiado reduzidas resultam na degradação térmica da superfície de corte, aumentando a zona termicamente afetada e a possibilidade de surgirem outros defeitos relacionados com o excessivo fornecimento de calor. Por outro lado, velocidades de corte excessivamente elevadas podem originar perda de penetração, uma vez que é diminuída a quantidade de calor fornecida a uma dada região do material, impossibilitando assim a fusão desse material ao longo de toda a espessura (Ion 2005).

2.2.3.2. Gás de assistência

O gás de assistência é direcionado à frente de corte e, sendo fornecido coaxialmente ao feixe laser, desempenha as seguintes funções (Eltawahni 2011; Wandera 2006; Ion 2005; Sun e Brandt 2013; Ghany e Newishy 2005):

- Auxílio na expulsão do material fundido e evaporado do interior da fenda;
- Arrefecimento da frente de corte;
- Geração de uma quantidade adicional de calor como resultado da reação exotérmica, quando são utilizados gases reativos;
- Proteção do material fundido do oxigénio presente no meio envolvente, caso sejam utilizados gases inertes;
- Proteção da lente de focagem contra salpicos de material;
- Supressão da formação de plasma, pois diminui a absorção da energia do feixe laser pelo material ;

O oxigénio é o gás mais utilizado para corte de aços ao carbono. A utilização do mecanismo de corte por fusão reativa, suscita a ocorrência de reações químicas entre o gás e o material e, assim, a superfície de corte é também quimicamente modificada (Riveiro et al. 2011). Nesse sentido, a superfície resultante é revestida com uma camada fina de óxido, que não é firmemente aderente ao material base, pondo em causa a qualidade do produto (Powell et al. 2008). Por outro lado, este mecanismo garante que sejam atingidas velocidades de corte cerca de 3 a 6 vezes superiores às aquelas atingidas quando utilizados gases inertes (Chen 1998; Sun e Brandt 2013). Quando utilizados gases reativos, a pressão imposta ao gás de assistência é inferior à imposta quando utilizados gases inertes, variando entre os 0.5 bar e os 5 bar (Wandera 2006). Uma vez que para baixas pressões o caudal mássico de gás direcionado à frente de corte é menor, é possível garantir maior economia no processo (Wandera e Kujanp 2010; Powell et al. 2008).

No corte de aço macio, a camada de óxido formada em torno da poça de fusão (FeO), tem viscosidade inferior à do ferro (Fe) para temperaturas superiores a 2000K (Figura 30) e, por isso, o material fundido é facilmente expulso sem necessidade de elevadas pressões do gás de assistência (Powell et al. 2008). Em adição, para pressões de oxigénio elevadas, há mais calor gerado pela reação exotérmica, podendo, por isso, comprometer a qualidade devido à expansão do calor para lá da frente de corte, que afeta termicamente o substrato e funde um maior volume de material (Sun e Brandt 2013).

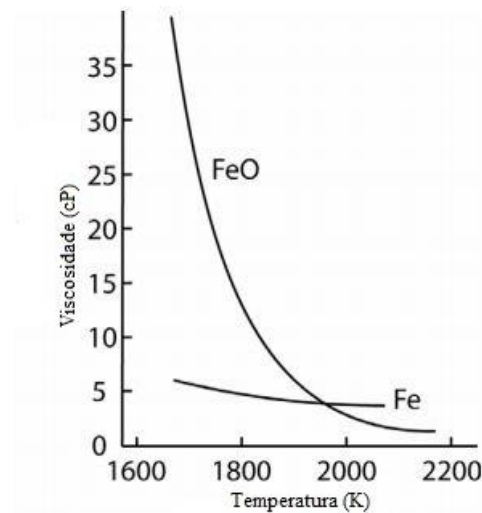


Figura 30 - Viscosidade [cP] em função da temperatura [K] para o ferro (Fe) e óxido de ferro (FeO) (Powell et al. 2008; Pocorni 2017).

A contaminação do gás de assistência prejudica a qualidade da superfície de corte, quando utilizado o mecanismo de corte por fusão reativa (Chen 1998). Um estudo realizado por Chen (1998), conclui que para uma pureza do oxigênio inferior a 75 %, não é possível cortar aço macio com 3 mm de espessura sem que seja notada escória aderente à aresta inferior de corte, quando utilizado um laser com 1.5 kW de potência e 2 bar de pressão para o oxigênio de assistência.

A velocidade de corte máxima é muito sensível à pureza do oxigênio de assistência, uma vez que para gases menos puros, a contribuição do calor gerado durante a reação de oxidação é inferior. Para elevados níveis de pureza (99.99-95 %), uma percentagem de 2 % de impurezas reduz a velocidade de corte máxima em cerca de 50 % (Sun e Brandt 2013). Para percentagens de impurezas mais elevadas (5-10 %), a redução da velocidade de corte máxima é menos significativa, tal como indica a Figura 31.

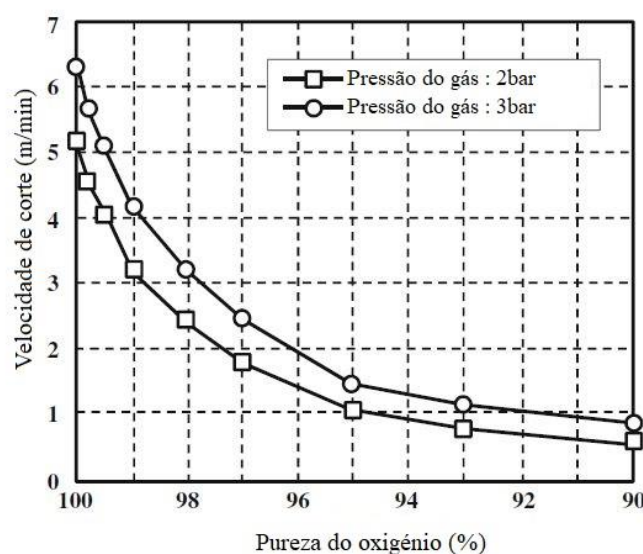


Figura 31 - Efeito da pureza do oxigênio na velocidade de corte de aço macio com 2mm de espessura. Laser CO₂ com 800W de potência (Sun e Brandt 2013).

O azoto é o gás inerte mais utilizado por ser um dos mais baratos. É usualmente empregue no corte de aço inoxidável, ligas de níquel e alumínio, quando a qualidade do corte é mais importante que a economia do processo, uma vez que as elevadas pressões necessárias (10-20 bar) e as velocidades de corte inferiores, acarretam um aumento no custo de produção (Wandera 2006). O Árgon e o Hélio são gases inertes ainda mais capacitados a melhorar a qualidade de corte, no entanto, o seu elevado custo inviabiliza a sua utilização na maioria dos casos (Ion 2005). Uma vez que nenhum destes gases reage quimicamente com o material fundido, a superfície de corte resultante é livre de óxidos e formada pela solidificação deste material, que adere firmemente às paredes da fenda (Powell et al. 2008). O principal defeito associado ao corte com auxílio de gases inertes é a formação de escória aderente à aresta inferior da superfície de corte, que é indicativo da ineficaz expulsão de material fundido do interior da fenda. Por outro lado, a contaminação do gás inerte, não demonstra tanta influência na qualidade de corte como quando utilizados gases reativos (Sun e Brandt 2013).

Quando utilizado um gás inerte, um aumento da pressão aumenta a capacidade de expulsão de material fundido do interior da fenda. As forças exercidas pelo gás de assistência sobre o material fundido, são resultado do gradiente de pressão e das tensões de corte geradas pelos efeitos viscosos do escoamento de gás ao longo da fenda (Riveiro et al. 2019). Assim, a taxa de material removido depende do escoamento da camada limite (Figura 32), que é o escoamento do gás numa região próxima à camada de material fundido, onde os efeitos viscosos são dominantes e o perfil de velocidade é influenciado pelas tensões de corte (Wandera e Kujanp 2010).

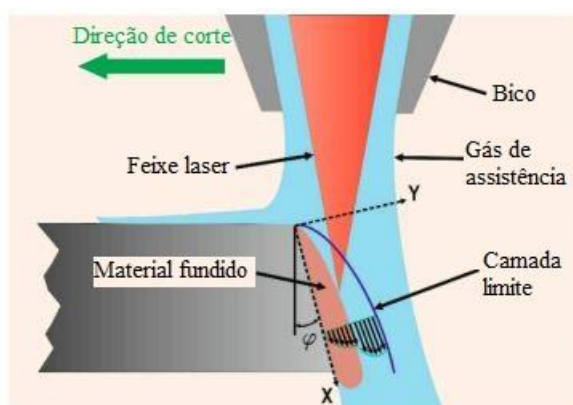


Figura 32 - Ilustração das forças que atuam sobre a camada de material fundido (Riveiro et al. 2019)

Para pressões mais elevadas, as forças inerciais exercidas pelo escoamento de gás sobre o material fundido aumentam, a espessura da camada limite do escoamento de material é menor, garantido, assim, que o regime laminar do escoamento de material fundido é mantido ao longo de toda a espessura. Idealmente o regime de escoamento deve ser mantido laminar de forma a garantir uma superfície de corte uniforme, com poucas irregularidades associadas à solidificação do material em regime turbulento sobre as paredes da fenda (Wandera e Kujanp 2010; Wandera 2016; Riveiro et al. 2019).

2.2.3.3. Bico

O gás de assistência é direcionado para a fenda através do bico. A geometria do bico desempenha um papel importante na forma como o escoamento de gás progride no interior da fenda. O diâmetro do bico determina o caudal mássico de gás direcionado à frente de corte influenciando assim, a força inercial exercida pelo gás sobre o material fundido. Quando utilizado o mecanismo de corte por fusão, um diâmetro de bico maior, aumenta o caudal mássico de gás (Figura 33) e, como consequência, a força inercial exercida pelo gás na interface gás/material fundido, resultando numa diminuição da espessura da camada limite e o regime laminar de escoamento mantido por uma distância maior (Wandera e Kujanp 2010). Por outro lado, no mecanismo de corte por fusão reativa, para diâmetros de bico maiores há mais oxigénio direcionado para a fenda, impulsionando o calor gerado durante a reação de oxidação e a possível dissipação do calor da frente de corte.

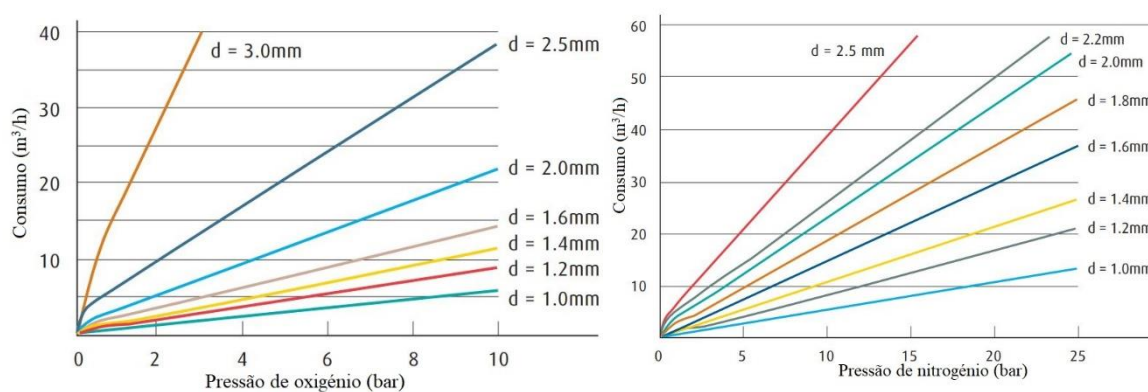


Figura 33 - Consumo de gás de assistência em função da pressão do gás de assistência e do diâmetro do bico (d). (Berkmanns e Faerber 2008b)

Os bicos mais utilizados industrialmente são apresentados na Figura 34. O diâmetro do orifício pode ir de 0.8 mm a 5 mm. Orifícios com diâmetros menores, são mais aconselhados quando o corte é realizado pelo mecanismo de corte por fusão reativa, pois permitem o fornecimento de uma quantidade precisa de oxigénio e a reação de oxidação é mais limitada à frente de corte, resultando em fendas mais estreitas e superfícies de corte menos rugosas (Wandera, Kujanp e Salminen 2011). Por outro lado, bicos de maior diâmetro são mais adequados quando utilizados gases inertes como gás de assistência, uma vez que aumentam a eficiência na expulsão do material, devido à superior força inercial exercida pelo gás sobre o material fundido (Wandera e Kujanp 2010).

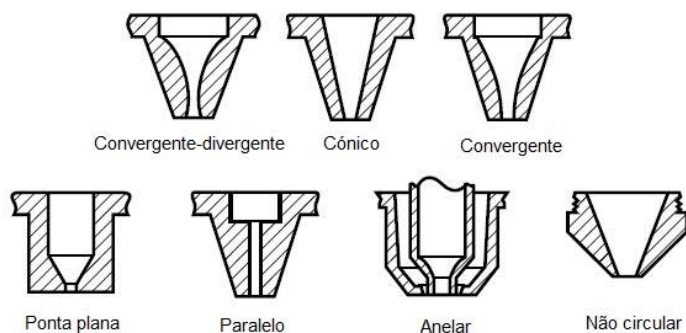


Figura 34 - Diferentes tipos de bicos (Eltawahni 2011).

O desalinhamento do feixe tem influência na qualidade do corte, pois caso o feixe seja obstruído pelo bico, a densidade de potência na superfície do material é inferior. Isto pode resultar na perda de penetração, diminuição da velocidade de corte máxima, como também em dano do bico. Por outro lado, caso o feixe não seja alinhado com as lentes de focagem, a mancha focada é distorcida e/ou alongada, o que resulta numa perda de densidade de potência, diminuição da velocidade máxima, fendas alargadas e num aumento da escória aderente (Havrilla e Anthony 1999). Os bicos utilizados no corte a laser são geralmente produzidos em cobre, com dimensões finamente controladas. O cobre é o material mais utilizado, não só porque é um material de alta refletividade, evitando o dano do bico em caso de desalinhamento do feixe laser, mas também por apresentarem pouca aderência aos salpicos de material fundido (Havrilla e Anthony 1999).

2.2.3.4. Distância “stand-off”

A distância “stand-off” é o parâmetro do processo que dita a distância a que o bico se posiciona em relação ao material a cortar. Este parâmetro toma, na maioria dos casos, valores entre 0.5-1.5 mm e deve ser inferior ao diâmetro do orifício do bico, sendo a razão entre ambos mantida entre 0.2 e 0.8 (Havrilla e Anthony 1999; Berkmanns e Faerber 2008b). A distância “stand-off” deve ser constante ao longo de todo o corte pois influencia o modelo do escoamento de gás, afetando a capacidade de expulsão do material fundido e por isso também a qualidade de corte.

Distâncias “stand-off” superiores ao diâmetro do bico resultam num escoamento turbulento do gás de assistência e uma vez que as fendas têm largura reduzida, haverá excessivas variações de pressão entre o bico e a fenda, afetando a qualidade e consistência de corte. Caso o “stand-off” seja reduzido, a fenda atua como continuação do bico, diminuindo as variações de pressão e possibilitando cortes com superior qualidade, contudo, há mais risco da lente ser danificada por salpicos de material fundido, devido à proximidade da cabeça de corte do material a cortar (Havrilla e Anthony 1999; Eltawahni 2011).

2.2.3.5. Distância focal e Posição focal

Em fontes laser de estado sólido, o feixe laser pode ser encaminhado até à cabeça de corte através de cabos de fibra ótica. Na cabeça, à saída do respetivo cabo, o feixe diverge e é colimado através da lente de colimação, fazendo com que se propague com reduzida divergência até à lente de focagem, como ilustrado na Figura 35 (Wandera 2006). Para sistemas com esta configuração, o cálculo do diâmetro da mancha focada (d) é dado pela **Equação 2.3**, sendo função do diâmetro do núcleo da fibra ótica ($\varnothing_c$), da distância focal da lente de foco (f), como também da distância focal da lente de colimação (f_c) (Abdullah 2010; Havrilla e Anthony 1999).

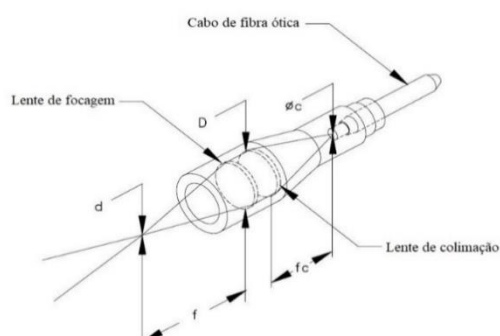


Figura 35 – Parâmetros de focagem. Entrega por fibra ótica (Abdullah 2010).

$$d = \frac{f}{f_c} * \varnothing_c$$

Equação 2.3

A distância focal da lente de focagem determina o diâmetro mínimo da mancha focada, influenciando não só a densidade de potência sobre o material, como também a profundidade de foco (L). As distâncias focais (f), podem variar de 65 mm a 254 mm (Kannatey-Asibu 2009). Distâncias focais reduzidas, possibilitam manchas focadas de área reduzida e profundidades de foco menores. São mais adequadas para cortar materiais finos, uma vez que não há necessidade de profundidades de foco extensas para que a cintura do feixe se mantenha ao longo de toda a espessura do material. Como a mancha focada é de área inferior, as distâncias focais curtas garantem maiores densidades de potência e, por isso, possibilitam que sejam atingidas velocidades de corte mais elevadas.

Por outro lado, distâncias focais longas são adequadas para cortar materiais mais espessos. Embora as densidades de potência sejam menores, as manchas com maior área garantem larguras de fenda superiores e por isso maior facilidade para expulsar o material fundido da frente de corte. A profundidade de foco é também superior, garantindo maior uniformidade na densidade de potência ao longo de toda a espessura do material. Na Tabela 6 é realizada uma comparação entre distâncias focais curtas e longas.

Tabela 6 – Relação entre distância focal da lente de focagem, área da mancha focada, profundidade de foco e manutenção da unidade de focagem (Havrilla e Anthony 1999).

	Distância focal curta	Distância focal longa
Área da mancha focada	Reduzida: • + Densidade de potência • + Velocidade de corte • - Fornecimento de calor • Materiais finos	Elevada: • -Densidade de potência • -Velocidade de corte • +Fornecimento de calor • Fendas mais largas • Materiais espessos
Profundidade de foco	Curta: • + Variações na densidade de potência ao longo do feixe • - Perpendicularidade das fendas • - Facilidade em posicionar o foco	Longa: • - Variações na densidade de potência longo do feixe • + Perpendicularidade das fendas • + Facilidade em posicionar o foco
Manutenção da unidade de focagem	Superior: • Bico mais próximo de salpicos e fumos provenientes da região de corte	Inferior: • Bico mais afastado da região de corte

A posição focal é um parâmetro que pode ser ajustado ao longo processo e define a posição do plano da mancha focada em relação à superfície do material. Este parâmetro pode ser controlado pelo ajuste do bico em relação ao material a cortar (distância *stand-off*). Contudo, modificar a posição do bico altera a forma com que o escoamento do gás de assistência é direcionado à região de corte. Isto acarreta variações, não só na forma com que o material

fundido é ejetado da fenda, como também nos fenômenos relacionados da reação exotérmica gás-material (no mecanismo por fusão reativa).

De forma a contornar tais situações, são utilizados servomotores ou motores passo-a-passo que alteram a posição das lentes em relação ao material a cortar (Caristan 2004). Deste modo é possível alterar a posição do foco sem que a distância do bico ao material seja modificada.

A posição focal é controlada de forma a garantir a melhor qualidade de corte possível, sendo o posicionamento ótimo influenciado pelo material a cortar, pela sua espessura e pela potência do laser (Havrilla e Anthony 1999). Para materiais finos, a posição focal deve ser mantida na superfície do material. Para materiais de espessura média, o foco deve ser posicionado abaixo da superfície do material. Relativamente a materiais espessos, para o aço ao carbono, quando utilizado o mecanismo de corte por fusão reativa, a posição focal deve ser mantida acima da superfície do material. Relativamente ao alumínio e ao aço inoxidável de espessuras elevadas, quando utilizados gases inertes, o foco deve ser posicionado abaixo ou na superfície inferior do material (Caristan 2004; Havrilla e Anthony 1999).

Embora a desfocagem do feixe relativamente ao material seja prática comum para o corte de materiais espessos, garantindo cortes com menos ou até sem escória aderente (Figura 36), as velocidades de corte são significativamente reduzidas, uma vez que a densidade de potência sobre o material não é a máxima. Em adição, a desfocagem do feixe origina fendas mais largas e caso seja desfocado em demasia, a densidade de potência sobre o material a cortar pode ser de tal forma reduzida que a penetração seja diminuta, resultando em penetração incompleta.

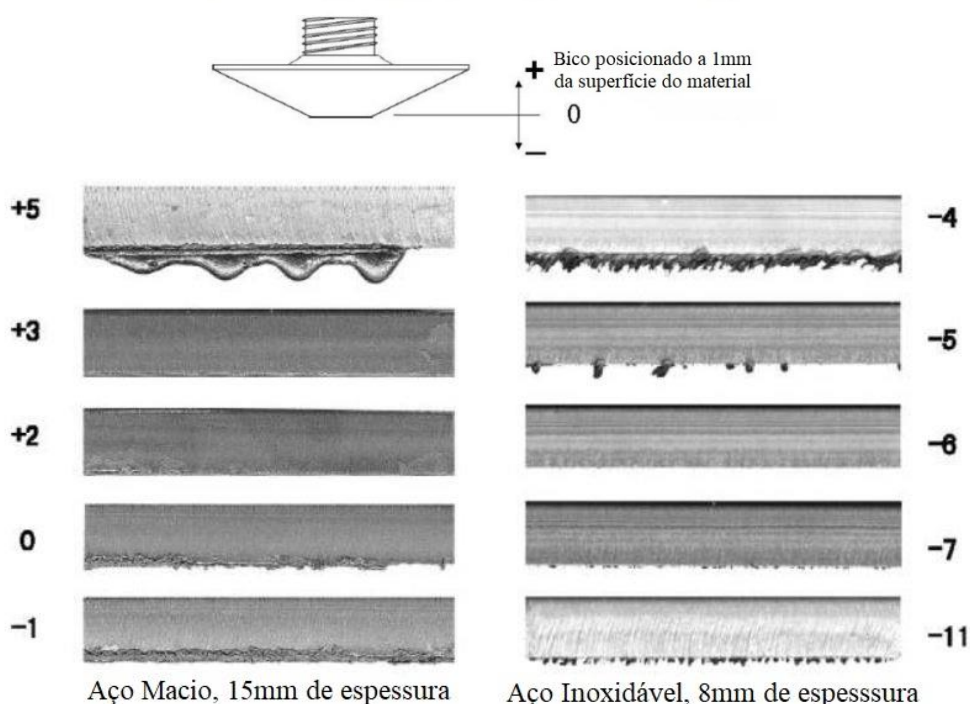


Figura 36 - Influência da posição focal na escória aderente. Adaptado de (Shane 2019).

2.2.4. Parâmetros do material

Uma vez que o corte a laser é um processo onde não existe contacto entre a ferramenta de corte e o material a cortar, as propriedades térmicas e óticas dos materiais têm mais relevância do que as suas propriedades mecânicas. Posto isto, serão agora discutidas algumas das propriedades dos materiais que mais afetam o processo.

2.2.4.1. Propriedades térmicas

A condutividade térmica é a propriedade do material que determina a taxa a que o calor é conduzido, em regime estacionário, ao longo de um sólido (Ashby 2011). No corte a laser, quanto maior for a condutividade térmica mais difícil será manter o calor na frente de corte e, por isso, parte do calor fornecido será dissipado para o material do substrato, por condução.

O calor específico contabiliza a quantidade de energia necessária (calor), para elevar uma unidade de temperatura a uma unidade de massa de material. Para os metais esta propriedade é medida a pressão constante e designada pela sigla c_p . Quanto maior o calor específico, maior será a necessidade de energia para que se inicie a fusão do material.

Para que ocorra a fusão do material, é necessário que se eleve a sua temperatura até à temperatura de fusão. Atingida esta temperatura, o calor latente de fusão é a propriedade que caracteriza a quantidade de energia necessária para que uma unidade de massa de material passe do estado sólido para o estado líquido, sem que existam variações na temperatura.

Quanto mais elevadas forem qualquer uma destas propriedades, maior será a necessidade de energia para realizar o corte. Posto isto, o aumento da potência do laser ou a diminuição da velocidade são dois ajustes comuns, no entanto pioram a produtividade como também a qualidade de corte, através de defeitos associados à dissipação do calor da frente de corte.

A maioria dos metais expande quando aquece e contrai quando arrefece. O coeficiente de expansão térmica mede a deformação térmica do material, com o aumento unitário de temperatura. Esta deformação poderá provocar alterações dimensionais ao material a cortar, comprometer a uniformidade do corte, como também introduzir tensões térmicas residuais na ZTA, que resultem em fratura e/ou deformações plásticas permanentes (Callister e Rethwisch 2013). Na Tabela 7 são apresentadas algumas destas propriedades para os metais mais processados por corte a laser.

Tabela 7 - Propriedades térmicas dos metais (Ashby 2011).

Material	Calor Específico a pressão constante (c_p) [J/(Kg. K)]	Condutividade Térmica [W/(m. K)]	Coefficiente de expansão térmica [10 ⁶ /°C]	Temperatura de Fusão [°C]
Ferro Fundido	439-495	29-44	10-12.5	1130-1250
Aço ao carbono (%C > 0.7)	440-510	47-53	11-13.5	1289-1478
Aço ao carbono (0.3 < %C < 0.7)	440-510	45-55	10-14	1380-1514
Aço ao carbono (0.3 < %C)	460-505	49-54	11.5-13	1480-1526
Aço inoxidável	450-530	11-19	13-20	1375-1450
Ligas de Alumínio	857-990	76-235	21-24	475-677
Ligas de Cobre	372-388	160-390	16.9-18	982-1082

2.2.4.2. Propriedades óticas

As propriedades óticas dos materiais caracterizam a sua resposta à radiação eletromagnética. A interação entre o feixe de radiação e a estrutura cristalina dos materiais pode resultar em três fenômenos distintos. A radiação poderá ser: absorvida, transmitida ou refletida. A intensidade total do feixe direcionado para a superfície de um material (I_0) será igual à soma da intensidade de radiação absorvida (I_a), transmitida (I_t) e refletida (I_r), tal como indica a **Equação 2.4** (Callister e Rethwisch 2013).

$$I_0 = I_a + I_t + I_r \quad \text{Equação 2.4}$$

Os materiais podem ser classificados de acordo com a sua capacidade transmitir radiação eletromagnética visível por:

- Materiais transparentes: São capazes de transmitir a luz;
- Materiais translúcidos: Transmitem a luz de forma difusiva;
- Materiais opacos: Não transmitem luz.

Os metais são materiais opacos à grande maioria das frequências do espectro eletromagnético, exceto para as radiações de elevada frequência (raios-x e γ), às quais se comportam como materiais transparentes (Callister e Rethwisch 2013).

Assim sendo, a radiação visível transmitida pelos metais é nula ($I_t = 0$) e maior parte da radiação que é absorvida, é reemitida pelo material tendo o mesmo comprimento de onda da radiação incidente (reflexão). A capacidade de absorção do feixe laser pelo material, depende do comprimento de onda da radiação incidente. A Figura 37 demonstra que, à temperatura ambiente, os metais têm mais capacidade em absorver radiação com comprimentos de onda reduzidos, sendo a restante refletida (Callister e Rethwisch 2013).

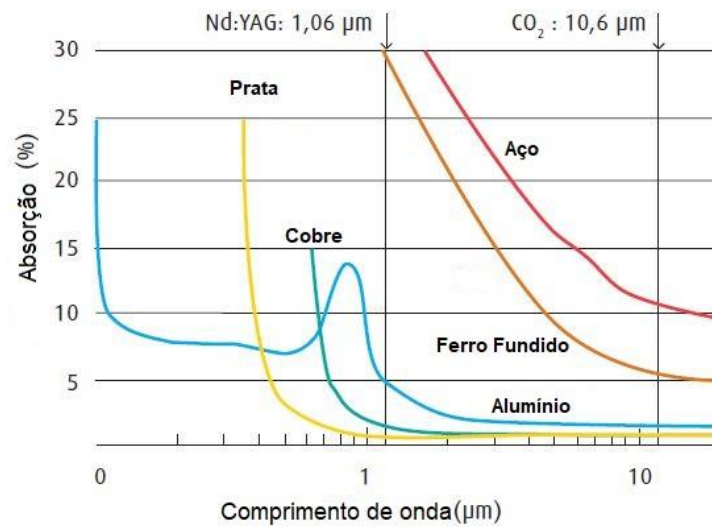


Figura 37 - Absorção dos metais em função do comprimento de onda da radiação incidente, à temperatura ambiente (Berkmanns e Faerber 2008b).

A alta refletividade inicial de alguns metais para maiores comprimentos de onda mais pode ser contornada disponibilizando sobre o material elevadas densidades de potência, uma vez que a taxa de absorção aumenta com o aumento da temperatura dos metais, tal como indica a Figura 38 (Havrilla e Anthony 1999).

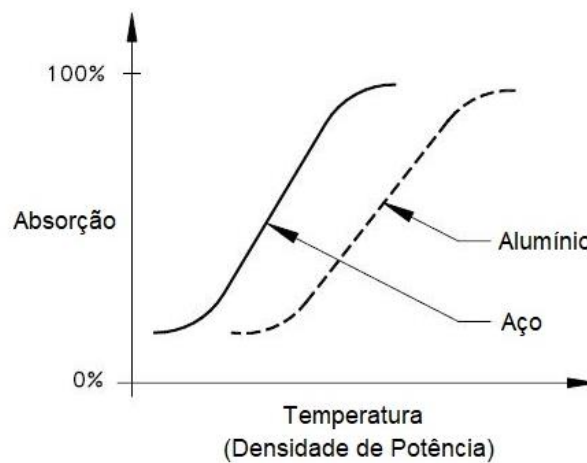


Figura 38 - Absorção em função da temperatura para o aço e alumínio (Havrilla e Anthony 1999).

2.2.4.3. Propriedades físicas

O acabamento superficial dos materiais influencia a qualidade e repetibilidade do processo de corte a laser. Materiais com elevada refletividade e com acabamento superficial suave (por exemplo alguns metais polidos), apresentam mais dificuldade na interação inicial com a radiação do feixe laser. Como forma de diminuir a refletividade destes metais, as superfícies podem ser lixadas ou revestidas com uma camada de partículas cerâmicas. Por outro lado, superfícies pintadas aumentam, em geral, a capacidade de absorção do material, contudo contaminam a região do corte com resíduos indesejados. Algumas tintas poderão ainda ser inflamáveis quando utilizado oxigênio como gás de assistência e as tintas resistentes ao calor podem incapacitar o corte (Havrilla e Anthony 1999).

Aços ao carbono podem apresentar-se com superfícies enferrujadas, especialmente pelos óxidos que surgem à superfície. O corte a laser nestes materiais é inconsistente e as velocidades de corte são mais reduzidas, já que a presença de óxidos reduz o potencial das reações exotérmicas entre o material e o gás de assistência. Estes óxidos são muitas vezes removidos antes de se iniciar o processo (Havrilla e Anthony 1999).

2.2.5. Parâmetros do feixe Laser

2.2.5.1. Potência e densidade de potência

Os lasers são maioritariamente designados de acordo com a sua potência máxima em Watts. A potência de um laser dita a energia emitida pela radiação, por unidade de tempo (Berkmanns e Faerber 2008b). A densidade de potência (P_d) é calculada pela razão entre a potência do laser (P) e a área em que concentra a sua energia, tal como indica a **Equação 2.5** (Havrilla e Anthony 1999).

$$P_d = \frac{4P}{\pi d^2} \quad \text{Equação 2.5}$$

A densidade de potência pode ser ampliada pelo aumento da potência do laser, pela diminuição da distância focal da lente de focagem ou até melhorando modo espacial do feixe laser (Berkmanns e Faerber 2008b). Para uma dada lente de focagem, o aumento da potência permite a realização de cortes mais profundos a velocidades superiores. Apesar de possibilitarem um aumento da produtividade e maior flexibilidade nas espessuras dos materiais a cortar, potências excessivamente elevadas têm como contrapartida o aumento da largura da fenda, bem como o arredondamento e queima das arestas de corte. Por outro lado, quando o corte é realizado pelo mecanismo de fusão reativa, o gás de assistência poderá ser auto inflamado devido às elevadas temperaturas, diminuindo assim o potencial da reação exotérmica gás-metal (Steen e Mazumder 2010).

2.2.5.2. Modo espacial do feixe laser

O modo espacial do feixe laser determina a distribuição de potência no interior do feixe e é função do modo eletromagnético transversal (TEM- *Transverse electromagnetic mode*) (Havrilla e Anthony 1999).

A forma como a potência é distribuída na secção transversal do feixe laser depende do seu modo espacial, ou combinação de modos, no interior da cavidade ressonante. A ordem do modo espacial do feixe é denotada pelos subscritos x e y (TEM_{xy}), no caso das cavidades ressonantes de secção retangular, ou por r e ϕ , no caso das cavidades cilíndricas ($TM_{r\phi}$) (Taylor 2019). A distribuição de potência para os diferentes modos espaciais é representada na Figura 39.

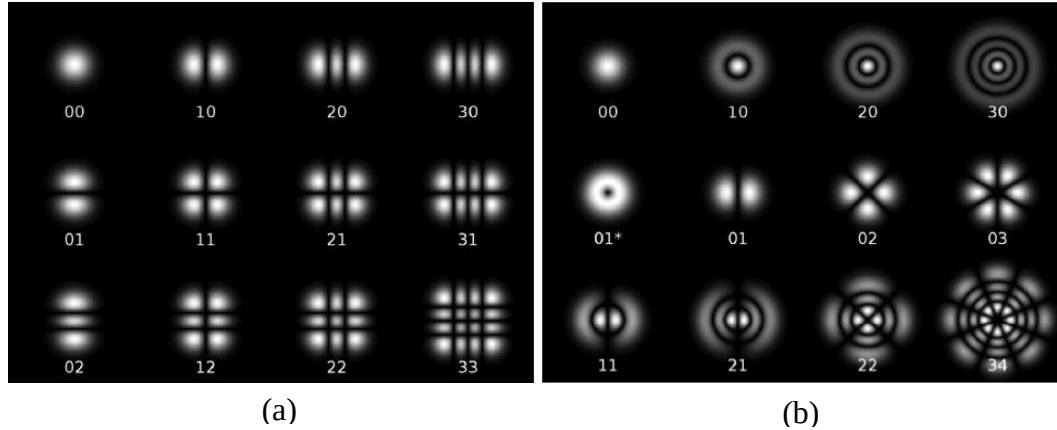


Figura 39 - Modos eletromagnéticos transversos (TEM) para cavidades de ressonância com secção: (a) - retangular; (b) - circular (Taylor 2019).

A distribuição que possibilita maior capacidade de focagem, ou seja, menos divergência de feixe e por isso manchas focadas reduzidas, é a distribuição Gaussiana, sendo caracterizada pelo modo de ordem mais baixa (TM_{00}). Neste modo a potência é distribuída em forma de sino, sendo máxima no eixo central do feixe. É geralmente o modo mais desejado para a operação de corte a laser, pois garante que sejam obtidas as maiores densidades de potência, velocidades de corte mais elevadas e fendas mais estreitas (Moreira 2017). Modos de ordem superior, são caracterizados pela sua incapacidade de concentrar a energia numa mancha reduzida, comprometendo a densidade de potência.

Na prática, nenhum feixe laser atinge a distribuição gaussiana. A variável M^2 , designada por factor de qualidade do feixe, é utilizada para descrever o quão próximo dessa distribuição está um dado feixe laser. A dimensão angular de um feixe não gaussiano, a jusante da cintura, é M^2 vezes superior à do feixe gaussiano. Assim, para um feixe com distribuição gaussiana perfeita, $M^2 = 1$. Caso a distribuição não seja gaussiana, $M^2 > 1$ (Figura 40) (Coherent 2009).

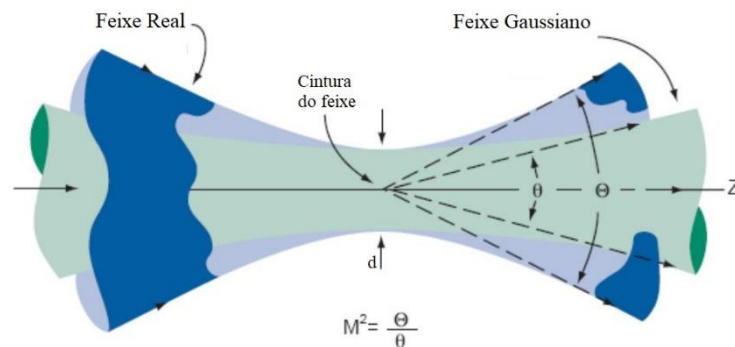


Figura 40 - Comparação entre o feixe gaussiano e um feixe real (Coherent 2009).

O factor de qualidade de feixe (M^2) é suficiente para caracterizar diferentes feixes gerados pela mesma fonte laser, ou feixes com o mesmo comprimento de onda. O BPP (*Beam Parameter Product*), é o parâmetro usado para comparar feixes provenientes de diferentes fontes lasers, pois inclui o comprimento de onda (Wandera 2006). BPP é definido como o produto entre o raio mínimo do feixe focado ($d/2$) e meio ângulo de divergência medido a jusante da cintura do feixe ($\Theta/2$), tal como indica a **Equação 2.6**.

$$BPP = \frac{d * \Theta}{4} = \frac{\lambda}{\pi} * M^2 \quad \text{Equação 2.6}$$

2.2.5.3. Diâmetro da mancha focada e profundidade de foco

O feixe laser ao ser focado pela lente de focagem, converge até à região da cintura e volta a divergir a jusante desta (Figura 41). A distância focal, é uma propriedade da lente de focagem e caracteriza a distância entre esta lente e a posição do foco - secção transversal do feixe com área mínima.

Tendo em conta o factor de qualidade do feixe (M^2), o diâmetro da mancha focada (d), pode ser calculado através da distância focal (f), do comprimento de onda (λ) e do diâmetro do feixe na lente de focagem (D), sendo essa relação dada pela **Equação 2.7** (Havrilla e Anthony 1999; Wandera 2006).

$$d = M^2 * \frac{4\lambda f}{\pi D} = BPP * \frac{4f}{D} \quad \text{Equação 2.7}$$

Outra característica do feixe focado é a profundidade de foco (L). Esta define o comprimento da cintura do feixe, ou seja, o comprimento para o qual a área da secção transversal do feixe, não aumenta mais do que uma percentagem definida em relação à sua área mínima. Geralmente, é utilizada a percentagem de 5 % ($L_{5\%}$), sendo a profundidade de foco, nesse caso, aproximada pela **Equação 2.8** (Havrilla e Anthony 1999).

$$L_{5\%} \cong \frac{d^2}{2\lambda M^2} \quad \text{Equação 2.8}$$

Outro método para caracterizar a profundidade de foco é através do comprimento de Rayleigh (Z_R). Este define a distância desde a mancha focada, até ao ponto onde o raio do feixe é aumentado por um factor de $\sqrt{2}$, ou seja, a área da secção é aumentada para o dobro (Coherent 2009). O comprimento de Rayleigh é dado pela **Equação 2.9**, sendo a profundidade de foco de (L_{Z_R}), o dobro desse comprimento, tal como indica a Figura 41 (Havrilla e Anthony 1999).

$$Z_R = \frac{\pi d^2}{4M^2 \lambda} \quad \text{Equação 2.9}$$

Do ponto de vista do processo de corte a laser, a profundidade de foco pode ser relacionada com a distância em que a largura da fenda não aumenta significativamente. Assim, é fundamental manter a espessura do material aproximadamente igual à profundidade de foco, para ser obtida uma fenda com elevada perpendicularidade (Kannatey-Asibu 2009).

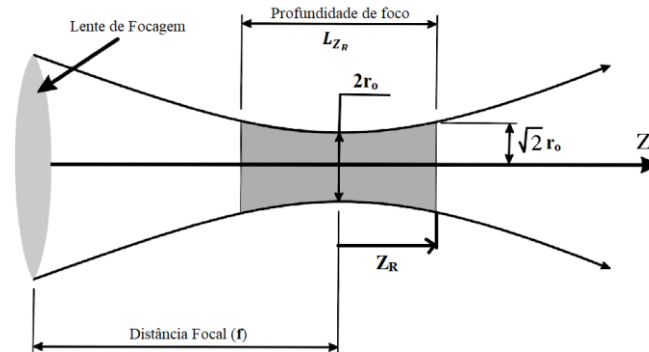


Figura 41 - Definição da profundidade de foco através da distância de Rayleigh. Feixe gaussiano (Lapointe e Kashyap 2015).

2.2.5.4. Polarização

A radiação eletromagnética é composta por um campo elétrico e um campo magnético, que oscilam segundo planos ortogonais entre si, sendo estas oscilações, perpendiculares à direção de propagação da onda. A polarização do feixe relaciona a direção de oscilação do campo elétrico com a direção de propagação da onda. Esta é uma propriedade influente no processo de corte a laser, pois afeta a capacidade de absorção da energia do feixe pelo material (Ion 2005).

A polarização do feixe laser pode ser linear (designada por polarização plana), circular, elíptica ou aleatória. Na radiação com polarização plana, o campo elétrico oscila segundo um único plano, podendo ter duas configurações: ou paralela, ou perpendicular, em relação ao plano de incidência. Cada uma destas configurações é absorvida de forma diferente pelo material (Wandera 2006). O plano de incidência é definido pelo vetor normal à superfície de corte e pelo vetor de propagação da onda. O feixe é designado por p-polarizado quando o vetor do campo elétrico é paralelo ao plano de incidência e é designado por s-polarizado, caso o vetor do campo elétrico seja perpendicular ao plano de incidência (Costa Rodrigues, Vorkov e Duflou 2018). Uma vez que a inclinação da frente de corte depende da direção do vetor velocidade e da polarização da radiação do laser, para diferentes estados de polarização, o calor é absorvido pelo material de formas distintas, tal como indica a Figura 42 (Wandera 2006).

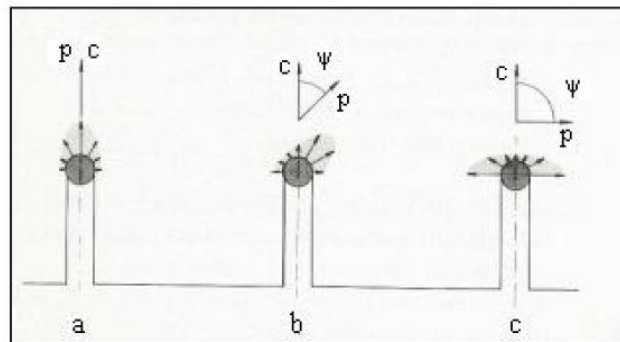


Figura 42 – Energia absorvida pelo material, para diferentes ângulos (ψ) entre o vetor de polarização plana (p) e o vetor de velocidade de corte (c) (Wandera 2006).

Fontes luminosas com diferentes polarizações ou diferentes comprimentos de onda, interagem de forma distinta com os materiais, à medida que o ângulo de incidência varia. A absorção de um dado material em função da polarização do feixe de radiação, do seu comprimento de onda e do ângulo de incidência, é dada pelas funções de Fresnel (Figura 43(b)) (Costa Rodrigues, Vorkov e Duflou 2018; Mahrle e Beyer 2009). Quando o ângulo de incidência é nulo ($\varphi_{IN} = 0^\circ$), a absorção dos feixes p- ou s-polarizados é idêntica. Contudo, à medida que φ_{IN} aumenta, a absorção do feixe s-polarizados diminui linearmente até ser nula, quando $\varphi_{IN} = 90^\circ$. Relativamente aos feixes p-polarizados, a absorção por parte do material aumenta com o aumento de φ_{IN} , atingindo um pico para $\varphi_{IN} < 90^\circ$ e diminuindo acentuadamente a partir daí, até ser nula quando $\varphi_{IN} = 90^\circ$. O ângulo de incidência para o qual a absorção é máxima, depende do tipo de laser (comprimento de onda) e do material a ser cortado, designando-se por ângulo de Brewster (Mahrle e Beyer 2009; Wandera 2006).

Pela Figura 43 (a) pode ser observado que, embora o feixe seja perpendicular à superfície do material, este não o é relativamente à superfície da frente de corte. Assim, a absorção é superior nesta região, facilitando o corte. A inclinação da frente de corte depende da direção do vetor velocidade, das propriedades do feixe (como o comprimento de onda, distância focal, diâmetro da mancha focada, profundidade do foco, polarização, modo espacial, entre outros), como também da espessura do material a cortar. Como estudado por Mahrle e Beyer (2009), o ângulo de inclinação da frente de corte aumenta com o aumento da espessura do material a cortar e, por isso, radiação com maiores comprimentos de onda, como a radiação das fontes laser CO₂, são mais absorvidas durante o corte de materiais espessos. Em contrapartida, a radiação dos lasers fibra é mais absorvida durante o corte de materiais finos (Mahrle e Beyer 2009).

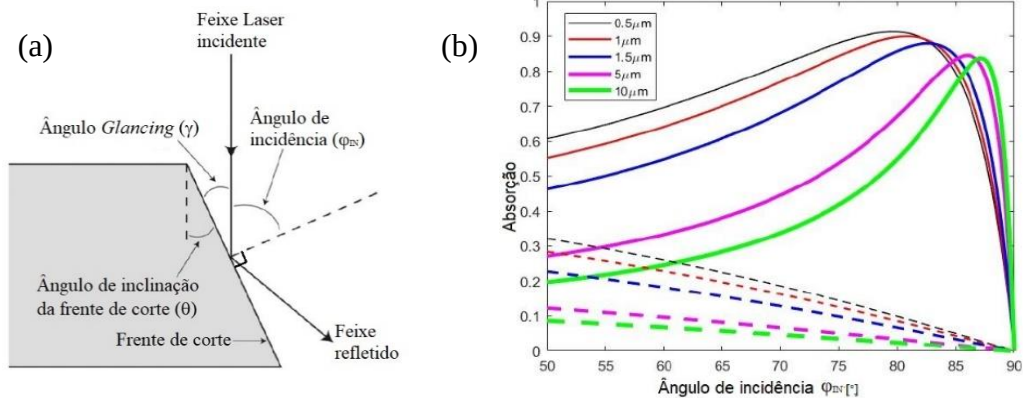


Figura 43 – (a): Ângulos da frente de corte (Pocorni 2017) ; (b): Funções de Fresnel, que demonstram a absorção do ferro para diferentes comprimentos de onda, ângulos de incidência e direção de polarização (feixe s-polarizado: traço interrompido; feixe p-polarizado: traço contínuo) (Costa Rodrigues, Vorkov e Duflou 2018).

Caso o corte seja realizado na direção do vetor de polarização, feixes p-polarizados são maioritariamente absorvidos pela face frontal da fenda. No mesmo caso, feixes s-polarizados são mais absorvidos pelas faces laterais da fenda (Figura 42) (Ion 2005). Os feixes p-polarizados possibilitam desse modo a obtenção de fendas estreitas, com arestas afiadas e com elevada perpendicularidade. Se o feixe é polarizado angularmente à direção do corte, a absorção da frente de corte diminui, as velocidades máximas de corte diminuem e faces laterais da fenda absorvem mais energia, resultando em fendas alargadas, perda de perpendicularidade bem como o arredondamento das arestas (Figura 44) (Kannatey-Asibu 2009).

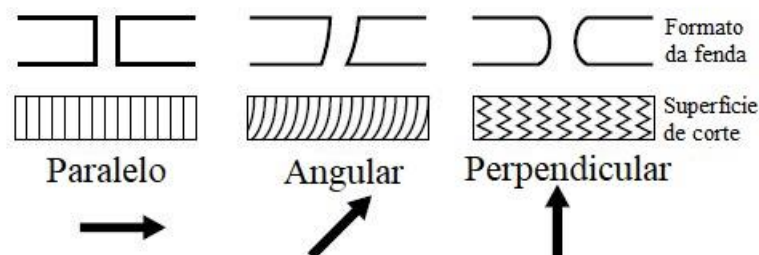


Figura 44 - Polarização do feixe em relação à direção de corte. Influência na qualidade da superfície corte (Kannatey-Asibu 2009).

Em geral a polarização do feixe é um parâmetro difícil de manipular, tornando-se impraticável manter a relação entre a direção de corte e a de polarização, principalmente para cortes segundo contornos complexos. Posto isto, outras estratégias de polarização, como a polarização aleatória, circular ou radial, têm sido aplicadas para garantir a consistência do corte segundo diferentes direções, contudo a sua eficiência não é ótima (Havrilla e Anthony 1999; Costa Rodrigues, Vorkov e Duflou 2018).

Golyshev, Orishich e Shulyatyev (2017), estudaram a influência da variação do ângulo entre o vetor de polarização e o vetor de velocidade de corte (ψ). Através de um laser CO₂ com 1 kW de potência, para cortar de chapa de aço com 5 mm de espessura utilizando oxigênio como gás de assistência, foi verificando que o ângulo ψ afeta a velocidade máxima de corte e a rugosidade da superfície. A velocidade máxima foi atingida para o feixe p-polarizado ($\psi=0$). Para o feixe s-polarizado a velocidade máxima de corte foi a mais baixa. As superfícies de corte também se mostraram diferentes, como apresentado na Figura 45.

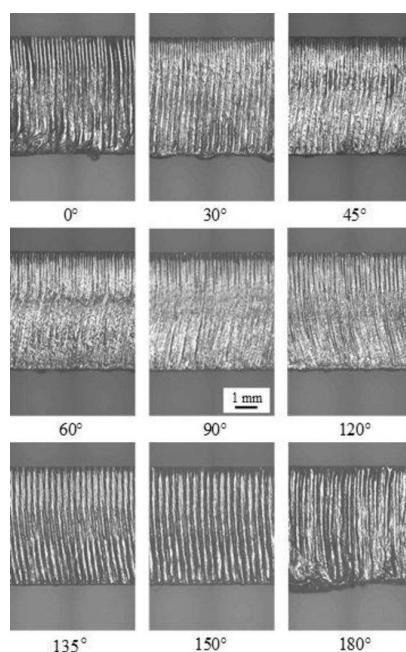


Figura 45 - Influência do ângulo ψ na qualidade da superfície de corte. Aço de baixa liga, 5 mm de espessura (Golyshev, Orishich e Shulyatyev 2017).

2.2.5.5. Modo temporal do feixe laser

A qualidade do corte é influenciada pela forma como a potência é transferida ao material a cortar. Em termos temporais, a potência disponibilizada pelo feixe laser pode ser transmitida de modo pulsado ou de modo contínuo, designado também por onda contínua (CW- *Continuous Wave*). No feixe contínuo, a potência depositada pelo laser é constante ao longo do tempo, sendo este o modo preferível para realizar cortes simples, profundos e/ou quando elevada produtividade é desejada (Steen e Mazumder 2010).

Contudo, existe dificuldade em manter a velocidade de corte constante durante todo o processo, principalmente quando são realizados cortes segundo contornos geometricamente complexos (Figura 46). Preservar a potência constante durante uma redução da velocidade de corte, resulta numa maior quantidade de calor transferida para a mesma região, ocorrendo o sobreaquecimento e possível queima do material. Isto inviabiliza a utilização do feixe contínuo para realizar contornos complexos, comprometendo não só a qualidade de corte, como também a precisão do processo. De forma a reduzir estes fenómenos é utilizado o modo pulsado (Figura 46).

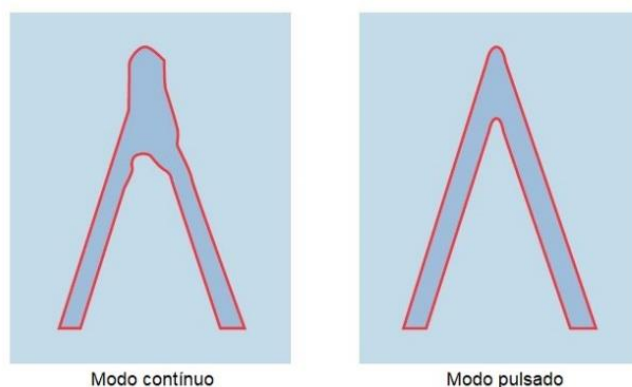


Figura 46 - Cortes complexos realizados para diferentes modos temporais de operação (Berkmanns e Faerber 2008a).

Durante o modo pulsado o feixe laser varia ciclicamente entre o estado *on* e o estado *off*. Quando ocorre o pico de potência, o laser funde o metal na frente de corte. Quando o laser está no estado *off*, o metal arrefece enquanto o feixe se movimenta e espera o próximo pulso para dar continuidade ao corte (Havrilla e Anthony 1999). Existem quatro principais modos de operação pulsada (Steen e Mazumder 2010):

Modo pulsado normal: Ciclos on/off, nos quais a amplitude de potência de pico é igual à amplitude disponibilizada pelo modo de onda contínua.

Modo Super-pulsado: Ciclos on/off, nos quais a amplitude de potência de pico é entre duas, a cinco vezes superior, à amplitude disponibilizada no modo de onda contínua.

Modo Q-Switching: Pulsos on/off ultracurtos (alguns nanossegundos), que atingem amplitudes cerca de 100 vezes superiores à amplitude de onda contínua.

Modo Hiper-pulsado: A onda contínua é mantida, contudo são gerados picos de potência ao longo do processo.

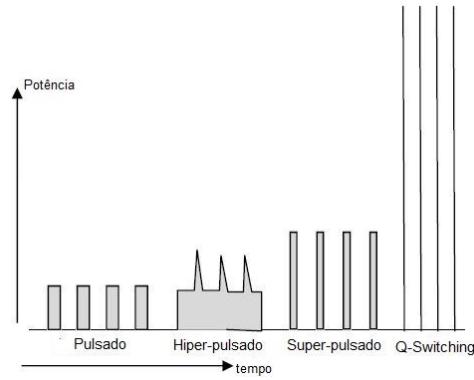


Figura 47 - Modos temporais de operação (Steen e Mazumder 2010).

Existem sistemas que compensam a redução da velocidade de corte, durante a realização de contornos complexos, alterando o modo temporal, de contínuo para pulsado, quando ocorre a respectiva desaceleração. Assim, o modo pulsado conserva a quantidade de energia fornecida a diferentes regiões, pelo ajuste entre a frequência de pulso e a velocidade de corte em tempo real. Nos sistemas onde não é possível alterar o modo temporal durante estas desacelerações, geralmente é empregue o modo pulsado durante todo processo (Steen e Mazumder 2010).

Os parâmetros que caracterizam o modo pulsado são: a frequência, o *duty-cycle* e a amplitude de potência. A frequência é calculada pela **Equação 2.10** e contabiliza o número de ciclos por unidade de tempo. O *duty-cycle* é dado pela **Equação 2.11** e contabiliza a fração do ciclo em que o laser está no estado *on*. A amplitude máxima é a potência de pico. No modo pulsado, uma vez que a potência não é constante ao longo do tempo, é utilizada a designação de potência média para caracterizar a potência do laser no processo. No modo pulsado normal, a potência média é igual ao produto entre a potência de pico e o *duty-cycle* (Havrilla e Anthony 1999).

$$f [Hz] = \frac{1}{T[s]} \quad \text{Equação 2.10}$$

$$duty - cycle [\%] = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} * 100 \quad \text{Equação 2.11}$$

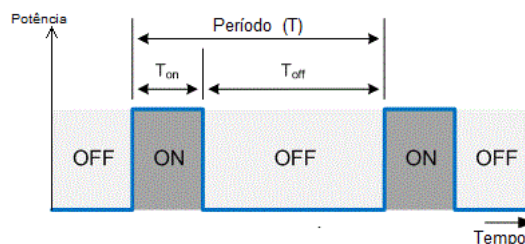


Figura 48 – Parâmetros do modo pulsado (Laser Lab Source 2017).

Caso o número de pulsos por unidade de tempo seja reduzido, as velocidades de corte máximas são diminuídas, uma vez que o material arrefece excessivamente entre os pulsos. Em adição, o excessivo arrefecimento do material aumenta a possibilidade de aparecimento de escória visto que a viscosidade do material fundido aumenta com a diminuição da temperatura, tornando mais difícil a expulsão do material da frente de corte (Kannatey-Asibu 2009).

2.2.6.Corte a laser de materiais metálicos

A tecnologia de corte a laser pode ser aplicada a todas as famílias de materiais. Cada material tem uma resposta distinta quando cortado com diferentes tipos de laser, existindo também materiais que não se adequam a este tipo de corte térmico. A adaptabilidade de um dado material a esta tecnologia depende, principalmente, das suas propriedades térmicas, óticas e físicas.

O corte a laser é mais adequado do que os processos mecânicos de corte, para processar materiais frágeis e de elevada dureza. Por outro lado, materiais com propriedades térmicas favoráveis ao corte a laser, como a baixa condutividade e o baixo coeficiente de expansão térmica, são os mais apropriados a este tipo de processamento (Gadallah e Abdu 2015). A condição superficial, os requisitos de calor para mudança de fase e a refletividade da frente de corte, são alguns dos principais factores que influenciam a interação feixe laser/material (Havrilla e Anthony 1999).

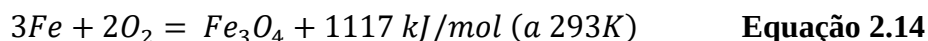
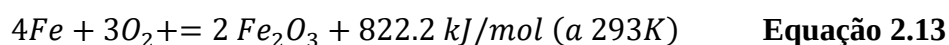
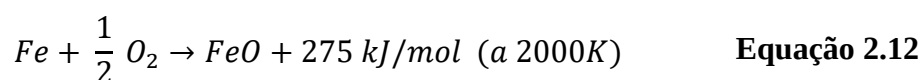
Aço ao carbono e aço inoxidável são os metais mais frequentemente processados por corte a laser, pois para além de serem dos materiais que melhor se adaptam ao processo, são dos mais utilizados na indústria metalúrgica e aplicados numa vasta variedade de produtos (Faro 2006). Nos aços ao carbono, a utilização de oxigénio como gás de assistência é a prática mais comum. A velocidade de corte pode ser substancialmente aumentada devido ao calor adicional gerado pela reação exotérmica entre o metal e o oxigénio (oxidação). Nestes materiais, a viscosidade do metal fundido diminui quando oxidado, otimizando assim o processo de expulsão do material da frente de corte e diminuindo a probabilidade de formação de escória aderente à aresta de corte inferior (Ion 2005; Kannatey-Asibu 2009). Contudo, esta oxidação pode resultar na deposição de uma camada de óxido ao longo de toda a superfície de corte comprometendo a qualidade. Para contornar esta perda de qualidade, gases inertes a elevadas pressões podem ser utilizados. A necessidade de elevadas pressões quando utilizado gás inerte, é justificada pelo facto da tensão superficial e da viscosidade destes metais ser superior à do respetivo óxido e assim é necessária maior capacidade de ejeção do material fundido, que é conseguida pelo aumento da pressão do gás auxiliar (Miyamoto e Maruo 1991).

Aços laminados a frio em geral originam menos problemas ao serem cortados a laser, uma vez que apresentam menos impurezas e composições com tolerâncias mais apertadas em relação aos aços formados a quente. Impurezas afetam a reação exotérmica e deterioram o estado da superfície de corte (rugosidade), devido ao rompimento de bolsas de impurezas no interior do metal durante o processo. Aços laminados a quente contêm uma camada superficial de óxidos. Esta camada atenua a reação química entre o oxigénio e o metal durante o processo, reduzindo a velocidade de corte, uma vez que parte do material já se encontra oxidada. Revestimentos em zinco, caso dos aços galvanizados, poderão também afetar negativamente o processo de corte, uma vez que o zinco reage exotermicamente com o oxigénio formando óxido de zinco, que apresenta maior dificuldade em escoar do interior da fenda, podendo também atear ou produzir fumos prejudiciais. Este efeito é tanto maior quanto maior for a espessura da camada de zinco do revestimento, originando superfícies rugosas e com alguma escória aderente (Ion 2005; Kannatey-Asibu 2009; Havrilla e Anthony 1999).

Atualmente, alguns produtores de materiais metálicos disponibilizam no mercado materiais especialmente concebidos para fins de corte a laser, controlando rigidamente a sua composição e as propriedades da superfície (Havrilla e Anthony 1999; Ion 2005).

- **Aço ao carbono**

Na maioria dos processos de corte a laser de aços ao carbono, o oxigénio é usado como gás de assistência para tirar partido da reação exotérmica gás-ferro, que ocorre aos 1227 °C, ligeiramente antes de ser atingido o ponto de fusão do metal, aproximadamente a 1500 °C (Havrilla e Anthony 1999; Caristan 2004). A potência calorífica gerada durante a reação dependerá da espessura do material, da pressão do oxigénio de assistência e da velocidade de corte (Caristan 2004). As reações exotérmicas que ocorrem durante o corte deste material com oxigénio como gás de assistência, podem ser descritas pela **Equação 2.12**, **Equação 2.13** e **Equação 2.14** (Sun e Brandt 2013).



Quando utilizado um laser com 1 kW de potência, a reação exotérmica gera cerca de 50 % de energia adicional. Consequentemente, para o mesmo diâmetro de feixe, a utilização de lasers com 2 kW e 4 kW de potência, reduz esta percentagem para 25 % e 12,5 %, respetivamente (Caristan 2004). De acordo com Caristan (2004), a análise às partículas expulsa pela fenda durante o corte a laser de um aço macio, demonstra existir uma proporção semelhante de partículas de ferro (Fe) e do respetivo óxido (FeO), sendo também possível identificar ligeiras quantidades de Fe₂O₃ e Fe₃O₄. O composto Fe₂O₃ forma um revestimento superficial fino ao longo da superfície de corte, abaixo do qual se encontra uma camada do composto Fe₃O₄, com uma espessura cerca de sete vezes superior à anterior. Ainda abaixo desta, encontra-se uma camada de FeO que se agrega em escamas e adere diretamente ao metal base, sendo cerca de cinco vezes mais espessa que a camada de Fe₃O₄. Este conjunto de camadas tornam a superfície de corte mais dura, no entanto a camada de FeO perde facilmente a aderência ao metal base e desintegra-se em forma de partículas (Caristan 2004).

Diferentes composições de aços ao carbono exibem diferentes respostas ao corte a laser, nomeadamente:

- Aço estrutural de baixo teor em carbono (~0.4 %C) é suscetível a microfissuras na ZTA. A presença de microfissuras diminui a resistência à fadiga do componente, no entanto, tratamentos térmicos posteriores, como o recozimento, possibilitam a correção das microfissuras resultantes do processo de corte (Caristan 2004).
- Aços com teor em carbono inferior a 0.15 %, apresentam-se praticamente livres de fissuras (Caristan 2004).
- Quanto maior for o teor em carbono de dado aço, melhor será a qualidade da superfície de corte. Contudo, esta apresenta-se mais dura e com maior tendência a microfissuras. Nestes materiais a ZTA é mais larga. Elevados teores em carbono reduzem também a velocidade de corte máxima e a capacidade de corte de espessuras elevadas (Kannatey-Asibu 2009; Havrilla e Anthony 1999).

- **Aços de liga**

Visto que a proporção de elementos de liga neste tipo de aço é controlada com precisão, os aços ligados adequam-se ao corte por laser, proporcionando na maioria dos casos cortes de elevada qualidade, nomeadamente superfícies praticamente perpendiculares e limpas (Kannatey-Asibu 2009). Os elementos de liga primários (Carbono, Crómio, Molibdénio, Níquel, Magnésio e Silício) afetam pouco a qualidade de corte, no entanto, interferem na reação exotérmica material-oxigénio (Havrilla e Anthony 1999). Abaixo é apresentada a influência de alguns elementos de liga no processo de corte a laser:

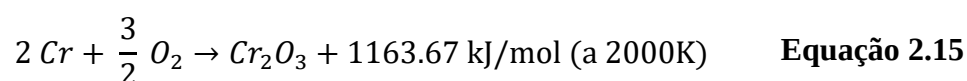
- A adição de Silício, que é frequente em materiais utilizados para aplicações elétricas, pois aumentam a resistência elétrica e a resistência à oxidação, prejudica a oxidação do ferro e aumenta a viscosidade do material fundido. Como consequência, há uma diminuição da velocidade de corte e um aumento da escória depositada na aresta inferior da superfície de corte, devido à dificuldade de expulsão do material fundido (Havrilla e Anthony 1999; Caristan 2004).
- A adição de elementos de liga em baixa quantidade, como o carbono ($C < 0.1 \%$), o manganês ($Mn < 0.3 \%$) e o enxofre ($S < 0.1 \%$), melhoram a maquinabilidade do material e têm pouca influência no processo de corte a laser. Caso a proporção destes elementos se aproxime do seu máximo ($C \sim 0.5 \%$, $Mn \sim 1.6 \%$ e $S \sim 0.3 \%$), há uma redução na reação de oxidação quando utilizado oxigénio como gás de assistência, pois ocorre a formação de gases como o CO_2 e SO_2 que diluem o oxigénio na frente de corte. Isto resulta numa maior viscosidade do material fundido, havendo maior dificuldade na expulsão do material da zona de corte e por isso mais escória e velocidades de corte reduzidas (Havrilla e Anthony 1999).
- A adição de Crómio diminui a reatividade do metal com o oxigénio, reduzindo as velocidades de corte e aumentando a escória aderente à aresta inferior do corte (Ion 2005).
- Corte a laser de ligas endurecíveis proporcionam arestas de corte martensíticas que são frágeis, no entanto geralmente livres de fissuras (Havrilla e Anthony 1999; Ion 2005).
- A maioria dos aços de ferramentas responde adequadamente ao processo de corte a laser, à exceção dos materiais com elevado teor em tungsténio (Série T e parte da Série H), uma vez que conservam grande parte do calor no seu estado fundido, resultando em baixas velocidades de corte e superfícies queimadas (Kannatey-Asibu 2009; Ion 2005; Havrilla e Anthony 1999).

- **Aço inoxidável**

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas com elevado conteúdo de cromo e níquel, possuindo, em geral, outros quatro a cinco elementos de liga em menor proporção. Ao contrário dos aços ao carbono, que a temperaturas abaixo da temperatura ambiente se tornam frágeis e suscetíveis à corrosão, o aço inoxidável mantém a ductilidade a baixas temperaturas tal como maior resistência à corrosão, contudo apresenta um preço de mercado superior (Granta Design 2020).

Quando é exposto à atmosfera, ocorre a formação natural de um filme protetor de óxido de cromo (Cr_2O_3) na superfície do metal, garantindo deste modo a elevada resistência à corrosão (Caristan 2004). O aço inoxidável apresenta baixa condutividade térmica quando comparado com os aços ao carbono, ou até mesmo com aços de liga e com o alumínio, possibilitando que a energia sob forma de calor se mantenha maioritariamente no seio da frente de corte, sem que seja dissipada para o material do substrato (Ion 2005).

Este material pode ser cortado a laser, tanto através do mecanismo de corte por fusão reativa como pelo mecanismo de corte por fusão, caso sejam utilizados gases reativos (Oxigénio, ar..) ou gases ditos inertes (Nitrógeno, Argon, Hélio...), respetivamente (Ion 2005). Uma vez que o oxigénio não reage de forma tão eficaz com o aço inoxidável como com os aços ao carbono, para a mesma espessura, as velocidades de corte máximas atingidas no corte de aço inoxidável são inferiores. Isto porque o cromo quando exposto ao oxigénio forma óxidos com elevada temperatura de fusão, que não se dissolvem no material que está fundido, isolando o ferro do fluxo de oxigénio de assistência, limitando assim a quantidade de calor adicional gerado durante a reação exotérmica metal-oxigénio (Havrilla e Anthony 1999; Caristan 2004; Ion 2005). A reação de oxidação do cromo é descrita pela **Equação 2.15** (Sun e Brandt 2013):



Como o óxido de cromo tem temperatura de fusão superior à do ferro, o filme de Cr_2O_3 , forma uma barreira sólida protetora em torno do material fundido. Esta barreira impede que o oxigénio penetre no seio do material fundido reduzindo assim o potencial da reação exotérmica. Uma vez que o cromo reage acentuadamente com o oxigénio, o cromo presente no seio do material tende a migrar para a superfície para reagir com o oxigénio. Isto resulta numa camada fundida, que resolidifica logo abaixo da camada de óxido de cromo superficial, com menos cromo do que o material do substrato. Caso existam microfissuras na camada superficial de óxido, a camada logo abaixo fica exposta à atmosfera e, como apresenta menos cromo, a superfície de corte vê diminuída a sua resistência à corrosão (Havrilla e Anthony 1999).

Como a tensão superficial do Cr_2O_3 é ligeiramente superior à tensão superficial do FeO , quando utilizado o mecanismo de corte por fusão reativa, o material tem mais dificuldade em ser expulso da frente de corte, aderindo à aresta inferior da fenda, formando escória (Havrilla e Anthony 1999; Caristan 2004).

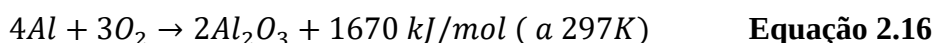
Os restantes elementos de liga presentes nos aços inoxidáveis podem também originar problemas na qualidade da superfície de corte e, por isso, gases inertes a elevada pressão são os mais utilizados para processar este material. Com este tipo de gases é possível produzir arestas de corte livres de óxidos e de escória, contudo o custo do processo aumenta, não só pelo superior consumo de gás devido à alta pressão, mas também pela velocidade de corte ser ligeiramente inferior devido à não existência da fonte de calor adicional da reação exotérmica (Havrilla e Anthony 1999; Ion 2005).

- **Alumínio**

O alumínio é um metal com baixa temperatura de fusão (~650°C) e, tal como indica a Figura 25 (página 27), a reação exotérmica alumínio-oxigênio liberta elevadas quantidades de energia. Por ambas as características, seria expectável que fosse possível realizar o corte a laser a altas velocidades (Ion 2005). Contudo, o alumínio tem outras propriedades que comprometem tanto a velocidade, como a qualidade de corte.

A alta condutividade térmica do alumínio faz com que o calor fornecido pelo feixe seja rapidamente dissipado da frente de corte, diminuindo a velocidade máxima e prejudicando a qualidade do corte (Ion 2005). Assim, esta propriedade tem repercussões na largura da zona termicamente afetada, uma vez que o calor é conduzido com maior facilidade para o material do substrato (Havrilla e Anthony 1999). A alta refletividade do alumínio, é outra das propriedades que limita o rápido processamento do alumínio, principalmente para os comprimentos de onda do laser CO₂ (10.6 µm), sendo necessária elevada densidade de potência para ser realizado o corte (Havrilla e Anthony 1999; Ion 2005).

O alumínio é um material no qual a corrosão ocorre rapidamente quando a sua superfície é exposta ao oxigênio presente na atmosfera. A reação do alumínio com a atmosfera, origina uma fina camada transparente de óxido (Al₂O₃) que se deposita na superfície do material, impedido que haja penetração da corrosão no seio do metal. A reação de oxidação do alumínio pode ser descrita pela **Equação 2.16** (Sun e Brandt 2013):



A formação deste óxido por parte do alumínio acarreta três principais dificuldades para o processo. Primeiramente, as variações de espessura do filme de óxido ao longo da superfície do alumínio originam diferentes níveis de absorção da energia depositada pelo feixe. Em segundo lugar, a formação do filme de óxido (Al₂O₃) em torno da poça de material fundido, limita a quantidade de calor gerado pela reação exotérmica (Ion 2005). Por último, a elevada temperatura de fusão do óxido de alumínio, que é superior a 2000 °C, e o rápido arrefecimento da poça de fusão devido à elevada condutividade térmica do alumínio, faz com que a viscosidade do material fundido seja elevada. Isto origina maior dificuldade na expulsão do material, resultando na formação de uma escória contínua na aresta inferior do corte (Havrilla e Anthony 1999). Estes são os principais factores que motivam a utilização de gás inerte no processamento de alumínio.

Os defeitos térmicos associados ao processamento de alumínio por corte a laser, limitam a utilização do processo em componentes estruturais, como é o caso do processamento das ligas aeronáuticas 2024 e 7075. Ligas de alumínio contendo manganês (séries 5000 e 7000) são mais facilmente cortadas a laser do que ligas de alumínio de baixa liga, caso das séries 1000 e 3000 (Ion 2005).

2.2.7. Qualidade de corte

São utilizados vários métodos para avaliar a qualidade de cortes realizados pelo processo de corte laser. A norma internacional EN-ISO 9013:2002, expõe especificações geométricas e tolerâncias de qualidade para processos de corte térmico. Esta norma apresenta tolerâncias para a rugosidade da superfície de corte e para a perpendicularidade da fenda, tolerâncias essas que são dependentes da espessura do material a cortar (European Committee for Standardization 2002). Contudo, a qualidade pode também ser avaliada por métodos alternativos, nomeadamente pela: largura da fenda, deposição de escória aderente na aresta inferior da superfície de corte, rugosidade da superfície de corte, largura da ZTA, deformação térmica do material, largura da camada resolidificada, entre outros. Serão agora aprofundados alguns dos métodos utilizados para avaliar a qualidade de cortes realizados pelo processo de corte a laser.

- **Largura da fenda de corte**

A largura da fenda é descrita como a distância, medida na aresta superior de corte, entre as duas superfícies formadas após a passagem do feixe laser (Wandera 2006; European Committee for Standardization 2002). Para materiais finos, esta largura pode atingir valores de 0.1 mm (Havrilla e Anthony 1999). Contudo, a largura da fenda pode ser aumentada propositadamente para materiais espessos, através da desfocagem do feixe laser, de forma a facilitar a expulsão do material fundido.

Porém, é desejável manter a largura da fenda o mais reduzida possível, de forma a garantir a precisão necessária para realizar contornos finos. A largura da fenda é principalmente influenciada pela geometria do feixe laser à superfície do material - que é função da fonte laser, da unidade ótica e da posição focal. Por outro lado, a velocidade de corte, a potência, o tipo e a pressão do gás auxiliar, têm também influência neste parâmetro de qualidade (Wandera 2016).

Na Figura 49 é possível analisar a influência da posição de focal na largura da fenda. O posicionamento do foco distante da superfície, aumenta a largura da fenda devido ao aumento da área da mancha focada sobre o material e, em alguns casos, impede que a penetração total seja conseguida, uma vez que diminui a densidade de potência à superfície (Wandera e Kujanp 2010).

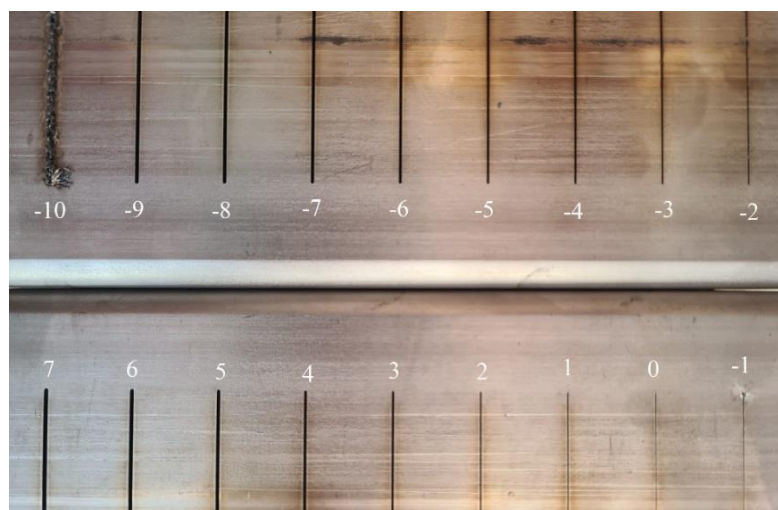


Figura 49 – Influência da posição do plano de foco na largura da fenda de corte. Posição 0: plano de foco à superfície do material. Posição 7: plano de foco 7 mm acima da superfície. Posição -10: Plano de foco 10mm abaixo da superfície.

Kongcharoen e Suchatawat (2016), investigaram a influência da velocidade de corte, da potência do laser e da pressão do gás de assistência na largura da fenda, para o corte de aço macio com 3 mm de espessura, utilizando um laser CO₂. Concluíram que a largura da fenda diminui com a diminuição da potência do laser e com o aumento da velocidade de corte. Verificaram também que o efeito da pressão do gás depende da potência, ou seja, para baixas potências (2000 W), a largura da fenda diminui com o aumento da pressão. Para potências mais elevadas (2400 W) há um aumento da largura da fenda com o aumento da pressão (Kongcharoen e Suchatawat 2018).

Ghany e Newishy (2005), estudaram o efeito do modo temporal do feixe, da velocidade de corte, da potência do laser, da pressão e tipo de gás de assistência, na largura da fenda, durante o corte de aço inoxidável austenítico com 1.2 mm de espessura, utilizando um laser Nd:YAG. Concluem que a utilização de Azoto (gás inerte), resulta numa fenda mais estreita em comparação à obtida utilizando oxigénio (gás reativo). Em adição, o aumento da velocidade de corte reduz substancialmente a largura da fenda, enquanto o aumento da potência, do *duty-cycle* e da pressão do gás, resulta em fendas mais largas (Ghany e Newishy 2005).

Um estudo realizado por Goppold *et al.* (2014) analisa a influência da geometria do feixe laser na largura da fenda de corte. Para tal, foi utilizado um laser de fibra com 3 kW para cortar aço inoxidável austenítico (AISI 304), no qual foi alterada a unidade ótica, nomeadamente a lente de focagem e o diâmetro do núcleo de fibra ótica ($\varnothing_c$). Ambas as alterações acarretam, não só uma variação na área da mancha focada, como também na profundidade de foco (L). Foi concluído que no corte de espessuras até 6 mm, a largura da fenda é mínima quando utilizadas manchas focadas de área reduzida (o que corresponde a uma profundidade de foco menor). Para espessuras superiores, manchas focadas de maior área, embora resultem num aumento da largura da fenda, a sua perpendicularidade é elevada, visto que o feixe é menos difuso (maior profundidade de foco) (Goppold et al. 2014).

- **Perpendicularidade da fenda de corte**

A perpendicularidade da fenda (u) é definida como a maior distância medida na perpendicular, entre a superfície de corte obtida e a superfície pretendida (Wandera 2006; Ion 2005). A medição da perpendicularidade deve ser realizada numa área limitada da superfície de corte, área esta reduzida pela dimensão (Δa - Redução de espessura), a partir da aresta da superfície superior e inferior, como indica a Figura 50 (European Committee for Standardization 2002).

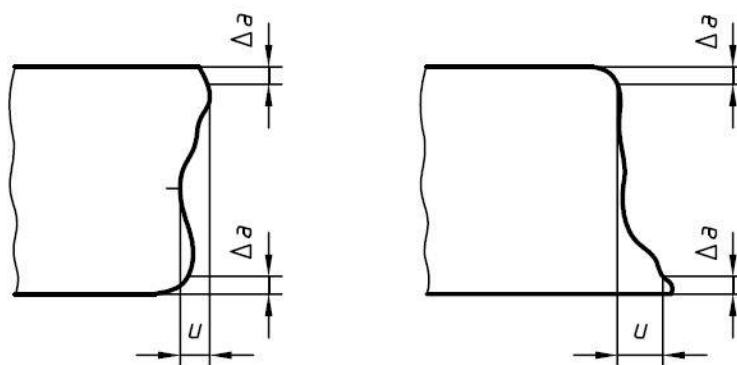


Figura 50 - Perpendicularidade da fenda de corte (u) (European Committee for Standardization 2002).

A norma EN-ISO 9013:2002, define classes de qualidade para diferentes valores de perpendicularidade da fenda, bem como valores para a redução de espessura (Δa). As classes de qualidade são numeradas pela norma de 1 a 5, sendo a número 5 a pior qualidade. Tal como indica a Figura 51, os intervalos das respectivas classes dependem da espessura do material a cortar, sendo mais abrangentes para espessuras superiores.

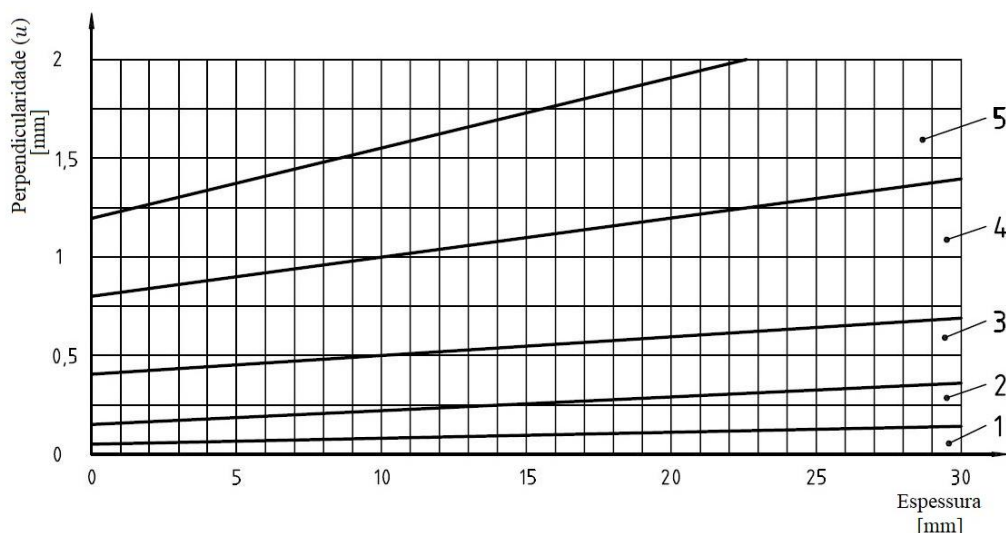


Figura 51 - Classes de qualidade em função da perpendicularidade da fenda. Norma EN-ISO 9013:2002 (European Committee for Standardization 2002).

Os parâmetros do processo que mais influenciam a perpendicularidade da fenda são os parâmetros relacionados com a geometria do feixe laser (Goppold et al. 2014). Assim sendo, a posição focal e a distância focal da lente de focagem, devem ser ajustadas à espessura do material a cortar, de forma a garantir elevada perpendicularidade da fenda de corte.

- **Estado da superfície de corte**

Uma das desvantagens do processo de corte a laser é a formação de estrias que surgem como irregularidades cíclicas ao longo da superfície de corte, comprometendo a qualidade final dos produtos. As estrias são linhas praticamente retas, com uma ligeira inclinação face ao eixo do feixe laser. Para materiais finos (< 2 mm de espessura), as estrias permanecem regulares ao longo de toda a espessura, contudo para materiais mais espessos, podem existir diferenças entre o padrão das estrias numa região superior e numa região inferior da superfície de corte (Ivarson et al. 1994; Sun e Brandt 2013).

Caso existam 2 regiões estriadas distintas (Figura 52), a região superior é onde ocorre a penetração direta do feixe no material, na qual se observa um padrão cíclico de estrias praticamente verticais, uma vez que o escoamento do material fundido é laminar. A zona mais abaixo é a região de expulsão, ou de arrasto, onde presumivelmente ocorre a separação do escoamento (Figura 53 (a)), transitando de regime laminar para turbulento (Wandera 2016). Esta região da superfície apresenta-se, em geral, com sulcos mais pronunciados, aleatórios e menos verticais, devido à solidificação do material fundido em regime turbulento sobre as paredes da fenda (Sun e Brandt 2013).

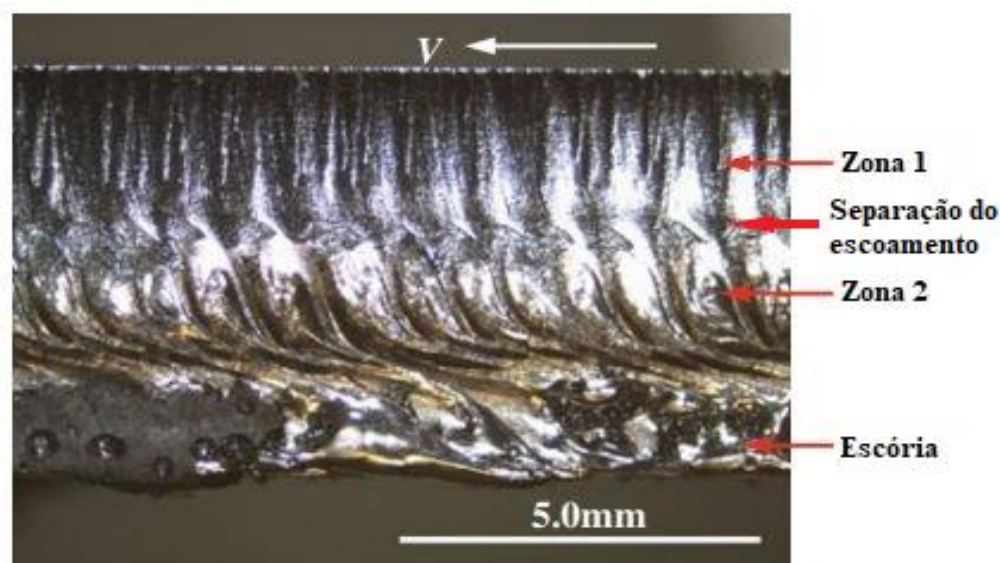


Figura 52 - Diferentes padrões de estrias na superfície de corte. Zona 1: Região de penetração direta (escoamento laminar); Zona 2: Região de expulsão/arrasto (escoamento turbulento). Adaptado de (Sun e Brandt 2013).

Wandera, Salminen e Kujanp (2009), investigaram a influência da posição focal na profundidade de separação do escoamento e na formação de estrias, através do corte de aço inoxidável e de alumínio. Na Figura 53 (b) são demonstrados os resultados obtidos nesta investigação, onde é visível a influência da posição focal na qualidade da superfície, nomeadamente no corte de aço inoxidável com 10 mm de espessura.

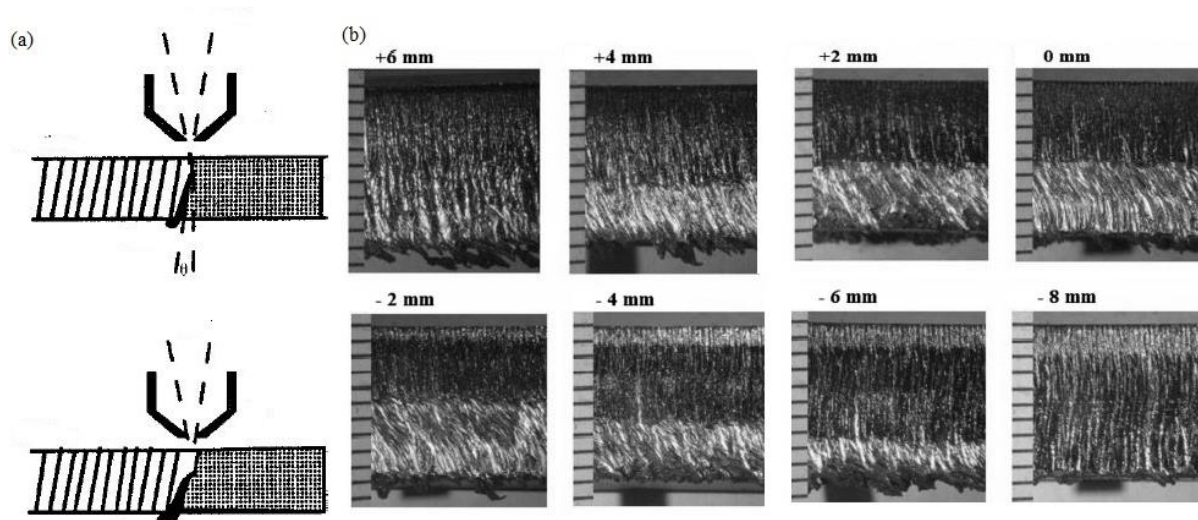


Figura 53 – (a): Separação do escoamento (Steen e Mazumder 2010). (b): Influência da posição focal na formação de estrias e na profundidade de separação do escoamento. Aço inoxidável, 10 mm de espessura (Wandera, Salminen e Kujanp 2009).

A formação de estrias cíclicas tem sido um tema bastante investigado, contudo ainda não existe plena compreensão do mecanismo dinâmico que está na origem das estrias, sendo motivo

de controvérsia entre investigadores (Steen e Mazumder 2010; Sobih, Crouse e Li 2007; Sun e Brandt 2013). A explicação habitualmente aceite, baseia-se na variação cíclica da reação de oxidação durante o corte, quando utilizados gases reativos no processo. Este ciclo consiste em 3 etapas: a ignição, a expansão e a extinção (Farson, Ready e Feeley 2001; Wandera 2006; Steen e Mazumder 2010). No caso do aço ao carbono, a interação entre o feixe laser, o oxigénio e o material, resulta numa rápida ignição do material na frente de corte. A frente de calor expande para lá do diâmetro do feixe, até que arrefece e ocorre a sua extinção. O deslocamento do laser, faz com que o ciclo recomece, através da ignição do material não fundido, gerando assim o padrão cíclico de estrias, como demonstrado na Figura 54. As estrias serão mais visíveis para velocidades de corte reduzidas e para pressões de oxigénio superiores, visto que há tendência a uma maior expansão da frente de calor, devido ao aumento da interação feixe/material e ao aumento de oxigénio no meio, respetivamente (Wandera 2006).

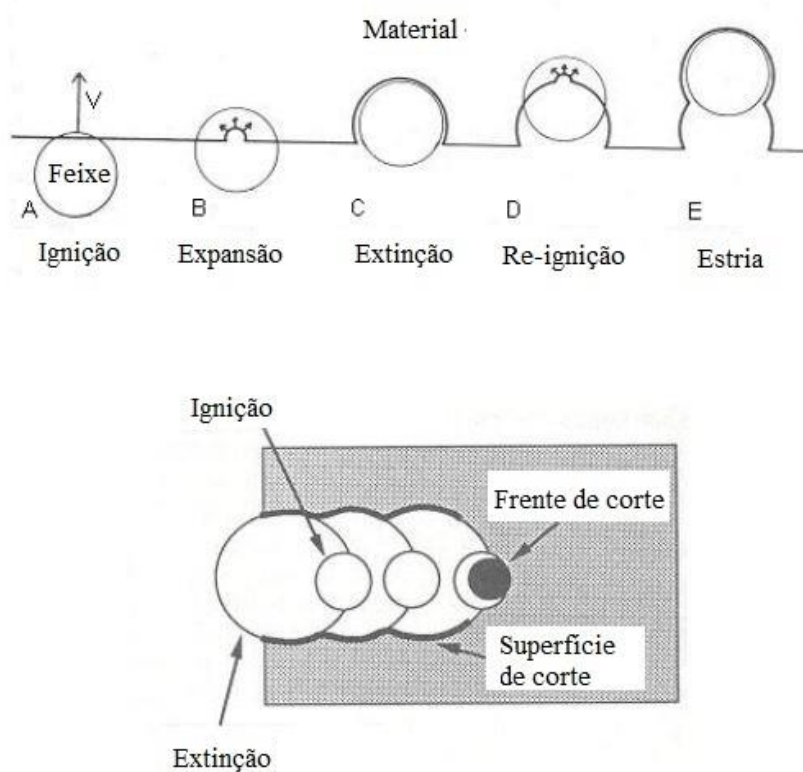


Figura 54 - Representação esquemática da formação de estrias no processo de corte a laser, pelo mecanismo de corte por fusão reativa. Adaptado de (Wandera 2006).

No corte a laser utilizando gás inerte, uma vez que a reação de oxidação é reduzida ou inexistente, a possibilidade de formação de estrias é inferior, sendo associada à instabilidade térmica e hidrodinâmica do processo (Sun e Brandt 2013). A instabilidade térmica acontece devido a possíveis flutuações na potência laser emitida pela fonte e absorvida/refletida pelo material. A hidrodinâmica está relacionada com variações associadas ao escoamento do material fundido e do gás de assistência dentro da fenda (Sun e Brandt 2013).

Para que seja obtida uma superfície de corte o mais uniforme possível, o escoamento do metal fundido deve ser mantido laminar ao longo de toda a espessura do material. Para tal, a profundidade de separação do escoamento deve ser superior à espessura do material a cortar. O

aumento da profundidade de separação, de acordo com Sun e Brandt (2013), pode ser conseguido através:

- Aumento da pressão do gás inerte;
- Aumento do diâmetro do bico;
- Aumento da temperatura da superfície do material fundido (menos viscosidade);
- Aumento da largura da fenda.

Sulcos/estrias profundas afetam a qualidade da superfície de corte, uma vez que aumentam a sua rugosidade. A profundidade das estrias aumenta com o aumento da espessura do material e da pressão de gás, caso seja usado um gás reativo. Por outro lado, esta profundidade diminui com o aumento da velocidade de corte, quer seja utilizado um gás reativo ou inerte (Sun e Brandt 2013).

A rugosidade da superfície é um dos parâmetros indicados pela norma EN-ISO 9013:2002, para avaliar a qualidade de corte de um processo térmico. A norma utiliza a média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz_5), como parâmetro de avaliação. Este é calculado através das médias das alturas máxima do perfil (Zt_i), medidas em 5 comprimentos de base (l_r) consecutivos, compreendidos num comprimento de avaliação (L_n) de 15 mm, tal como indica a Figura 55 (European Committee for Standardization 2002; Morais 2015).

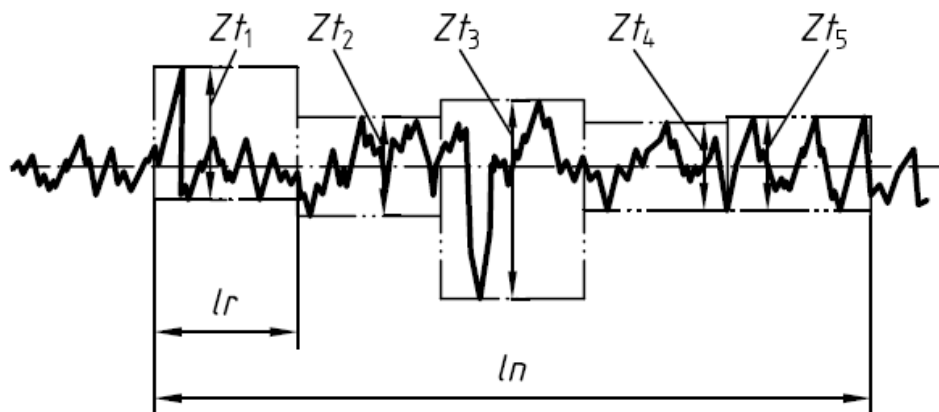


Figura 55 - Média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz_5) (European Committee for Standardization 2002).

A norma EN-ISO 9013:2002 indica níveis de qualidade para diferentes valores de Rz_5 , de acordo com a espessura do material a cortar, tal como o faz para a perpendicularidade da fenda. Esses níveis são apresentados na Figura 56.

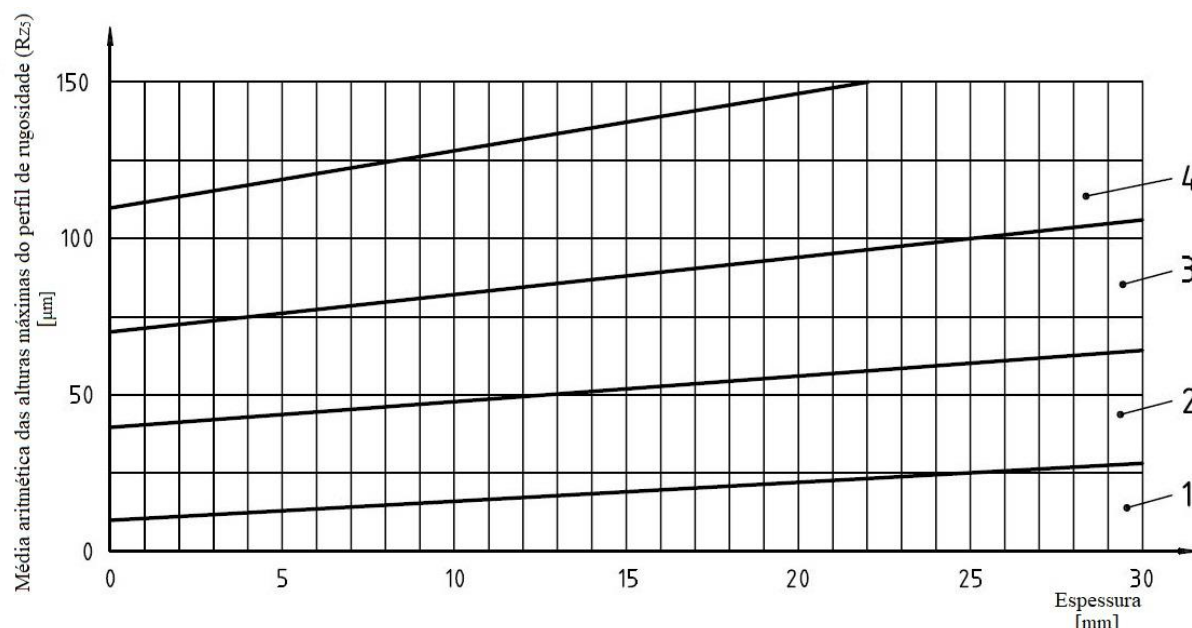


Figura 56 – Classes de qualidade em função da rugosidade (Rz_5). Norma EN-ISO 9013:2002 (European Committee for Standardization 2002).

- **Escória aderente**

A escória aderente pode ser definida como a solidificação do material ou dos seus óxidos, na aresta inferior da superfície de corte. Materiais fundidos que ostentem elevada tensão superficial e elevada viscosidade, apresentam maior dificuldade em serem expulsos da fenda através do arrasto provocado pelo gás de assistência a alta pressão, tendo tendência a aderir à aresta inferior de corte, formando a escória (Wandera 2016). A velocidade de escoamento do material fundido diminui ao longo da espessura do material, o que resulta numa sobreposição de material fundido na aresta inferior de corte, aumentando a espessura da poça de fusão nesta região e a tendência a aderir sobre forma de escória (Wandera 2016).

Os parâmetros do processo mais influentes na formação de escória aderente são os parâmetros relacionados com a expulsão do material. A presença de escória aderente é indicativa de má qualidade e, por isso, parâmetros como a posição focal, o tipo/diâmetro do bico, a velocidade de corte, a pressão e tipo de gás de assistência, devem ser ajustados de forma a melhorar a expulsão do material fundido (Wandera 2016).

Um estudo realizado por Wandera (2016), demonstrou a influência da pressão do gás inerte de assistência na expulsão do material fundido, durante o corte de aço inoxidável com 10 mm de espessura, utilizando um laser de fibra com 4 kW de potência. Como resultado (Figura 57), verificou-se que o aumento da pressão do gás diminuiu a formação de escória aderente, justificando pelo aumento da profundidade de separação do escoamento (Wandera 2016).

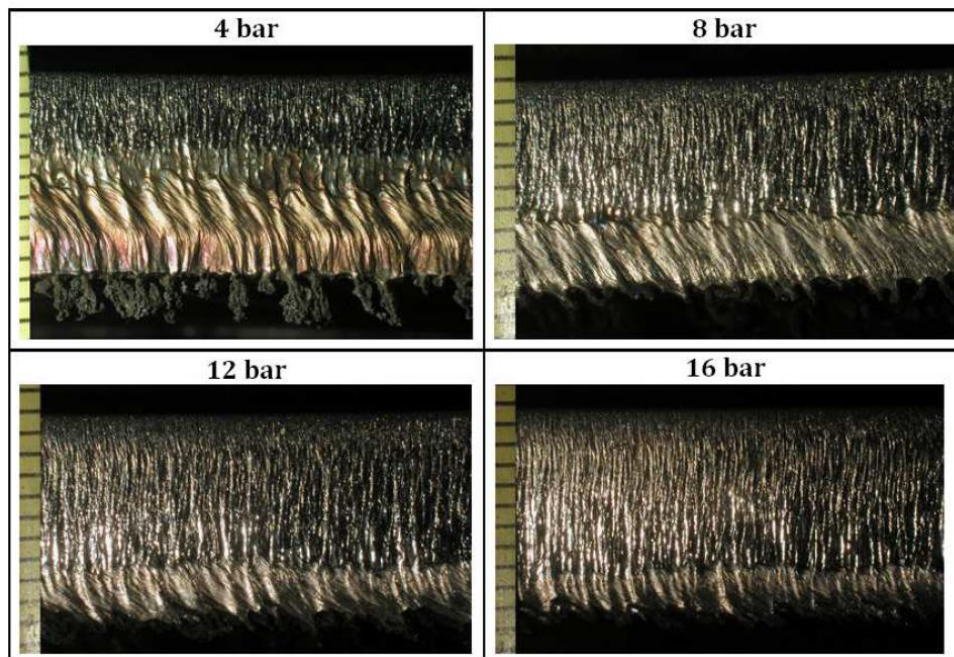


Figura 57 - Influência da pressão do gás de assistência (Azoto), no corte de aço inoxidável com 10 mm de espessura. Laser de fibra 4 kW, distância focal 190 mm, diâmetro do bico 2.5 mm, posição focal -8 mm, velocidade de corte 1 m/min (Wandera 2016).

- **Zona termicamente afetada (ZTA) e camada resolidificada (CR)**

A natureza térmica do processo de corte a laser induz, numa região próxima à fenda de corte, modificações metalúrgicas ao material que não foi fundido pelo laser. Essa região é designada como zona termicamente afetada (ZTA), onde surgem alterações microestruturais e nas propriedades mecânicas do material, sendo a minimização destas alterações, um método de avaliação da qualidade de corte. O calor gerado durante o processo e o posterior arrefecimento do material, poderão resultar numa diminuição da resistência à fadiga, fissuração da superfície e distorções na ZTA, sendo desejável otimizar os parâmetros do processo que garantem a redução da dimensão desta região (Miraoui, Boujelbene e Zaied 2016).

Para além da ZTA, outro parâmetro de qualidade avaliado devido à natureza térmica do processo, é a largura da camada resolidificada (CR). Esta camada resulta do material que foi fundido, contudo não foi expulso da fenda e, por isso, arrefece e solidifica aderindo às paredes da fenda de corte (Goppold et al. 2020).

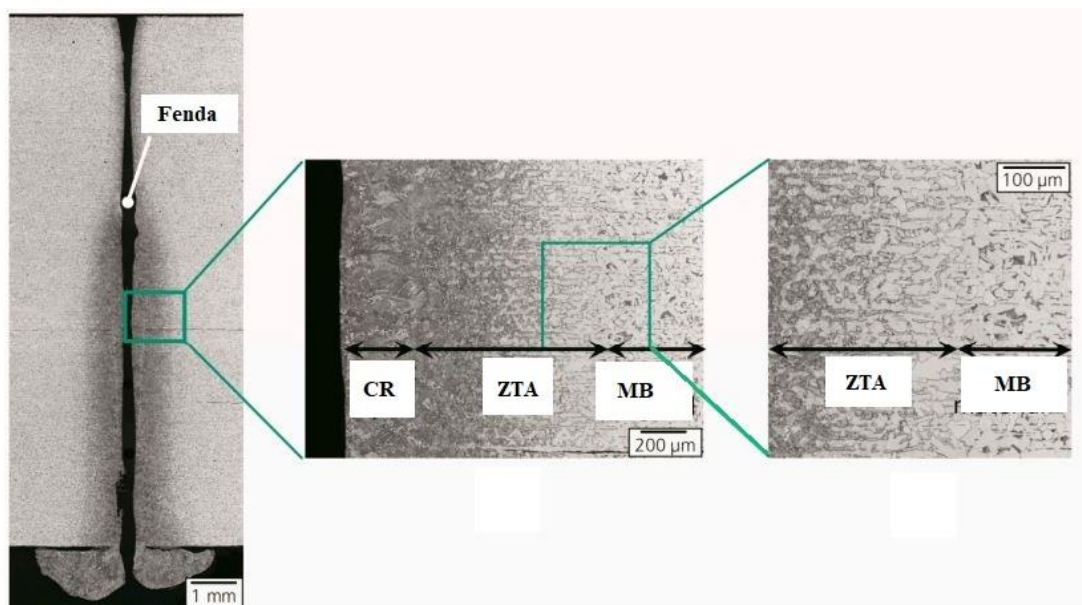


Figura 58 - Identificação da camada resolidificada (CR), zona termicamente afetada (ZTA) e material base (MB). Corte de aço macio com 12 mm de espessura (Goppold et al. 2020).

Um corte de elevada qualidade é aquele que não apresenta camada resolidificada e onde a ZTA é mínima (Goppold et al. 2020). A ZTA será proporcional ao calor fornecido por unidade de comprimento e por unidade de espessura do material e, por isso, os parâmetros relacionados com o fornecimento de calor, tal como: a potência, a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência (quando reativo), são os principais influentes na dimensão da ZTA.

Miraoui, Boujelbene e Zaied (2016), investigaram a influência dos parâmetros do processo, nomeadamente: potência do laser, velocidade de corte e diâmetro da mancha focada, na dimensão da ZTA, na largura da camada resolidificada e na alteração das propriedades mecânicas da ZTA, nomeadamente a microdureza. Utilizando um laser CO₂, com potência máxima de 5 kW, para cortar aço de construção com 8 mm de espessura, concluíram que a potência do laser e a velocidade de corte são os parâmetros mais influentes no tamanho da ZTA, aumentando com o aumento da potência e, diminuindo, com o aumento da velocidade. Relativamente à camada resolidificada, a sua largura foi diminuída com o aumento da velocidade de corte, com a diminuição de potência e com a diminuição do diâmetro da mancha focada. Quanto à microdureza da ZTA, foi verificado um ligeiro aumento em relação ao material base (MB), sendo esse aumento mais pronunciado pelo aumento da potência ou pela diminuição do diâmetro da mancha e da velocidade de corte (Miraoui, Boujelbene e Zaied 2016).

- **Outros parâmetros de qualidade**

Para além dos parâmetros abordados, são também empregues outros métodos para avaliar a qualidade do processo de corte a laser. Um dos parâmetros unicamente relacionado com o corte a laser de tubos, é a escória que se deposita na superfície interior do tubo, superfície oposta à face de corte, tal como sugere a Figura 59. Uma vez que os tubos apresentam uma secção transversal de geometria fechada, as partículas de material expulso da fenda de corte, não tendo por onde escapar, acabam por aderir à superfície interior do tubo formando uma carepa, que afeta o estado desta superfície.

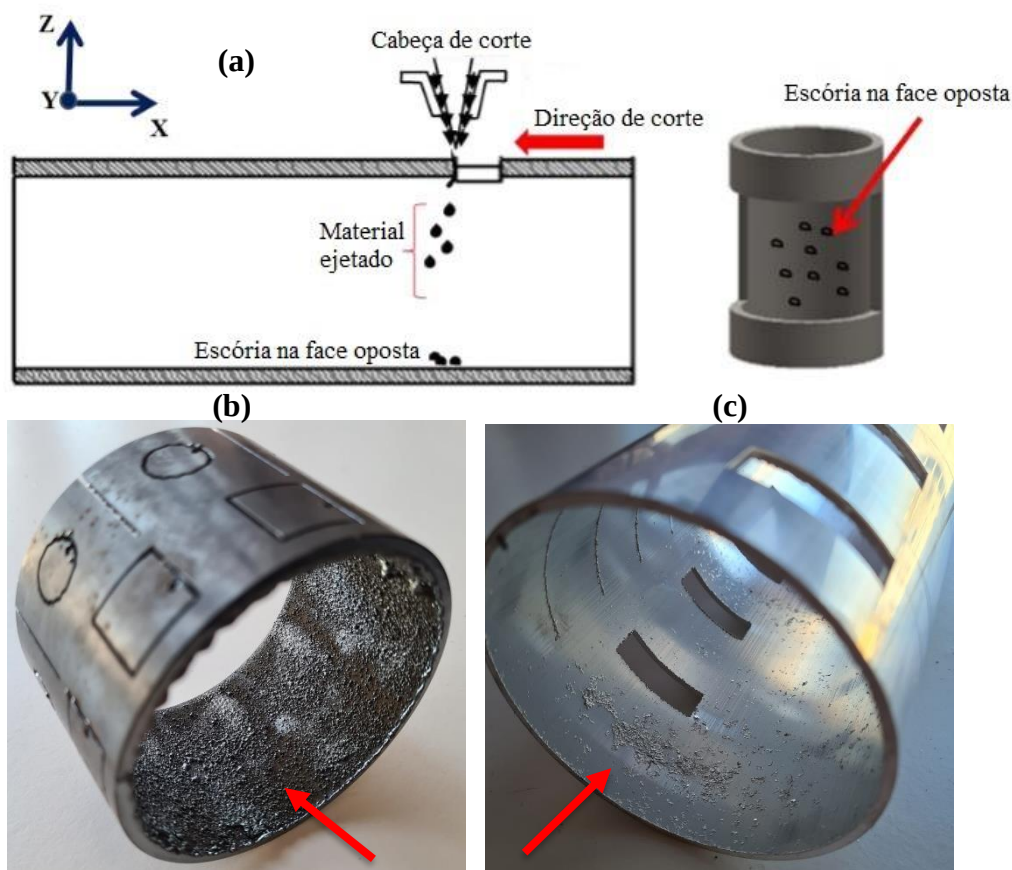


Figura 59 – Contaminação da superfície interior do tubo. (a): Representação esquemática (García-López et al. 2018); (b): Exemplo para aço de construção; (c): Exemplo para Alumínio.

Outro indicativo de baixa qualidade de corte, no processo de corte a laser de tubos, é a degradação térmica da superfície interior do tubo. Após a formação da fenda, uma porção do feixe laser incide sobre a superfície interior da face oposta à face de corte. Uma vez que a posição da mancha focada se distancia significativamente desta superfície, a densidade de potência do laser é de tal forma reduzida que impossibilita o corte, contudo afeta termicamente o material. Isto suscita defeitos térmicos, nomeadamente: a degradação estética (alteração da cor), alterações microestruturais e das propriedades mecânicas do material nestas regiões.

Na Figura 60 (b) é apresentado este defeito no corte de um tubo em aço inoxidável. O aço inoxidável é revestido por um filme de óxido de cromo fino e invisível a olho nu, camada que garante a sua elevada resistência à corrosão (Tuthill e Avery 1999). As marcas de descoloração térmica, indicam a presença de uma camada mais espessa e com composição modificada (mistura de óxidos de ferro, de cromo e de níquel), resultado da elevação da temperatura do

material (Powell e Jordan 2005; Tuthill e Avery 1999). Diferentes cores surgem para diferentes espessuras desta camada, que são função da temperatura atingida pelo material como também do tempo de exposição a essa temperatura (McGuire 2008). A elevação da temperatura resulta na difusão do crómio do material do substrato para a superfície. Por sua vez, há diminuição do teor em crómio na camada logo abaixo à do óxido e, como consequência, perda de resistência à oxidação da região descolorida (Tuthill e Avery 1999). A região descolorida é por isso designada como uma zona termicamente afetada (ZTA) que deve ser reduzida de forma a garantir boa qualidade de corte.

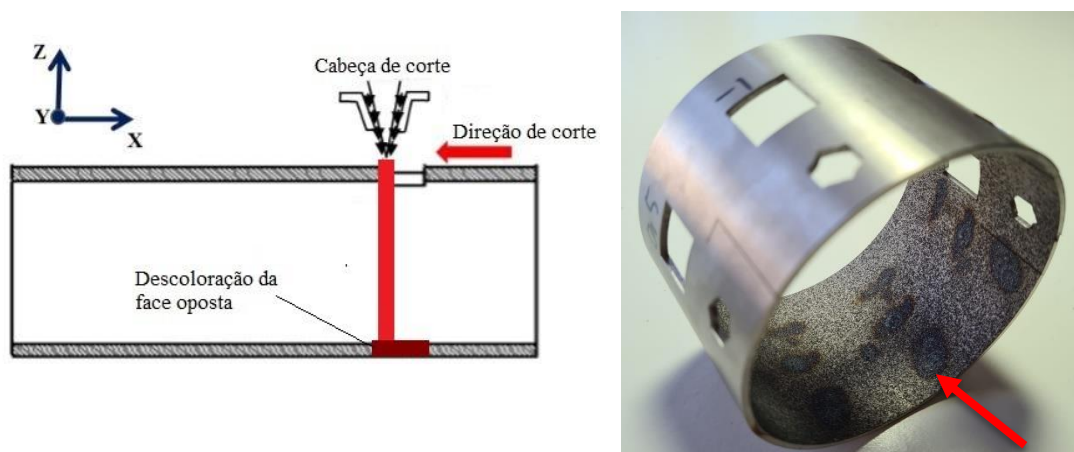


Figura 60 – Degradação térmica no corte a laser de tubos. (a): Representação esquemática. Adaptado de (García-López et al. 2018); (b): Exemplo para aço de inoxidável (AISI 304).

Para minimizar a quantidade de escória depositada na superfície interior do tubo, várias máquinas são equipadas com sistemas de aspiração que, a partir da base do tubo, absorvem quer os fumos, quer parte do material expulso da fenda, evitando que se deposite na superfície interior. Contudo estes sistemas, não só perdem eficácia durante o processamento de tubos mais cumpridos e mais espessos, como também não evitam a degradação térmica provocada pelo feixe laser quando incide sobre a superfície interior do tubo.

Posto isto, as máquinas de mais avançada tecnologia são munidas com sistemas próprios para evitar a degradação/contaminação do interior do tubo, quer pelo feixe laser, quer pelo material expulso da fenda. Estes sistemas consistem numa colher ou num dispositivo aspiração que são inseridos no interior do tubo a partir do topo, durante o processo (Figura 61). Deste modo, não só é possível melhorar a qualidade dos produtos, como também minimizar a necessidade de processos de limpeza posteriores ao corte laser (BLM Group 2019).

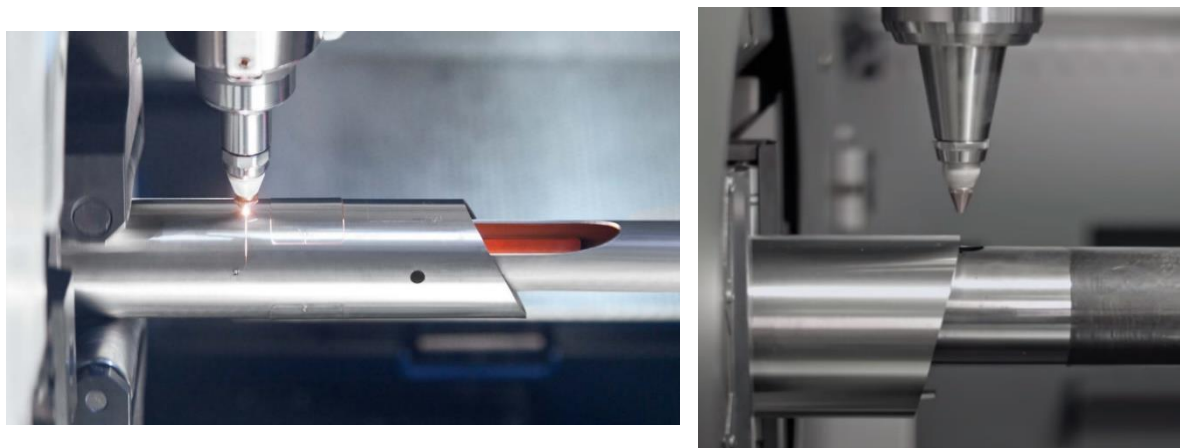


Figura 61 - Sistemas de extração de detritos. (a): Colher de extração (TRUMPF 2016); (b): Dispositivo de aspiração (BLM Group 2016).

Para concluir o tema da qualidade do corte a laser de materiais metálicos, na Tabela 8 são resumidos os possíveis defeitos que possam surgir devido à escolha indevida dos parâmetros do processo.

Tabela 8 - Defeitos relacionados com a escolha indevida dos parâmetros do processo (Eltawahni 2011).

Parâmetro do processo	Reduzida	Elevada
Potência Laser	-Fenda estreita; -Perda de penetração;	-Fenda alargada; -Aumento da camada refundida, da escória aderente e da ZTA; -Estrias pronunciadas;
Velocidade de corte	-Fenda alargada; -Aumento da camada refundida, da escória aderente e da ZTA; -Estrias pronunciadas; -Menos perpendicularidade da fenda;	-Fenda estreita; -Perda de penetração;
Posição focal	-Fenda alargada; -Aumento da camada refundida, da escória aderente e da ZTA; -Perda de penetração;	-Fenda alargada; -Aumento da camada refundida, da escória aderente e da ZTA; -Perda de penetração;
Pressão do gás de assistência	-Escória aderente; -Ejeção inadequada do material fundido; -Fenda parcialmente fechada;	-Estrias pronunciadas; -Erosão da parte inferior do corte; -Superfície de corte queimada;
Distância <i>stand-off</i>	-Estrias pronunciadas;	-Escória aderente;
Diâmetro do bico	-Dificuldade na centragem do feixe; -Ejeção inadequada do material fundido; -Fenda parcialmente fechada;	-Escória aderente; -Elevado consumo de gás; -Aumento da camada refundida, da escória aderente e da ZTA (utilizando gás reativo);

2.2.8.Corte a laser de tubos

O corte a laser de tubos é um processo utilizado pela indústria metalúrgica, para cortar secções estruturais ocas. Os materiais têm a sua própria rigidez e resistência, no entanto podem ser manipulados para que se tornem estruturalmente mais eficientes, por exemplo, fornecendo-lhes uma forma. Eficiência estrutural é definida pela capacidade de uma estrutura suportar esforços com o mínimo de peso possível (Ashby 2011). Os tubos são exemplos de elementos estruturais eficientes, pois são mais capacitados a suportar determinados esforços quando comparados com elementos de secção sólida com o mesmo peso.

Posto isto, os tubos têm vindo a ser aplicados em vários tipos de estruturas, desde mobiliário a estruturas de habitações, estruturas de máquinas, aparelhos desportivos, pontes, veículos, plataformas de petróleo, entre outras. Os tubos podem apresentar-se com várias secções transversais, no entanto as mais comuns são as secções: circulares, quadrangulares e retangulares. A escolha da secção mais adequada para um dado projeto dependerá do tipo de solicitação a que a estrutura será disposta.

O corte a laser de tubos é uma tecnologia que veio revolucionar a forma como estas secções estruturais são processadas. O corte a laser garante que o número de etapas de processamento seja diminuído, como também proporciona superior qualidade de corte, quando comparado com outros processos convencionais. As máquinas de corte a laser de tubos possibilitam o corte de tubos ao longo de toda a sua secção (cortes 360°), como também a furação, marcação ou até a realização de contornos geometricamente complexos sobre as superfícies do tubo. Isto garante flexibilidade aos produtores, possibilitando a exploração de novas soluções de design para os seus produtos, tornando-se, assim, mais habilitados a satisfazer e cativar clientes. Por outro lado, a elevada automatização do processo, o rápido deslocamento do feixe laser e a não necessidade de troca de ferramentas durante a realização destes diferentes processos, possibilitam um aumento na produtividade e a redução dos custos de produção.

A tecnologia de corte a laser de tubos possibilita várias inovações no desenvolvimento de produtos, como por exemplo:

- Realizar de ligações curvadas a partir de tubos retos, sem necessidade de aplicação de outros processos, tal como apresentado na Figura 62 (a).
- Pela capacidade de realizar cortes em chanfro, permite preparar componentes para posterior aplicação de operações de soldadura, com o mínimo desperdício de material (Figura 62 (c) e (d)).
- Realizar cortes que auxiliem no posicionamento de componentes, para facilitar a montagem de conjuntos.
- Realizar cortes que funcionem como encaixe para ligações entre tubos, como demonstrado na Figura 62 (b) .
- Reproduzir contornos geometricamente complexos na superfície do tubo, sendo por isso aplicado no desenvolvimento de componentes estéticos, como os da Figura 62 (e) e (f).



Figura 62 - Aplicações do corte a laser de tubos. (a) - Ligação curvada (TRUMPF 2021); (b) - Encaixe (TRUMPF 2021; Jensen e Petersen 2012); (c) e (d) - Corte em chanfro para posterior aplicação de soldadura (TRUMPF 2021); (e) e (f) - Componentes estéticos (Hunkjet Technocraft 2019).

As máquinas de corte a laser de tubos disponíveis no mercado são, na maioria dos casos, constituídas por quatro módulos distintos, como sugere a Figura 63. O conjunto dos quatro módulos garante que o processo seja completamente automatizado, sem qualquer necessidade de intervenção por parte do operador.

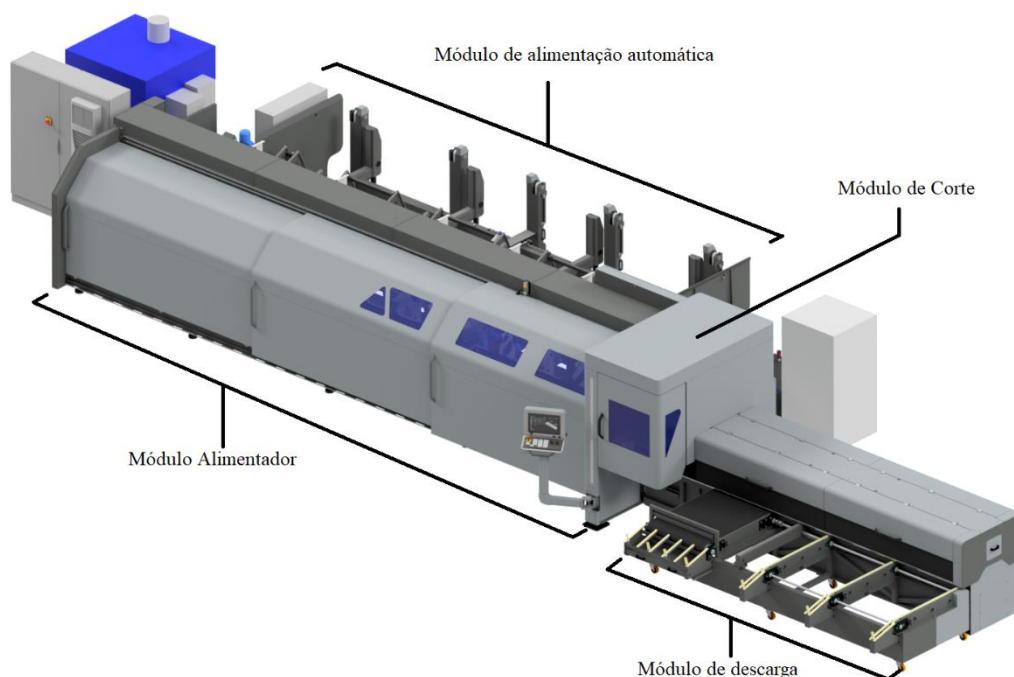


Figura 63 - Máquina de corte a laser de tubos. Disponibilizado pela AMOB.

As funções de cada um dos módulos são descritas abaixo:

- **Módulo de alimentação automática:**

As máquinas de corte a laser de tubos apenas processam um tubo de cada vez. No módulo de alimentação automática são posicionados vários tubos, que serão fornecidos individualmente ao módulo alimentador. Finalizado o processamento de um dado tubo, um dos tubos presentes no módulo de alimentação automática, é medido em comprimento através de sensores e transportado automaticamente para o módulo alimentador para ser processado.

O módulo de alimentação automática é limitado por peso, pelo que o peso da totalidade de tubos em espera, não deve exceder esse limite.

- **Módulo alimentador:**

O módulo alimentador é o módulo que suporta e manipula o tubo em processamento, alimentando-o à zona de corte. É constituído por três principais elementos que suportam e movimentam o tubo durante o seu processamento, nomeadamente: a bucha, a luneta e os sustentadores.

A bucha aperta o tubo numa das suas extremidades e realiza dois movimentos: uma translação e uma rotação. A translação permite que o tubo seja alimentado ao módulo de corte e a rotação permite movimentá-lo, radialmente, em relação à cabeça de corte.

A luneta é o elemento que suporta o tubo numa região próxima à zona de corte. Esta apenas tem o movimento de rotação, que é solidário ao movimento de rotação da bucha. O aperto do tubo na luneta é realizado através de rolos, garantindo-lhe liberdade de translação longitudinal. Tanto o movimento da luneta como os movimentos da bucha, são geralmente realizados por servomotores.

Os sustentadores são elementos de suporte da estrutura do tubo, que se movimentam verticalmente e evitam a flecha originada pelo peso próprio de tubos compridos. No corte de tubos de secção circular, os sustentadores mantêm-se estáticos ao longo do processo. Contudo, para tubos de secção quadrada ou retangular, estes recuam e avançam mediante a rotação do tubo, evitando assim que ocorram colisões entre os sustentadores e a estrutura do tubo. De forma a poder acompanhar as elevadas velocidades de rotação da bucha e da luneta, os sustentadores são geralmente movimentados por atuadores pneumáticos.

Outro elemento presente no módulo alimentador são os centradores, que garantem o alinhamento do tubo entre a bucha e a luneta. Este elemento não tem qualquer função durante o processamento do tubo, no entanto é indispensável para que a alimentação automática seja possível.

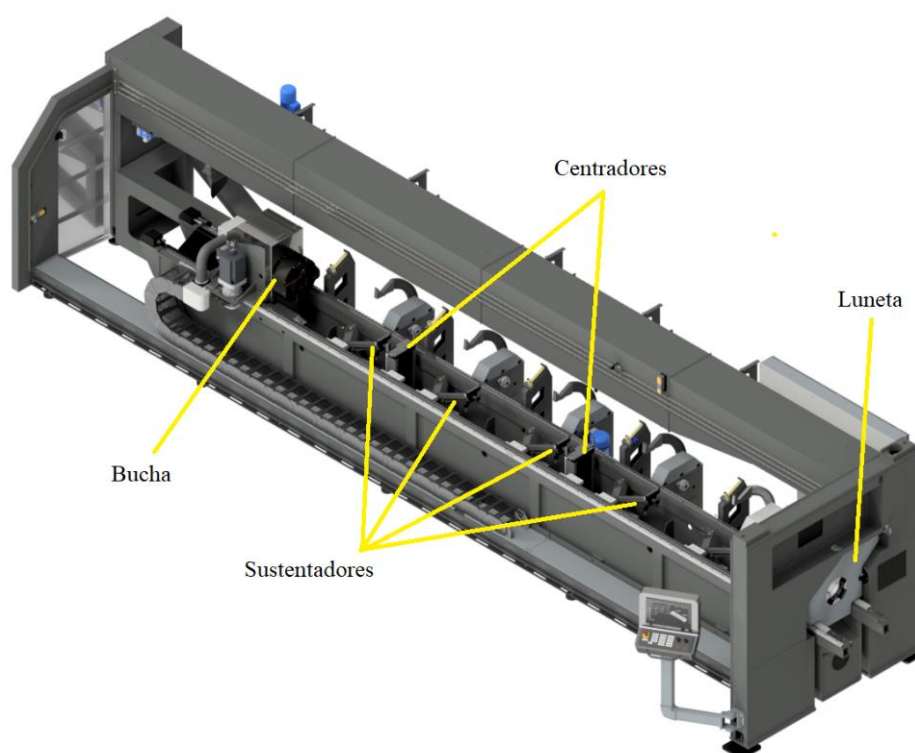


Figura 64 - Módulo alimentador de uma máquina de corte a laser de tubos. Disponibilizado pela AMOB.

- **Módulo de corte**

No módulo de corte está localizada a cabeça de corte, cabeça que direciona o feixe laser para o material a cortar. Os eixos que influenciam o posicionamento relativo entre a cabeça de corte e o material a cortar, serão designados no presente trabalho por eixos principais e são apresentados na Figura 65. Os eixos de manipulação do tubo são apenas dois, a rotação e translação longitudinal - eixo C e X da Figura 65. Estes estão associados ao movimento da bucha (X e C) e da luneta (C), elementos do módulo alimentador.

A cabeça de corte apresenta também movimentos de translação e em alguns casos de rotação. Existem soluções construtivas para máquinas de corte a laser de tubos, onde a cabeça de corte apenas tem eixos de translação, nomeadamente a translação vertical e horizontal - eixo Z e Y da Figura 65, respetivamente. Este tipo de solução designa-se por corte bidimensional (2D). Para além destes eixos, as soluções tecnologicamente mais avançadas, incorporam ainda um eixo de rotação da cabeça - eixo B da Figura 65. Esta solução é designada por corte tridimensional (3D).

Para além dos eixos principais referidos, as máquinas de corte a laser de tubo apresentam outros eixos, como os de aperto da bucha, da luneta e dos centradores, elevação dos sustentadores e centradores, entre outros. Uma vez que esses eixos não influenciam o posicionamento do feixe laser em relação ao material durante o processo de corte, esses serão aqui designados como eixos secundários, contudo são indispensáveis para o devido funcionamento deste tipo de máquinas.

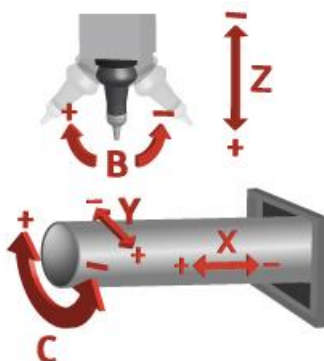


Figura 65 - Eixos principais de uma máquina de corte a laser de tubos (COREMARK Metals 2020).

A principal diferença entre o corte bidimensional e o corte tridimensional, é que o corte tridimensional possibilita que sejam realizados cortes em chanfro mantendo a superfície de corte inclinada, garantido, assim, superior qualidade a este tipo de produtos, tal como demonstrado na Figura 66. Isso não é possível no corte bidimensional, uma vez que o plano de corte é sempre mantido perpendicular à superfície do tubo, resultando em superfícies incoerentes face à direção de corte. Isto é verificado quer no corte de tubos de secção circular, quer no corte de tubos de secção quadrada e retangular, nomeadamente na passagem do laser pelas suas arestas laterais.

No corte tridimensional (3D), muitas vezes designado por corte 2.5D, a inclinação da cabeça de corte é limitada aos 45°. Esta inclinação só deve ser realizada em operações estritamente necessárias, uma vez que resulta numa diminuição da densidade de potência à superfície do tubo, resultando na diminuição da velocidade de corte máxima e em alguns casos na perda de penetração.

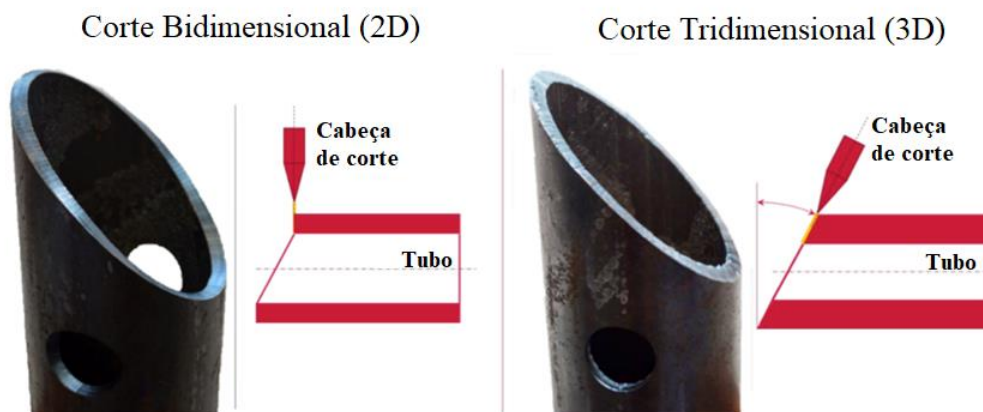


Figura 66 - Corte bidimensional e tridimensional na realização de contornos em chanfro. Tubos de secção circular (Kloekner Metals UK 2016).

Apesar das novas soluções de design possibilitadas pelo corte tridimensional, a introdução de um eixo adicional à cabeça de corte resulta num aumento significativo do custo do equipamento. Isto justifica-se não só pela necessidade de introduzir mais um motor e respetiva transmissão, como também pela necessidade de utilização de cabeças de corte tecnologicamente mais avançadas e com menor inércia.

- **Módulo de descarga**

O módulo de descarga garante que os tubos processados sejam retirados da máquina sem necessidade de intervenção humana. Logo após o processamento, os tubos encontram-se a temperaturas elevadas, suscitando perigos para o manuseamento manual por parte do operador. Assim sendo, este módulo é introduzido à máquina para que o processo de descarga seja automatizado.

Após a passagem do tubo pela zona de corte, este é empurrado para o módulo de descarga pela bucha, módulo este que está diretamente ligado ao módulo de corte. Na zona de descarga existem também sustentadores, tal como no módulo alimentador, que suportam a frente do tubo garantindo, assim, que este se mantém alinhado com a bucha e com a luneta enquanto o corte não é finalizado.

Finalizado o corte, o tubo processado é descarregado pela lateral da máquina, para um tapete rolante, através da inclinação dos sustentadores do módulo de descarga.

Para além do módulo de descarga acima descrito, as máquinas de corte a laser de tubos podem apresentar outras soluções para efetivar a descarga. No corte de porções de tubos com dimensões inferiores, estes são geralmente descarregados diretamente no módulo de corte, onde as partes cortadas caem para dentro de gavetas localizadas abaixo da região de corte. Contudo, a descarga realizada por esta via não é totalmente automatizada e as peças processadas são retiradas manualmente da gaveta pelo operador.

O mercado de máquinas de corte a laser de tubos é dominado por empresas como a Trumpf, BLM, Bystronic, Mazak e Nukon. Todas estas marcas comercializam máquinas que se baseiam na solução construtiva apresentada anteriormente, onde podem ser distinguidos os quatro módulos mencionados. As principais diferenças entre os modelos comercializados assentam no tipo de fonte laser que incorporam, no limite de peso e de dimensões dos tubos que processam, no número de eixos, na velocidade máxima dos eixos e no software CAM utilizado para definição dos códigos CNC. Algumas destas máquinas são configuradas não só para o corte de tubos, mas também para o corte de outros perfis estruturais, nomeadamente perfis em U, perfis em L, em I, etc.

Relativamente ao tipo de laser, estão disponíveis no mercado soluções que integram lasers CO₂, lasers de estado sólido e lasers de fibra. A potência dos lasers comercializados por estas marcas vai de 1 kW, até 10 kW, sendo que a fonte laser integrada na máquina, define a sua capacidade de corte em espessura. Na Figura 67 é apresentada a capacidade de corte dos diferentes lasers de fibra integrados na máquina LC5, comercializada pela BLM. Posteriormente, na Tabela 9 são comparadas algumas especificações de máquinas para corte a laser de tubos, disponíveis no mercado.

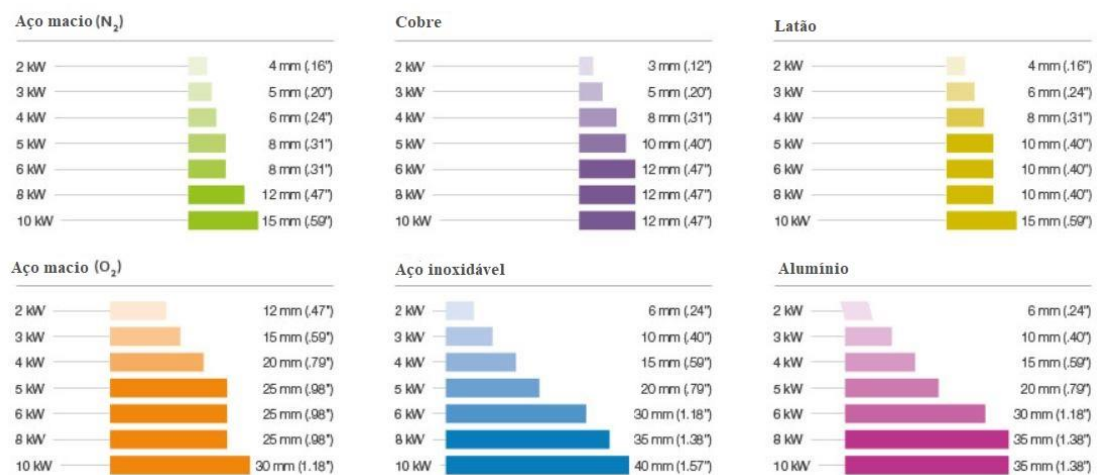


Figura 67 - Capacidade de corte, em espessura, para diferentes fontes laser de fibra. Máquina LC5 da BLM (BLM Group 2021).

Tabela 9 - Comparação entre máquinas de corte a laser de tubos disponíveis no mercado.

Marca	BLM	Trumph	Nukon	Bystronic
Modelo	LT7	TruLaser Tube 5000	NK-T160	ByTube 130
Laser				
Tipo de Laser	Laser de Fibra	Laser CO ₂	Laser de Fibra	Laser de Fibra
Potência máxima [kW]	3	2 ; 2.7 ; 3.2	1 ; 2 ; 3	2 ; 3
Especificações da máquina				
Materiais	Aço macio/ Inox / Alumínio / Cobre / Latão	Aço macio/ Inox / Alumínio	Aço macio/ Inox / Alumínio / Cobre / Latão	Aço macio/ Inox / Alumínio / Cobre / Latão
Secção dos Perfis	circular; quadrada; retangular; aberta; especial	circular; quadrada; retangular	circular; quadrada; retangular; aberta; especial	circular; quadrada; retangular; oval
Comprimento do alimentador [mm]	6500 ; 8500	6500 ; 8000	6500	6500 ; 8500
Comprimento da descarga [mm]	4500 ; 6500 ; 8500	3000 ; 4500 ; 6500 ; 8000	-	2000 ; 4000; 6000
Dimensões máximas da secção [mm]	Ø152.4 / 152.4x152.4	Ø152 ; Ø170 / 152x152 ; 170x170	Ø226 / 160x160; 200x100	Ø130 / 130x130
Peso máximo do tubo [Kg/m]	23	25	35	17
Movimentação da cabeça de corte	3D	3D	2D ; 3D	2D
Software CAD/CAM	Artube	TruTops	Lantek	TubeMaster

2.3. Parametrização do processo

2.3.1. Planeamento de experiências (DoE)

O planeamento de experiências ou desenho de experiências (DoE - *Design of Experiments*), é um procedimento experimental fundamentado em métodos estatísticos e empregue no desenvolvimento de produtos ou processos, com base nas necessidades e exigências do consumidor (Ross 1996).

No que diz respeito à aplicação deste procedimento no desenvolvimento de processos de fabrico, a metodologia estatística associada ao DoE permite compreender qual a influência dos parâmetros do processo (factores) nas variáveis de resposta em análise - como por exemplo nas características de qualidade do produto obtido – através de um número reduzido de ensaios experimentais. Este procedimento de experimentação tem como objetivo diminuir e controlar a variabilidade dos processos e produtos, de forma a aumentar a produtividade e reduzir os custos (Moura 2016; Ross 1996).

Os factores de entrada (*inputs*) relacionados com um processo, podem ser caracterizados como controláveis ou de ruído (Moura 2016). Os factores controláveis são aqueles que podem ser manipulados premeditadamente e os de ruído são aqueles que, apesar de influenciarem a resposta, não conseguem ser controlados. O DoE consiste num conjunto de experiências onde são variados um ou mais factores controláveis segundo valores específicos (níveis) e medidas as variáveis de resposta obtidas (*outputs*). Os resultados são depois tratados estatisticamente de modo a determinar quais as combinações entre níveis, que garantem respostas próximas às desejadas e robustez no processo, ou seja, o mínimo de influência dos factores de ruído. Na Figura 68 é apresentado um modelo generalizado das variáveis que controlam a resposta de um processo.

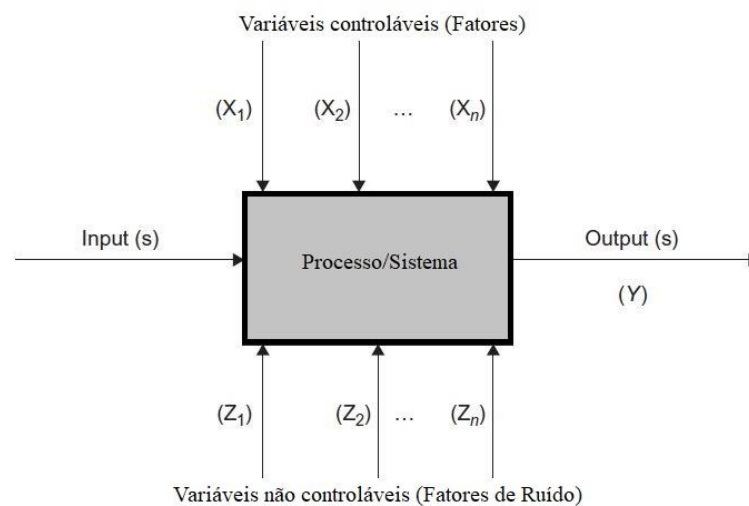


Figura 68 – Representação das variáveis (*inputs*) que controlam a resposta (*outputs*) de um processo/sistema. Adaptado de (Rodrigues 2013).

Os objetivos da aplicação de um procedimento DoE, de acordo com Rodrigues (2013), podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- Determinar quais os factores de entrada X que mais influenciam a resposta Y;
- Determinar os níveis de X que melhor conduzem à resposta Y pretendida;
- Determinar os níveis de X que garantem menor variabilidade em Y;

- Determinar os níveis de X que asseguram menos influência dos factores de ruído Z, na variável Y.

A metodologia de DoE foi inicialmente desenvolvida por Ronald Fisher, em meados da década de 1920, para aplicações do setor de produção agrícola. Fisher tinha como objetivo determinar a influência de vários fertilizantes em diferentes porções de terreno. A aplicação do DoE permitiu-lhe diferenciar os efeitos dos fertilizantes, dos efeitos de outros fatores relacionados com o terreno (ruído). Desde então, esta metodologia tem sido utilizada como ferramenta de otimização de processos e adaptada a diferentes áreas da engenharia (Ross 1996). Investigadores como Stuart Hunter, George Box, Donald Behnken e Genichi Taguchi contribuíram para desenvolvimento da metodologia DoE praticada por Fisher, introduzindo diferentes métodos de execução e análise às experiências (Moura 2016). Posto isto, o planeamento de experiências (DoE) pode ser realizado seguindo diferentes estratégias, entre as quais se destacam:

- Desenho Fatorial;
- Desenho Fatorial Fracionado;
- Metodologia da superfície de resposta;
- Método de Taguchi;
- Método de Box-Behnken;
- Plano composto central;
- Método de Plackett e Burman;

O procedimento de aplicação de um DoE é dividido em três fases principais, independentemente da estratégia utilizada. Essas três fases são:

1. Planeamento da experiência;
2. Realização da experiência;
3. Análise aos resultados;

Estão disponíveis no mercado softwares estatísticos (Minitab, JMP) que auxiliam no planeamento e análise aos resultados das experiências, com base nas diferentes estratégias abordadas (Moura 2016). Estas são ferramentas intuitivas e dispensam um aprofundado conhecimento do método estatístico em questão, sendo por isso amplamente utilizadas em diversos setores, para aplicação das metodologias DoE.

2.3.2.Método DoE de Taguchi

Genichi Taguchi desenvolveu uma estratégia de planeamento experimental (DoE), introduzindo um modelo matemático que compara os custos com os limites especificados. Para Taguchi um produto de elevada qualidade é aquele que garante menos perdas para a sociedade, ou seja, o que garante menor custo associado à sua produção, como também a maior satisfação por parte dos clientes, através do desenvolvimento de produtos com características consistentes. Assim, elevada qualidade é definida pela menor variação nas características do produto.(Ross 1996).

Uma das diferenças entre a filosofia de Taguchi para as restantes filosofias convencionais associadas ao DoE, é que os produtos de maior qualidade são os que acarretam menores custos, ao contrário de algumas filosofias convencionais, onde aos produtos de maior qualidade estão muitas vezes associadas a maiores despesas (Ross 1996).

De forma a descrever esta filosofia, Taguchi elaborou um modelo matemático que relaciona as características desejadas ao produto, com os custos associados não só à produção, como também aos custos relacionados com o uso dos produtos por parte dos clientes (reparações,

desgaste...). Este modelo é designado por função de perda (Figura 69) e é uma função quadrática que descreve o aumento exponencial da perda monetária à medida que as especificações do produto se afastam do objetivo pretendido (T). A função de perda pode ainda ser delimitada por dois pontos, o limite inferior (LI) e o limite superior (LS), limites estes que definem a perda monetária tolerada (A), tanto pelo consumidor do produto, como pelo respetivo produtor.

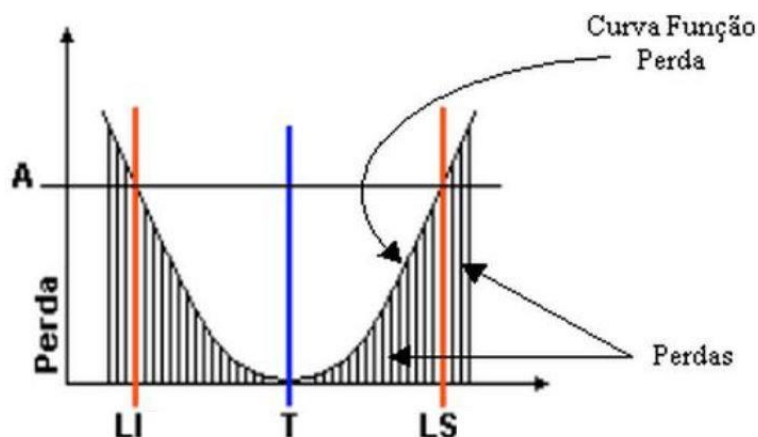


Figura 69 - Função de perda de Taguchi (Rodrigues 2013).

Uma das vantagens da aplicação deste método é a capacidade de reduzir drasticamente o número de ensaios experimentais (Amaral et al. 2019). Para tal, o método de Taguchi utiliza matrizes ortogonais a fim de otimizar processos/produtos, com o mínimo de dados experimentais, diminuindo assim o custo associado às etapas de experimentação. Nos arranjos ortogonais, a cada nível de um dado factor, correspondem todos os níveis dos restantes factores o mesmo número de vezes, possibilitando o isolamento do efeito desse factor dos restantes (Rodrigues 2013). A seleção do arranjo ortogonal adequado a um dado procedimento experimental, de acordo com Ross (1996), depende:

1. Do número de factores e de interações entre factores em análise;
2. Do número de níveis admitidos para cada um dos factores;
3. A resolução desejada para a experiência e limitações de custo.

Os primeiros dois pontos definem o arranjo ortogonal mais reduzido, possível de aplicar a um dado procedimento experimental. Contudo, o arranjo de menores dimensões é aquele que fornece pior resolução (Ross 1996). Os arranjos ortogonais podem ser divididos em dois principais grupos: arranjos de dois níveis (L4, L8, L16, L32) e arranjos de três níveis (L9, L18, L27). O número do respetivo arranjo dita a quantidade de diferentes combinações de factores controláveis admitidos por cada matriz. Por exemplo, para completar uma experiência que segue um arranjo L4, serão necessários 4 ensaios com diferentes combinações de factores controláveis.

O procedimento adequado para realizar um planeamento de experiências (DoE), de acordo com Ross (1996), deve seguir as etapas abaixo enumeradas.

- Planeamento da experiência:
 1. Referenciar o (s) problema (s);
 2. Referenciar o (s) objetivo (s);
 3. Determinar a(s) característica(s) de qualidade a medir e os respetivos instrumentos de medição;
 4. Determinar quais os factores controláveis que poderão influenciar as características de qualidade a medir;
 5. Identificar os factores controláveis e os factores de ruído;
 6. Selecionar os níveis para os factores controláveis;
 7. Selecionar o arranjo ortogonal adequado;
 8. Determinar as interações entre factores que poderão afetar as características de qualidade em análise;
 9. Associar os factores à matriz ortogonal.
- Realização da experiência:
 10. Conduzir os ensaios descritos pela matriz ortogonal.
- Análise aos resultados:
 11. Analisar e interpretar os resultados dos ensaios realizados;

As etapas 4 e 5, são das etapas mais importantes do procedimento DoE, pois caso os fatores influentes sejam inalterados durante a experiência, não serão verificadas diferenças significativas nas características de qualidade em análise e o procedimento DoE terá de ser repetido, variando outro conjunto de factores controláveis (Ross 1996). Relativamente ao ponto 6, a determinação dos níveis de cada um dos factores controláveis, tem por base o conhecimento técnico do processo/produto por parte de quem realiza o planeamento da experiência. Assim sendo, é aconselhável que esta etapa seja feita por um profissional com conhecimento sobre o processo/produto, de forma a determinar um intervalo de níveis, dentro do qual se encontrarão os níveis que conduzem às características finas desejadas. Os níveis devem ser ordenados de forma crescente e, caso seja utilizada uma metodologia de experimentação com mais de dois níveis, estes devem estar igualmente espaçados (Ross 1996).

Relativamente à análise aos resultados, etapa 11, o método de Taguchi permite a otimização dos parâmetros do processo através de duas etapas. A primeira etapa consiste na avaliação da robustez do processo pela análise aos factores Sinal/Ruído, onde é possível determinar a combinação de parâmetros que diminui a variabilidade, ou seja, que diminui os efeitos dos factores não controláveis (factores de ruído). A combinação dos factores controláveis que garante a maximização dos factores Sinal/Ruído, é aquela que garante mais robustez ao processo. Numa segunda etapa, através da análise às médias das respostas, é possível identificar a combinação de parâmetros que garante uma média próxima ao valor desejado (Minitab® 2021). A análise de variância (ANOVA) é também um método proposto por Taguchi para análise aos resultados (Amaral et al. 2019). A ANOVA é uma ferramenta estatística que possibilita identificar se a resposta é afetada pela variação dos factores controláveis, para um nível de significância predefinido, geralmente 5% ou 10 %. Esta ferramenta possibilita também identificar a percentagem de contribuição de cada um dos factores controláveis, nas variáveis de resposta observadas durante o ensaio experimental (Minitab® 2021).

Várias investigações sobre o processo de corte a laser utilizaram o método de Taguchi para estudar a influência dos parâmetros do processo na qualidade final de corte. Amaral et al. (2019), utilizaram o método para determinar quais os parâmetros de corte, entre: potência do laser, velocidade de corte e pressão do gás de assistência; que influenciam e otimizam a rugosidade da superfície de corte e a altura da escória aderente à aresta inferior desta superfície. Através do corte de aço inoxidável (AISI 304) e aço macio (St12) com um laser de fibra, concluíram que a pressão do gás é o parâmetro que mais afeta em ambas as características de qualidade em analisadas.

Dubey e Yadava (2008), aplicaram o método de Taguchi para determinar quais os níveis de: velocidade de corte, pressão do gás de assistência, frequência de pulso e *duty-cycle*; que minimizam a largura da fenda e aumentam a taxa de material removido. Utilizando um laser pulsado Nd:YAG com 200 W de potência para cortar um aço ligado com silício, verificaram que tanto a velocidade de corte como o *duty-cycle* e a interação entre ambos, afetam a largura da fenda. Relativamente à taxa de remoção de material, a pressão do gás demonstrou ser o parâmetro menos influente entre os restantes em análise (Kumar Dubey e Yadava 2008).

Nigade (2016), realizou a otimização dos parâmetros do processo para o corte de aço macio utilizando um laser CO₂ com 2 kW de potência. Aplicando a metodologia de Taguchi determinou qual a influência do diâmetro do bico, da velocidade de corte, da potência do laser e da pressão do gás de assistência; na rugosidade da superfície de corte e na taxa de material removido. Concluiu que o diâmetro do bico é o parâmetro com maior influência na rugosidade, seguindo-se a pressão do gás, a potência e a velocidade de corte, respetivamente. Em relação à taxa de material removido, verificou que a velocidade de corte é o parâmetro com maior influência, seguindo-se o diâmetro do bico, a potência e, por último, a pressão do gás de assistência (D. Nigade 2016).

Gadallah e Abdu (2015), realizaram um estudo sobre a otimização dos parâmetros do processo no corte de aço inoxidável (AISI 304L), utilizando um laser pulsado Nd:YAG de 200 W. Para tal, utilizaram o método de Taguchi de forma a verificar o efeito da potência do laser, da velocidade de corte, da pressão do oxigénio de assistência e da frequência de pulso; nos parâmetros de qualidade, nomeadamente: na perpendicularidade da fenda, na rugosidade da superfície de corte e na largura da ZTA. Pela aplicação do método, determinaram quais os níveis que garantiam o mínimo de rugosidade e a máxima perpendicularidade da face de corte. Verificaram que a potência, a pressão do gás, a frequência de pulso, a velocidade de corte e a interação entre a pressão do gás e a potência, são os parâmetros que mais afetam a perpendicularidade da fenda. O mesmo acontece para a rugosidade da superfície, sendo a interação entre a pressão do gás e a velocidade de corte, o factor mais influente (Gadallah e Abdu 2015).

3. Procedimento experimental

3.1. Propósito do trabalho experimental

O propósito deste trabalho experimental é otimizar o desempenho de um laser de fibra ótica no corte de tubos metálicos. Nesse sentido, será investigada a influência dos parâmetros do processo na qualidade de corte, nomeadamente na largura da fenda, no estado da superfície de corte (rugosidade) e na altura da escória aderente à aresta inferior dessa superfície. O objetivo será definir que níveis de parâmetros do processo, garantem uma média de respostas próxima à desejada, bem como quais os parâmetros que mais afetam cada uma das características de qualidade em análise.

Esta investigação será realizada para três materiais distintos, nomeadamente: aço estrutural, aço inoxidável e alumínio. Os parâmetros do processo a otimizar são: a velocidade de corte, a posição focal e a pressão do gás de assistência. Para cada um destes materiais, será variada a geometria da secção transversal do tubo (circular e retangular), assim como a sua espessura, à exceção do alumínio, onde apenas será ensaiada uma espessura.

3.2. Equipamento utilizado

3.2.1. Materiais

A escolha dos materiais utilizados neste trabalho fundamentou-se nas limitações da máquina, nas limitações da oferta do mercado nacional e nos materiais que são usualmente processados por corte a laser. Relativamente às limitações da máquina, esta foi projetada apenas para processar alguns materiais metálicos, nomeadamente: aços ao carbono, aços inoxidáveis, ligas de alumínio e ligas de cobre. Os materiais metálicos aos quais o processo é maioritariamente aplicado em ambiente industrial são: os aços inoxidáveis, os aços ao carbono não ligados, aços de baixa liga e ligas de alumínio (Faro 2006).

Posto isto, os materiais escolhidos para realização do presente trabalho foram: uma aço inoxidável austenítico (AISI 304), um aço estrutural não ligado (S275JOH) e uma liga de alumínio (AW6063). A composição química e as propriedades mecânicas destes materiais são apresentadas na Tabela 10 e na Tabela 11, respetivamente.

Tabela 10 - Composição química dos materiais utilizados (European Committee for Standardization 2008, 2005, 2006).

Material	Designação	Composição Química - teores máximos em massa [% wt]													
		C	Mn	P	S	Ni	N	Cr	Fe	Si	Cu	Mg	Zn	Ti	Al
Aço estrutural	S275JOH	0.2	0.4	0.035	0.035	-	0.009	-	*	-	-	-	-	-	-
Aço inoxidável	X5CrNi18-10 (AISI 304)	0.07	2	-	0.015	10.5	0.11	19.5	*	1	-	-	-	-	-
Alumínio	AlMg0.7Si (AW 6063)	-	0.1	-	-	-	-	0.1	0.35	0.6	0.1	0.9	0.1	0.1	*

*Elemento predominante.

Tabela 11 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados (European Committee for Standardization 2008, 2005, 2006).

Material	Designação	Referencial Normativo	Tensão de cedência [Mpa]	Tensão de rotura [Mpa]	Alongamento [%]
Aço estrutural	S275JOH	EN 10219-1	275	410-580	20
Aço inoxidável	X5CrNi18-10 (AISI 304)	EN 10217-7	195-230	500-700	40
Alumínio	AlMg0.7Si (AW 6063)	EN 755-2	190	215	10

Relativamente à geometria dos tubos, para cada um dos materiais, foram encomendados tubos de seção circular e tubos de seção retangular, com intuito de definir a combinação de parâmetros adequada para garantir a qualidade de corte em ambas as geometrias.

Para além do estudo de diferentes geometrias, será também analisada a influência da sua espessura. Assim sendo, inicialmente foram solicitados tubos com diferentes espessuras tanto para o aço estrutural, como para o aço inoxidável.

Quanto às dimensões dos tubos, nomeadamente o diâmetro externo para os tubos circulares e a largura e altura da secção retangular, era pretendido que fossem iguais para os diferentes materiais e espessuras. Contudo, a oferta garantida por diferentes fornecedores de tubos metálicos entrava em conflito com várias premissas admitidas. Posto isto, algumas alterações ao plano inicial tiveram de ser realizadas com objetivo de ajustar a procura à oferta. Como resultado, as características dos tubos encomendados são exibidas na Tabela 12 e na Tabela 13.

Tabela 12 - Características dos tubos de secção circular utilizados.

Material	Designação	Diâmetro externo [mm]	Espessura [mm]	Comprimento [m]	Massa Linear [kg/m]	Fornecedor
Aço estrutural	S275JOH	100	3	12	7.18	Ferromar – Grupo Ferpinta
		114.3	6	12	16	
Aço inoxidável	X5CrNi18-10 (AISI 304)	88.9	2	12	4.35	Siderinox
Alumínio	AlMg0.7Si (AW 6063)	85	2	12	1.436	Poly Lanema – Grupo Lanema

Tabela 13 - Características dos tubos de secção retangular utilizados.

Material	Designação	Dimensões da secção		Espessura [mm]	Comprimento [m]	Massa Linear [kg/m]	Fornecedor
		Base [mm]	Altura [mm]				
Aço estrutural	S275JOH	80	40	6	12	9.45	Ferromar -Grupo Ferpinta
Aço inoxidável	X5CrNi18-10 (AISI 304)	100	50	2	12	4.684	C.I.A – Comércio de inox e acessórios, Lda.
		100	50	5	12	11.335	
Alumínio	AlMg0.7Si (AW 6063)	120	40	2	12	1.687	Poly Lanema – Grupo Lanema

Como apresentado na Tabela 12 e na Tabela 13, não foi possível garantir as mesmas dimensões de secção, nem para os tubos de secção circular, nem para os tubos de secção retangular. Foi sim possível garantir para cada material, um tubo de secção retangular e outro de secção circular com a mesma espessura. Concluindo, apenas 8 tubos serão ensaiados, uma vez que não existiu oferta para o tubo circular em aço inoxidável com 5 mm de espessura, nem para o tubo em aço estrutural de secção retangular com 3 mm de espessura. Como resultado, a variação da espessura apenas será analisada para tubos retangulares em aço inoxidável e em tubos circulares para o aço estrutural.

3.2.2.Máquina

A máquina utilizada para realizar os ensaios experimentais é uma máquina de corte a laser de tubos projetada pelo INEGI/AMOB, dispondo de uma fonte laser de fibra ótica com 2 kW de potência (Rofin FL 020 Compact) e uma cabeça de corte 2D (Precitec Procutter C6). A máquina é comandada por um controlador CNC (Sinumerik 840D sl, da Siemens). Este equipamento encontra-se nas instalações da AMOB (Figura 70) e as suas especificações são apresentadas na Tabela 14.



Figura 70 – Máquina de corte a laser de tubos utilizada no trabalho experimental. Autorizado pela AMOB.

Tabela 14- Especificações da máquina de corte a laser utilizada no trabalho experimental. Disponibilizado pela AMOB/INEGI.

Máquina	
Marca	AMOB
Tipo de cabeça	2D
Materiais	Aços ao carbono / Aços Inoxidáveis / Ligas de Alumínio / Ligas de Cobre
Geometria da secção dos tubos	Circular / Quadrada / Retangular
Diâmetro mínimo de tubo [mm]	16
Diâmetro máximo de tubo [mm]	152
Dimensões mínimas - secção retangular do tubo (comprimento x largura) [mm]	15 x 15
Dimensões máximas - secção retangular do tubo (comprimento x largura) [mm]	120 x 120
Comprimento do alimentador [mm]	6500
Comprimento da descarga [mm]	3500
Tapete de extração	Sim
Massa linear máxima do tubo [kg/m]	20
Peso máximo do tubo para carregamento automático [kg]	185
Controlador CNC	SINUMERIK 840D sl (Siemens)
Software CAD/CAM	Lantek Flex 3D
Capacidade de corte	
Espessura máxima: Aço estrutural [mm]	8
Espessura máxima: Aço inoxidável [mm]	5
Espessura máxima: Ligas de Alumínio [mm]	6
Espessura máxima: Ligas de Cobre [mm]	4

Esta é uma máquina com oito eixos principais, onde seis deles destinam-se ao suporte e movimentação do tubo e os restantes dois à movimentação da cabeça de corte:

- Eixo X: Translação da bucha;
- Eixo A: Rotação da bucha ;
- Eixo U: Translação da luneta;
- Eixo B: Rotação da luneta;
- Eixo V: Translação vertical dos sustentadores do módulo alimentador;
- Eixo W: Translação vertical dos sustentadores do módulo de descarga;
- Eixo Z_CH: Translação vertical da cabeça de corte;
- Eixo Y: Translação horizontal da cabeça de corte.

Os eixos estão limitados às velocidades e acelerações apresentadas na Tabela 15. A aceleração dos eixos que movimentam linearmente o tubo (X) e a cabeça de corte (Y e Z_CH), é equivalente a 9.8 m/s^2 . A aceleração linear do eixo dos sustentadores do módulo de alimentação (V) e da luneta (U), é equivalente a 4.9 m/s^2 . A aceleração dos eixos rotativos (A e B) está limitada para 100 rad/s^2 .

Tabela 15 - Limitações de velocidade e aceleração dos eixos da máquina. Disponibilizado pela AMOB/INEGI.

Eixo	Velocidade máxima	Aceleração máxima
X	72.84 m/min	9.8 m/s^2
Y	30 m/min	9.8 m/s^2
Z_CH	40 m/min	9.8 m/s^2
U	72 m/min	4.9 m/s^2
A	7.33 rad/s	100 rad/s^2
B	9.42 rad/s	100 rad/s^2
V	25.385 m/min	4.9 rad/s^2
W	91.667 m/min	8 m/s^2

Os valores limite para as velocidades, apresentados na Tabela 15, são amplos, não sendo expectável que sejam atingidos durante todo o trabalho. Contudo quanto à aceleração, poderá nem sempre ser possível atingir as velocidades pretendidas durante o corte de alguns contornos, principalmente naqueles que são geometricamente complexos e de dimensões reduzidas. Assim sendo, a geometria de corte realizada nos ensaios deve ser simples, de forma a garantir que a velocidade de corte imposta seja realmente atingida.

A máquina está equipada com um laser de fibra ótica com 2 kW de potência máxima (Figura 71), com possibilidade de operação em modo contínuo ou pulsado. O caminho ótico da fonte à cabeça de corte é realizado por meio de cabos de fibra ótica. As especificações técnicas da fonte laser e do caminho ótico são apresentadas na Tabela 16.



Figura 71 - Fonte laser Rofin-Sinar FL020 Compact. Autorizado pela AMOB.

Tabela 16 - Especificações técnicas da fonte laser e do caminho ótico (ROFIN-SINAR 2017).

Fonte Laser	
Marca	ROFIN-SINAR
Modelo	FL 020 Compact
Potência máxima [W]	2000
Margem de potência [%]	10-100
Qualidade do feixe (BPP) [mm.rad]	3-4
Estabilidade de potência [%]	±2
Frequência máxima de pulso [kHz]	5
Comprimento de onda [nm]	1070 ± 10
Iões dopantes do núcleo da fibra ótica	Itérbio (Yb ³⁺)
Dimensões (comprimento x largura x altura) [mm]	953 x 751 x 584
Peso [Kg]	< 150
Caminho ótico	
Cabo de fibra ótica	QBH
Diâmetro do núcleo da fibra ótica ($\varnothing_c$) [μm]	100
Comprimento do cabo de fibra ótica [m]	15

A máquina em questão dispõe de uma cabeça de corte da marca Precitec, modelo ProCutter C6 (Figura 72 (a)). O cabo de fibra ótica entrega o feixe laser pelo topo da cabeça de corte. A cabeça possui uma unidade de controlo motorizada para ajuste da posição focal. A posição focal nula, está definida 1 mm abaixo do bico (Figura 72 (b)).

As especificações da cabeça de corte são apresentadas na Tabela 17. A unidade ótica na cabeça de corte, é equipada com uma lente de colimação e uma lente de focagem. Cada uma destas lentes é protegida por um vidro de proteção, evitando que sejam danificadas por poeiras ou salpicos de material. Este vidro protetor é um consumível e deve ser verificado após 72 horas de utilização. Em caso de necessidade, deve ser limpo ou substituído (©Precitec 2018).

O bico é roscado a uma peça cerâmica na parte inferior da cabeça. Tanto o bico como a cerâmica são substituíveis. A cerâmica garante que a cabeça não se danifique, caso ocorra colisão entre o bico e o material. A cabeça é, também, equipada com um sensor de capacitivo Lasermatic®, de forma a garantir que a distância entre o bico e o tubo, bem como a posição focal, são mantidas durante todo o processo (©Precitec 2018).

Tabela 17 - Especificações técnicas da cabeça de corte (©Precitec 2018)

Cabeça de corte	
Marca	Precitec
Modelo	ProCutter C6
Potência laser admissível [W]	6000
Comprimento de onda admissível [nm]	1030-1090
Distância focal da lente de colimação (f_c) [mm]	100
Distância focal da lente de focagem (f) [mm]	150
Abertura numérica máxima (NA_{max})	0.13
Velocidade de ajuste da posição focal [mm/s]	100-233
Ajuste horizontal [mm]	±1.5
Ajuste vertical [mm]	-13 ... +9 (Figura 72 (b))
Pressão máxima do gás de assistência [bar]	25

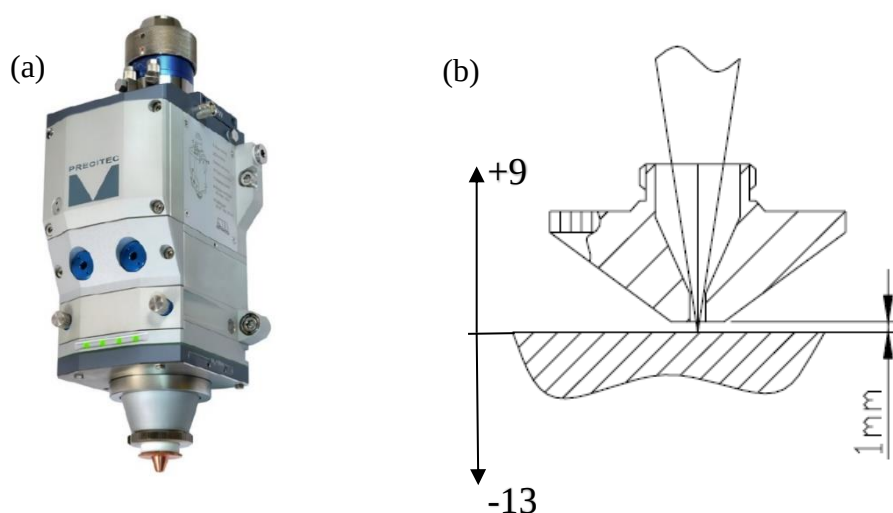


Figura 72 - Cabeça de corte Precitec ProCutter C6 (©Precitec 2018). (a): Cabeça de corte; (b): Posição focal nula (Faro 2006; Jensen e Petersen 2012).

A partir das especificações técnicas apresentadas na Tabela 16 e na Tabela 17, é possível calcular o diâmetro teórico mínimo da mancha focada, através da **Equação 2.3** (página 38) (Abdullah 2010; Havrilla e Anthony 1999).

$$d = \frac{f \text{ [mm]}}{f_c \text{ [mm]}} * \varnothing_c [\mu m] = \frac{150}{100} * 100 = 150 \mu m$$

3.2.3. Instrumentos de medição

Para avaliar os cortes realizados ao longo do trabalho experimental, três características de qualidade serão medidas, nomeadamente: a largura da fenda, média das alturas máximas do perfil de rugosidade da superfície de corte (Rz_5) e a altura da escória aderente à aresta inferior dessa superfície. Para avaliar a altura da escória aderente e a largura da fenda de corte, foram captadas imagens das amostras obtidas nos ensaios finais, utilizando uma lupa estereoscópica Olympus SZH (Figura 73 (a)), sendo a aquisição digital de imagem realizada por uma câmara HD de 5 megapixéis para microscópios, Leica MC170HD (Figura 73 (b)). Após a aquisição das imagens, estas duas características de qualidade foram medidas utilizando um software de processamento de imagem, o ImageJ.

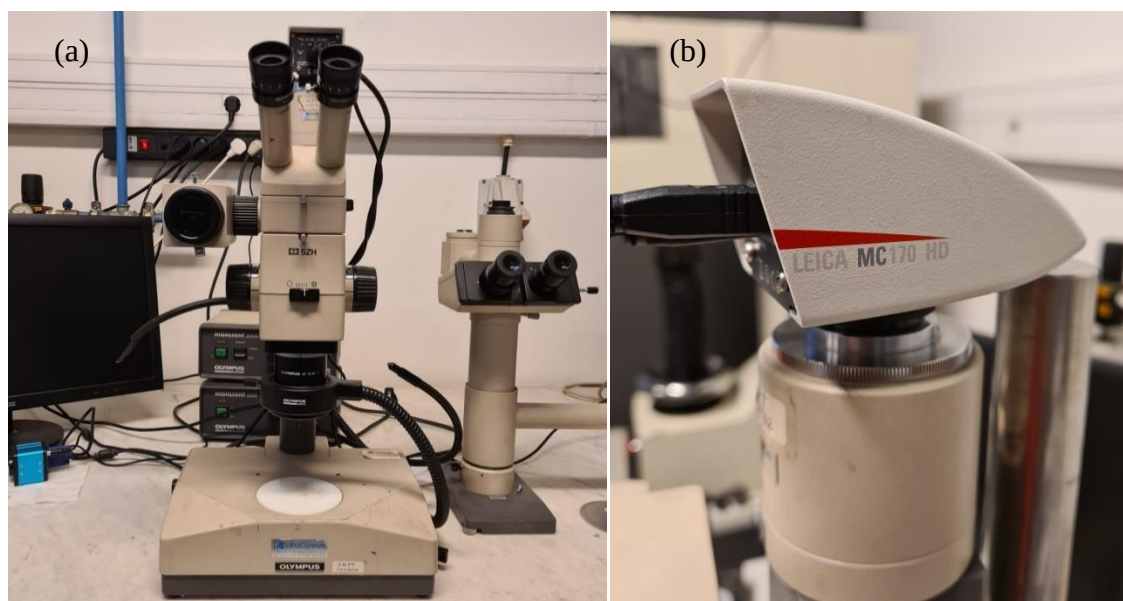


Figura 73 - Instrumentos utilizados para medição dos parâmetros de qualidade. (a): Lupa estereoscópica Olympus SZH; (b): Câmera Leica MC170 HD.

A rugosidade da superfície foi avaliada de acordo com a norma internacional EN-ISO 9013:2002, norma que refere as características geométricas e as tolerâncias de qualidade para materiais processados por corte térmico. A média das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz_5) é o parâmetro utilizado pela norma para classificar cortes térmicos. Para medir este parâmetro foi utilizado um rugosímetro portátil, Mitutoyo Surftest SJ-210. As especificações técnicas do rugosímetro utilizado são apresentadas na Tabela 18. Na Figura 74 é apresentada a disposição do rugosímetro e da superfície de corte, durante a medição da rugosidade.

Tabela 18 - Especificações técnicas do rugosímetro utilizado no trabalho experimental (©Mitutoyo 2009).

Força de medição [mN]	0.75
Material do apalpador	Diamante
Raio do apalpador[μm]	2
Ângulo do apalpador [°]	60
Comprimento de avaliação (L_n)	de 4.8 mm até 16 mm
Número de comprimentos base (l_r)	x1; x3; x5; xlr
Velocidade de medição	0.25 mm/s; 0.5 mm/s; 0.75 mm/s
Faixa de medição	-200 μm até +160 μm
Resolução [μm]	0.0256



Figura 74 - Medição da rugosidade da superfície de corte (Rz_5).

3.3. Planeamento da experiência

O planeamento da experiência teve por base as etapas descritas no capítulo de parametrização, onde é abordado o método DoE de Taguchi. O objetivo do trabalho é determinar a combinação de parâmetros que garante boa qualidade de corte, ou seja, que minimize os defeitos. Na Figura 75 é apresentado um diagrama de causa-efeito, onde são identificados os factores que afetam a qualidade do corte a laser.

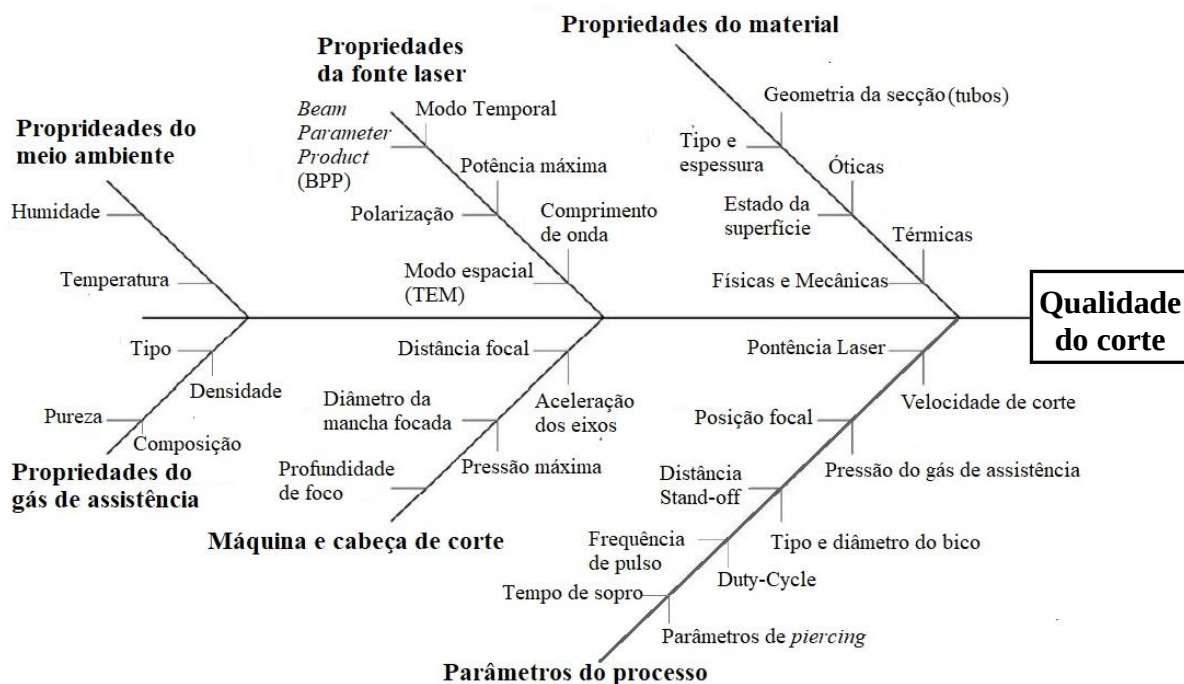


Figura 75 - Diagrama causa-efeito (ou espinha de peixe) para a qualidade do corte no processo de corte a laser. Adaptado de (Madić e Radovanović 2012).

Tendo como fundamento a pesquisa bibliográfica realizada durante a elaboração do estado de arte, tanto a velocidade de corte, como a pressão do gás de assistência e a posição focal, são dos parâmetros mais influentes nas características de qualidade a analisar, nomeadamente: a largura da fenda, a rugosidade da superfície de corte e a altura da escória aderente. Sendo assim, estes parâmetros são os factores controláveis, manipulados durante o procedimento experimental. Todos os restantes parâmetros do processo serão mantidos para o corte dos diferentes tubos. Os parâmetros inalterados ao longo dos ensaios são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Parâmetros do processo mantidos ao longo do trabalho experimental.

	Parâmetros de corte	Parâmetros de <i>piercing</i>
Potência do Laser [W]	2000	
Tipo do bico	Cônico (Figura 34)	
Diâmetro do bico [mm]	2	
Distância <i>stand-off</i> [mm]	1	
Frequência de pulso [Hz]	5000	1000
Duty-Cycle [%]	100	20
Gás de Assistência	Azoto (Alumínio e Aço Inoxidável) Oxigénio (Aço de construção)	
Tempo de Sopro [ms]	-	200
Tempo de <i>piercing</i> [ms]	-	200

Embora os parâmetros de *piercing* sejam influentes no corte, o objetivo deste trabalho é otimizar os parâmetros de corte contínuo e, por isso, os parâmetros de *piercing* foram mantidos para todos os ensaios. Relativamente à potência do laser, este é um parâmetro influente nas características de qualidade a medir, contudo foi mantida no limite máximo (2 kW) com o objetivo de retirar partido da totalidade da capacidade da fonte. Deste modo, os restantes parâmetros devem ser ajustados a esta potência, possibilitando que seja identificada a velocidade de corte máxima e assim determinados os parâmetros que garantem maior produtividade.

Tanto o diâmetro do bico como a distância *stand-off* influenciam o escoamento do gás de assistência pela fenda de corte e, assim, afetam a forma como o material fundido é expulso. É então expectável que ambos afetem tanto a altura da escória aderente, como a rugosidade da superfície. Porém, estes serão mantidos ao longo de todo o trabalho.

Relativamente ao modo temporal de operação do laser, foi admitido o feixe contínuo (CW) para todos os ensaios. O modo temporal irá influenciar a forma como a energia é transferida para o material, possibilitando maior controlo sobre o fornecimento de calor e o arrefecimento da frente de corte. No corte a feixe contínuo o processo torna-se mais “agressivo” e o produto é mais suscetível a defeitos associados ao excessivo fornecimento de calor. Contudo, este modo é o que garante maior produtividade em cortes geometricamente simples (Wandera 2006).

Resumindo, os factores controláveis admitido para o procedimento experimental são:

- Velocidade de corte;
- Pressão do gás de assistência;
- Posição do plano de foco.

O procedimento experimental empregue na elaboração do presente trabalho subdividiu-se em três fases. Na primeira foram realizados diversos ensaios iniciais, variando um dos factores controláveis de cada vez e mantendo os restantes fixos. Com base numa análise visual aos resultados obtidos nestes cortes, foram definidos os intervalos de níveis sobre os quais os factores controláveis serão variados na segunda fase do trabalho.

Numa segunda fase, será realizado o ensaio final com base numa matriz ortogonal (L9), onde os três factores controláveis serão variados segundo três níveis, compreendidos nos intervalos definidos na primeira fase. Após realizado o ensaio final, a última fase do

procedimento experimental passa pela análise das amostras em laboratório, de forma a medir as características de qualidade em avaliação.

Para determinar os níveis dos factores controláveis a variar durante o ensaio final, foram realizados ensaios iniciais, alterando cada um destes factores de cada vez, com intuito de ganhar conhecimento, experiência e sensibilidade sobre o processo e sobre a máquina. Este procedimento foi aplicado para todos os tubos e pode ser descrito pelas seguintes etapas:

1. Realizar cortes aumentando progressivamente a velocidade de corte, desde um nível reduzido até um nível onde a penetração deixa de ser completa, mantendo os restantes parâmetros inalterados.
2. Análise visual aos cortes resultantes, definindo um intervalo de velocidades. O valor máximo do intervalo será a velocidade mais elevada que viabilizou a penetração completa. O mínimo, será o valor mais reduzido que garantiu características de qualidade próximas às desejadas.
3. Fixar a velocidade de corte num nível compreendido neste intervalo.
4. Realizar cortes alterando a posição do plano de foco, desde uma posição próxima ao seu limite máximo (+9 mm) até uma posição próxima ao limite mínimo (-13 mm), milímetro a milímetro, mantendo os restantes parâmetros fixos.
5. Análise visual ao resultado. Definição de um intervalo de posições focais que viabilizam a penetração completa e garantem características de qualidade próximas às desejadas.
6. Fixar a posição focal no nível que garantiu a melhor qualidade visual, nível esse compreendido entre o intervalo admitido.
7. Realizar cortes aumentando progressivamente a pressão, desde um nível reduzido até um nível elevado.
8. Análise visual ao resultado. Definir um intervalo de níveis que garanta uma qualidade de corte à desejada.

Apesar do procedimento contemplar condutas de análise subjetiva, como é o caso da análise visual, este apenas será utilizado para definir os níveis admitidos para o ensaio final, de onde serão retiradas amostras para uma análise aprofundada.

A geometria de corte estabelecida para realização do procedimento experimental em tubos de secção retangular é apresentada na Figura 76. É uma geometria simples, sendo que para cada combinação de parâmetros, é realizado um retângulo na face superior e uma linha na face inferior. No interior de cada retângulo é gravado um número com o feixe laser, para posterior identificação da amostra. Cada ensaio é realizado numa porção de 200 mm de tubo, em comprimento, possibilitando a utilização de 9 combinações de parâmetros diferentes. As dimensões dos contornos realizados variaram para os diferentes tubos, tendo em vista o aproveitamento das superfícies dos tubos com secção transversal de maiores dimensões.

Procedimento semelhante foi aplicado para tubos de secção circular, como demonstrado na Figura 77. Nesses, apenas foi utilizado metade da sua superfície, ou seja, 0°-180°. Uma vez que o feixe laser afeta a superfície interior do tubo durante o corte, este procedimento foi admitido para evitar que os contornos sejam realizados sobre uma superfície termicamente modificada ou com salpicos de material.

Na Figura 76 e na Figura 77, as setas a encarnado representam a direção e sentido de deslocamento do feixe na realização dos respetivos contornos. O ponto encarnado faz referência à localização do *piercing* e os números a violeta indicam a sequência de corte. Uma vez que a geometria da secção dos tubos varia, para cada tubo foi gerado um código CNC através do software CAD/CAM, Lantek Flex 3D. Através desse software foi possível definir a geometria

dos contornos, bem como a sequência de corte, a resolução dos pontos que definem o contorno, o comprimento e tipo de entrada (após o *piercing*) e as qualidades desejadas para cada contorno. As qualidades definem o conjunto de parâmetros utilizados. Na máquina em questão é possível definir até 11 qualidades diferentes, no entanto apenas 10 foram utilizadas – nove para cada combinação retângulo/linha e outra para os contornos das extremidades dos tubos e para os números.

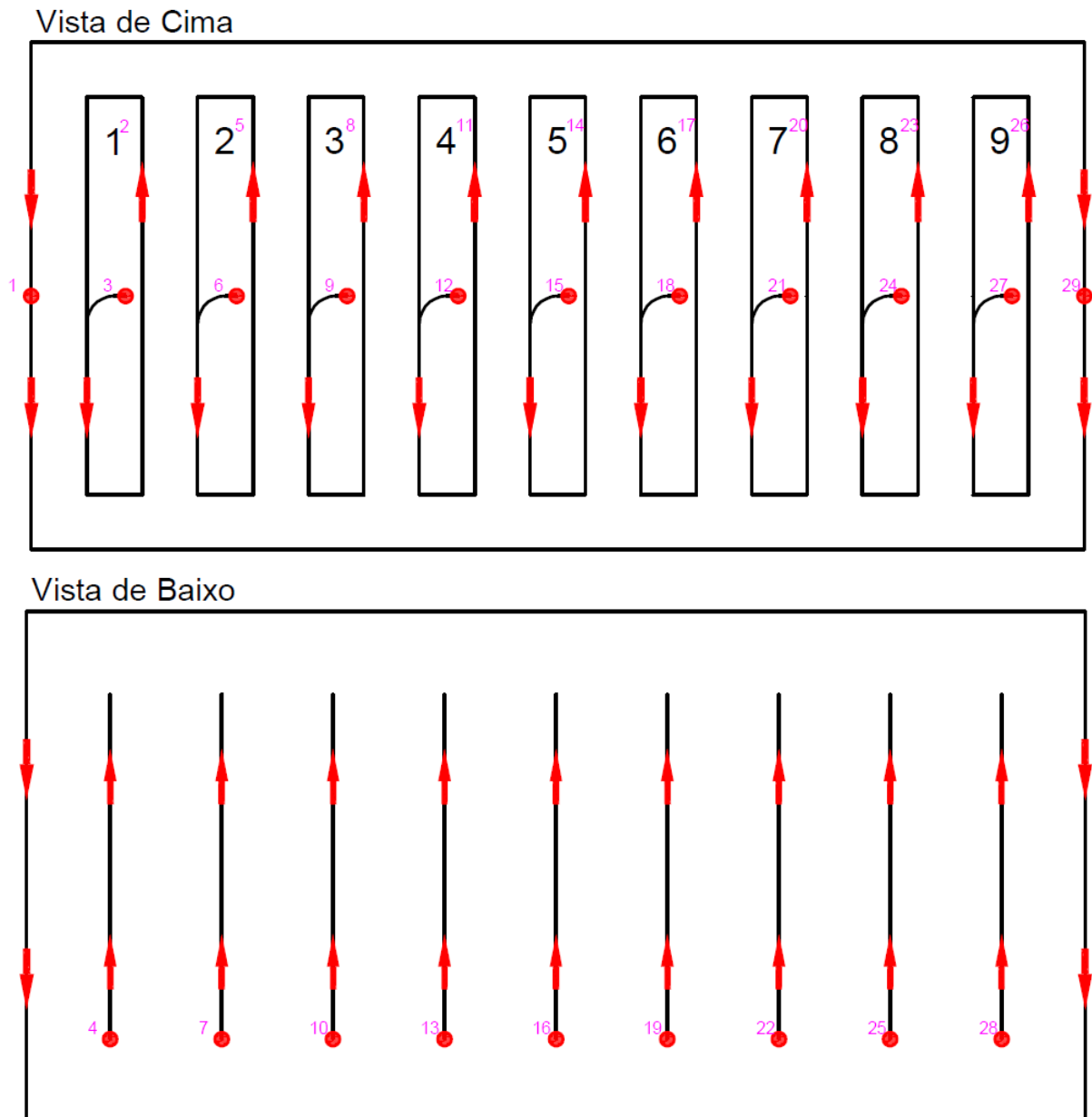


Figura 76 - Geometria dos cortes realizados em tubos de secção retangular.

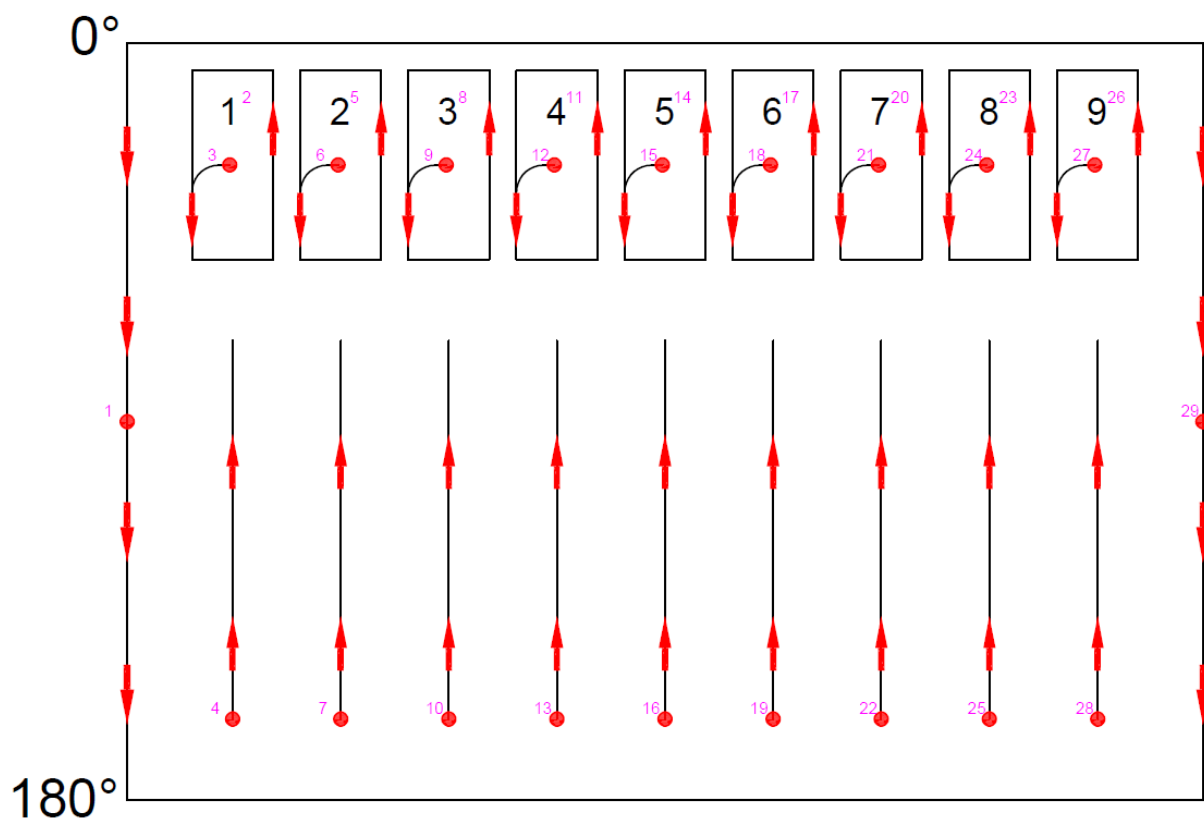


Figura 77 - Geometria dos cortes realizados em tubos de seção circular. Planificação de 180°.

A geometria de corte é idêntica tanto para tubos de seção retangular como para tubos de seção circular. Esta geometria foi admitida para que, através da linha, seja avaliada a largura da fenda. Através dos retângulos que, sendo contornos fechados, são “partes perdidas” do tubo, será visualizada a superfície de corte resultante de um determinado conjunto de parâmetros, através da análise à superfície lateral desses retângulos.

Durante a realização do ensaio final, pelo procedimento DoE de Taguchi, foram variados os factores controláveis (velocidade de corte, posição focal e pressão do gás de assistência), segundo três níveis. Os arranjos ortogonais que permitem variar três factores controláveis segundo três níveis distintos, são os arranjos L9 e L27. O arranjo L27 possibilitaria a testagem de todas as combinações de níveis possíveis ($3^3 = 27$), assemelhando-se ao desenho fatorial completo (Ross 1996). De forma a reduzir o número de ensaios foi admitido o arranjo L9, onde para cada nível de um dado factor, são combinados todos os níveis dos restantes factores apenas uma vez. As combinações entre factores e respectivos níveis, de acordo com um arranjo ortogonal L9, podem ser verificadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Matriz de ensaios, segundo o arranjo ortogonal L9.

Combinação de parâmetros	Factor controlável #1	Factor controlável #2	Factor controlável #3
C1	1	1	1
C2	1	2	2
C3	1	3	3
C4	2	1	2
C5	2	2	3
C6	2	3	1
C7	3	1	3
C8	3	2	1
C9	3	3	2

Relativamente à análise dos resultados, o método de Taguchi permite a otimização dos parâmetros do processo através de duas etapas. A primeira etapa consiste na avaliação da robustez do processo pela análise aos factores Sinal/Ruído, onde será possível determinar a combinação de parâmetros que diminui a variabilidade, ou seja, que diminui os efeitos dos factores não controláveis (factores de ruído). Numa segunda etapa, através da análise às médias das respostas, será possível identificar a combinação de parâmetros que garante uma média próxima ao valor desejado, com o mínimo de influência nos factores de Sinal/Ruído (Minitab® 2021). Para concluir, será realizada uma análise de variância (ANOVA) à média das resposta, com objetivo de identificar os parâmetros com maior e menor contribuição sobre o valor médio das características de qualidade observadas.

3.3.1. Definição dos níveis

Aço Estrutural, 3 mm de espessura

Para determinar os níveis admitidos no ensaio final, foram realizados vários cortes iniciais incrementando um dos parâmetros de cada vez e mantendo os restantes fixos.

Inicialmente foi fixada a pressão de oxigénio (gás de assistência) a 0.8 bar e a posição focal a +5 mm, ou seja, 5 mm acima da superfície exterior do tubo. A velocidade de corte foi aumentada desde 0.5 m/min até 6.5 m/min, em incrementos de 0.5 m/min. Foi verificado que para velocidades entre 0.5-2 m/min, existiu dificuldade na expulsão do material fundido da fenda de corte, resultando em fendas totalmente ou parcialmente fechadas e com escória aderente. O corte com penetração completa em todo o contorno só foi conseguido para o intervalo de velocidades de 2.5-4 m/min. A partir de 4.5 m/min o corte deixou de ser conseguido devido à expulsão ineficaz do material, demonstrando-se novamente por fendas fechadas e posteriormente pela perda da penetração na totalidade da espessura. Para as velocidades mais baixas, a fenda demonstrou-se ligeiramente mais larga e com estrias, devido ao fenómeno de oxidação cíclica, ilustrado pela Figura 54 (página 60). Para velocidades mais elevadas, o rápido deslocamento do feixe impediu que o material fosse fundido ao longo de toda a sua espessura, resultando em penetração incompleta.

Na Figura 78, é apresentado o resultado do procedimento de incremento da velocidade, no corte de aço de construção com 3 mm de espessura. Para cada par de contornos (linha + retângulo), foi utilizado um conjunto de parâmetros diferente (V1,V2, ...,V13), sendo V1 o conjunto com velocidade mais baixa (0.5 m/min) e V13, o com velocidade mais elevada (6.5 m/min). A pressão de oxigênio e a posição focal foram mantidas constantes, a 0.8 bar e +5 mm, respetivamente.



Figura 78 - Cortes realizados com incremento de velocidade (Aço estrutural, 3mm de espessura). V1 = 0.5 m/min; V13 = 6.5 m/min; Incremento = 0.5 m/min.

Posteriormente, a velocidade foi mantida a 3 m/min, a pressão de oxigênio a 0.8 bar e a posição focal variada desde -8 mm, até +9 mm, em incrementos de 1 mm. Foi concluído que para posições focais abaixo da superfície, o corte não era obtido devido à inadequada expulsão material fundido, solidificando no interior da fenda. Como resultando, as fendas demonstraram-se fechadas e com excesso de escória aderente à aresta inferior. O corte limpo só foi obtido posicionando o plano de foco num intervalo de 1 mm, a 5 mm acima da superfície.

Por último, para o ensaio de diferentes pressões, foi mantida a velocidade de corte a 3 m/min e a posição focal a +3 mm. A pressão foi variada desde 0.5 bar até 2.3 bar, em incrementos de 0.1 bar. A penetração completa e a abertura da totalidade da fenda foram obtidas para todos os ensaios. Contudo, através de uma análise visual à superfície de corte, foi verificado um aumento das estrias cíclicas com o aumento da pressão, para pressões acima de 1 bar.

Realizados os ensaios iniciais, os níveis admitidos na realização da experiência final (DoE), são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Níveis admitidos para o procedimento DoE. Aço estrutural, 3 mm de espessura.

		Nível		
		1	2	3
Parâmetro	Velocidade de corte [m/min]	2.0	3.0	4.0
	Posição Focal [mm]	2.0	3.0	4.0
	Pressão do gás de assistência [bar]	0.6	0.8	1.0

Aço Estrutural, 6 mm de espessura

Para definição dos níveis utilizados no procedimento DoE, foram realizados vários cortes iniciais variando um parâmetro à vez. Esta metodologia foi aplicada tanto para tubos de secção circular, como para tubos de secção retangular. Assim, será possível definir o conjunto de níveis que possibilite o sucesso do corte, quando alterada a geometria do tubo.

Inicialmente foi variada a velocidade de corte, desde 0.7 m/min até 2.4 m/min, segundo incrementos de 0.1 m/min. A posição focal foi mantida a +5 mm e a pressão do gás de assistência (oxigénio) a 0.6 bar. Relativamente ao tubo de secção circular, o corte apenas foi obtido para todas as velocidades abaixo de 2 m/min. Quanto ao tubo de secção retangular, o corte foi conseguido para toda a gama de velocidades testadas, à exceção da mais elevada (2.4 m/min). Foi verificado que para velocidades inferiores a 1 m/min, a superfície de corte apresentou-se visualmente rugosa e estriada, diminuindo esses defeitos com o aumento da velocidade. Para velocidades mais elevadas (> 1.7 m/min), a expulsão do material fundido tornou-se ineficaz, uma vez que foi verificada a deposição de escória à aresta inferior de corte, como também algum material solidificado no interior da fenda, impedido que o contorno retangular fosse extraído do tubo e analisada a respetiva superfície de corte. O intervalo admitido para a velocidade de corte foi de 0.9-1.7 m/min, visto que garantiu o sucesso do corte para ambas as geometrias de tubo.

De seguida, mantendo a velocidade de corte a 1.7 m/min e a pressão do gás a 0.6 bar, a posição focal foi variada desde -8 mm até +9 mm, em incrementos de 1 mm. Para posições focais abaixo da superfície do material, apenas foi possível obter o corte para o tubo retangular, utilizando posições focais entre -6 mm a -8 mm. Para a posição focal definida sobre a superfície, a reduzida largura da fenda impossibilitou que o material fundido fosse devidamente expulso, resultando em fendas total ou parcialmente fechadas, tanto para tubos circulares, como retangulares. Para posições focais definidas acima da superfície, o corte do tubo de secção circular apenas foi conseguido para posições entre 2 mm a 5 mm, enquanto o tubo de secção retangular foi cortado para toda a gama de posições acima da superfície, à exceção da mais afastada (+9 mm). O intervalo de posições que garantiu o sucesso no corte de ambas as geometrias foi de +2 mm até +5 mm, que será o intervalo de níveis admitido para o ensaio final.

O mesmo procedimento foi aplicado para a pressão de oxigénio, onde foi mantida a velocidade de corte a 1.7 m/min, bem como a posição focal a 2 mm acima da superfície. A pressão foi variada desde 0.3 bar até 2 bar, em incrementos de 0.1 bar. A penetração foi

completa para todos os níveis de pressão testados, possibilitando o corte em todo o contorno, tanto para tubos circulares, como para tubos retangulares. Contudo, numa análise visual à superfície de corte (Figura 79), foi constatado que as estrias numa região próxima à aresta inferior, se tornaram mais pronunciadas com o progressivo aumento da pressão. O aumento da pressão justifica o aumento da profundidade das estrias, uma vez que há o aumento do calor gerado pela reação de oxidação (Sun e Brandt 2013). Posto isto, foi admitido um intervalo de pressões entre 0.4 bar e 1 bar para aplicar no procedimento DoE, pois foi o intervalo que garantiu o sucesso do corte ao longo de todo o contorno, bem como uma superfície de corte com estrias pouco pronunciadas numa região próxima à aresta de corte inferior.



Figura 79 - Superfícies de corte. Testes de incremento da pressão do gás de assistência (Aço estrutural, 6mm de espessura, tubo de secção retangular).

Ao longo da realização dos ensaios iniciais, foi verificada uma maior facilidade no corte do tubo de secção retangular, uma vez que o corte completo foi obtido para intervalos de níveis mais abrangentes. Contudo, para o tubo retangular, foi averiguado um elevado volume de material fundido que solidificou na face interior do tubo, face oposta à superfície onde foi realizado corte (ANEXO 2). Tal pode ser justificado pela reduzida distância entre as superfícies. Uma vez que a altura da secção transversal do tubo é de 40 mm e a espessura de 6 mm, as superfícies interiores distanciam-se apenas 28 mm, reduzindo a capacidade de aspiração e arrefecimento do material expulso da fenda, material que se deposita na face oposta antes de solidificado. Tal já não foi verificado para o tubo circular. Visto que o diâmetro de secção é de 114.3 mm, o material expulso solidifica e é aspirado antes de ser depositado na superfície interior do tubo. Concluindo, os intervalos de parâmetros admitidos para realização do procedimento DoE, são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Níveis admitidos para o procedimento DoE. Aço estrutural, 6 mm de espessura.

		Nível		
		1	2	3
Parâmetro	Velocidade de corte [m/min]	0.9	1.3	1.7
	Posição Focal [mm]	2.0	3.5	5.0
	Pressão do gás de assistência [bar]	0.4	0.7	1.0

Aço Inoxidável, 2 mm de espessura

Para definição dos níveis aplicados no procedimento DoE, foram realizados ensaios iniciais variando um factor controlável de cada vez. Uma vez que foram testados tanto tubos de secção retangular como de secção circular, o objetivo destes ensaios passou por definir intervalos de níveis, que garantam o sucesso no corte de ambas as geometrias.

Assim sendo, foram realizados cortes variando a velocidade, desde um nível reduzido (1 m/min) até um nível elevado (12 m/min), em incrementos de 1 m/min. A posição focal foi mantida a meio da espessura do tubo (-1 mm) e a pressão do gás de assistência (azoto) a 15 bar. O corte apenas foi conseguido para velocidades abaixo dos 10 m/min. Contudo, para velocidades reduzidas (1 – 4 m/min), foi verificada uma descoloração acentuada na face interior, oposta à face de corte, principalmente nos tubos de secção retangular. Por outro lado, para velocidades iguais ou superiores a 10 m/min, a penetração na totalidade da espessura deixou de ser obtida, devido ao rápido deslocamento do feixe laser.

De seguida a posição focal foi variada desde a posição -5 mm até à posição +4 mm, em incrementos de 1 mm. A pressão do gás de assistência foi mantida a 15 bar, enquanto a velocidade foi fixada nos 6 m/min. O corte só foi realizado para posições focais compreendidas entre -3 mm e +2 mm. Para posições focais abaixo dos -3 mm, o corte não foi obtido para todo o contorno realizado, demonstrando-se por fendas parcial ou totalmente fechadas e penetração incompleta. O mesmo ocorreu para posições iguais ou superiores a +2 mm. De forma a posicionar a profundidade de foco ao longo da espessura do material e, assim, garantir maior densidade de potencia à superfície do tubo, o intervalo de posições focais admitido para o procedimento DoE aplicado ao aço inoxidável foi de -2 mm a 0 mm.

No que diz respeito à pressão do gás de assistência (azoto), esta foi posteriormente variada desde 10 bar, até 20 bar. A posição focal foi mantida na superfície interior do tubo (-2 mm) e a velocidade de corte a 6 m/min. A penetração completa foi obtida para todos os níveis de pressão ensaiados. Contudo para pressões abaixo dos 13 bar, foi identificada alguma escória aderente à aresta inferior de corte. Assim, o intervalo de pressão do gás de assistência admitido no ensaio final, foi de 13 bar até 17 bar.

Os níveis segundo os quais o procedimento DoE será realizado são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Níveis admitidos para o procedimento DoE. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

		Nível		
		1	2	3
Parâmetro	Velocidade de corte [m/min]	4.0	6.0	8.0
	Posição Focal [mm]	-2.0	-1.0	0
	Pressão do gás de assistência [bar]	13.0	15.0	17.0

Aço Inoxidável, 5 mm de espessura

Com o objetivo de definir os níveis segundo os quais serão variados os factores controláveis no ensaio final, foram realizados vários cortes iniciais incrementando um parâmetro à vez. Primeiramente, foi variada a velocidade de corte, desde 0.6 m/min até 2.2 m/min, em incrementos de 0.2 m/min. A pressão do gás de assistência foi mantida a 10 bar e a posição focal sobre superfície interior do tubo, ou seja, 5 mm abaixo da superfície exterior (-5 mm). Foi verificado que o corte das linhas é obtido para toda a faixa de velocidades testadas. Relativamente às geometrias retangulares, a penetração completa ao longo de todo o contorno deixou de ser obtida para velocidades iguais ou superiores a 1.4 m/min (Figura 80). No corte para a velocidade mais reduzida, foi notado que a superfície de corte se apresentava descolorida, consequência do excessivo fornecimento de calor à frente de corte, resultando numa ZTA mais larga e comprometendo da resistência à oxidação da respetiva superfície. O intervalo de níveis admitido para a velocidade foi de 0.8 m/min, até 1.2 m/min.

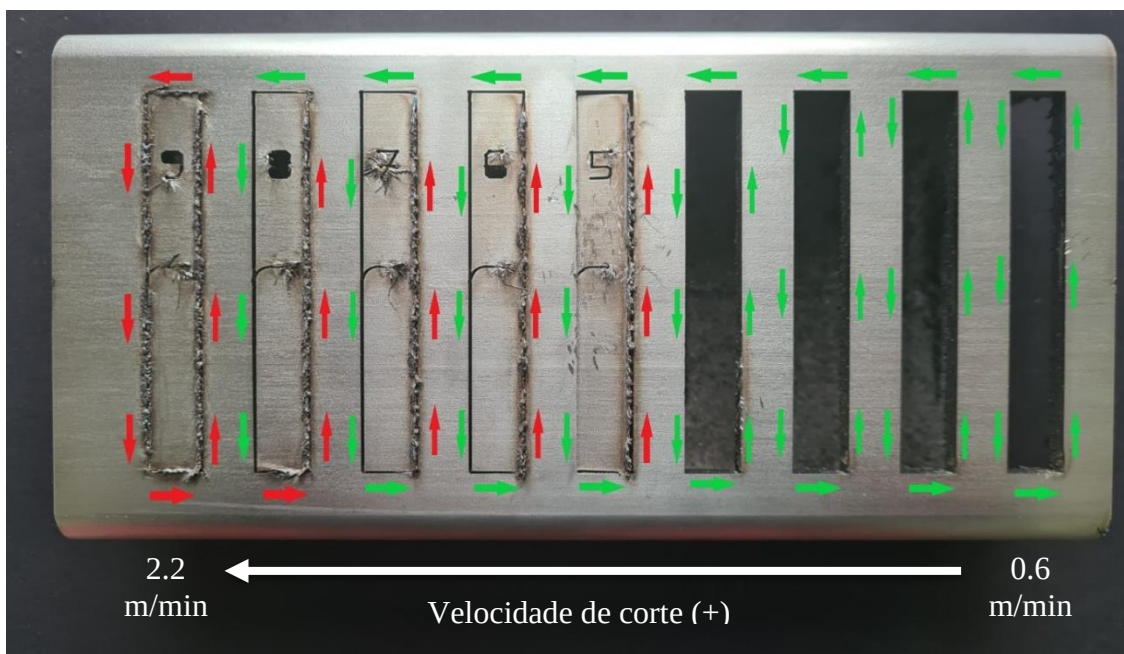


Figura 80 - Cortes realizados com incremento de velocidade (Tubo de aço inoxidável, 5mm de espessura). Vista de cima (contornos retangulares).

Pela Figura 80, pode ser verificado que o sentido de deslocamento do feixe em relação ao tubo, influenciou o sucesso do corte, apresentando maior dificuldade no corte da esquerda para a direita, nomeadamente na realização do contorno retangular. Tal pode ser justificado pelo sentido de polarização do feixe, uma vez que absorção da energia por parte do material e consequentemente a velocidade de corte máxima, variam com a direção de corte, para diferentes estados de polarização (Golyshev, Orishich e Shulyatyev 2017).

O mesmo procedimento foi aplicado à posição focal, sendo variada progressivamente desde -10 mm até +7 mm, em incrementos de 1 mm. A velocidade de corte foi mantida a 1 m/min e a pressão do azoto de assistência a 10 bar. O corte apenas foi conseguido para o intervalo de posições entre -6 mm a +6 mm. Para as posições focais abaixo de -7 mm e acima de +7 mm, o elevado nível de desfocagem do feixe face à superfície do material (diminuição da densidade de potência), impossibilitou que o material fosse fundido em toda a espessura, resultando em penetração incompleta. Por outro lado, para posições focais acima da superfície exterior do tubo, foi verificado um aumento da descoloração da superfície de corte, com o progressivo distanciamento da posição de focal. Uma vez que esta é também uma característica indesejável, o intervalo de posições focais admitido foi de -6 mm a -4 mm.

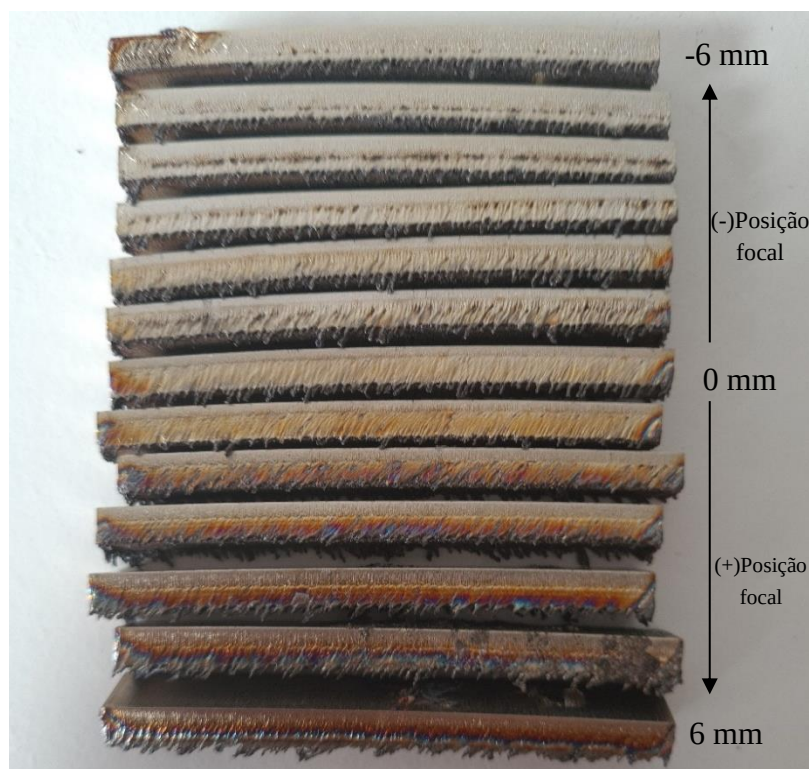


Figura 81 - Superfícies de corte. Testes de incremento da posição focal (Aço inoxidável, 5 mm de espessura).

Posteriormente, foi aplicado o mesmo procedimento para a pressão do gás de assistência, neste caso o azoto. A velocidade de corte foi mantida a 1 m/min tal como a posição focal a -5 mm. A pressão foi variada de 5 bar a 22 bar, em incrementos de 1 bar. Para pressões baixas (5-7 bar) a superfície de corte resultante apresentou-se descolorida em algumas regiões, embora a penetração total tenha sido obtida em todo o contorno. Para pressões entre 8-12 bar, o corte foi realizado em todo o contorno e as superfícies de corte, visualmente analisadas, foram as que demonstraram menos defeitos. Para pressões superiores a 12 bar, a penetração na totalidade da

espessura não foi conseguida para todo o contorno e, por isso, esses níveis de pressão não foram considerados.

Durante os ensaios foi verificada uma elevada tendência na deposição de escória aderente à aresta inferior de corte. Isto pode estar relacionado com a capacidade da máquina, pois segundo as suas especificações (Tabela 14 - página 84), o limite máximo, em espessura, para corte de aço inoxidável, é de 5 mm. Por outro lado, pode estar relacionado com os parâmetros que foram mantidos fixos para todos os ensaios (Tabela 19 – página 91), uma vez que os seus valores ótimos variam com a espessura e com o material. Por último, os níveis admitidos para o ensaio final são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Níveis admitidos para o procedimento DoE. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

		Nível		
		1	2	3
Parâmetro	Velocidade de corte [m/min]	0.8	1	1.2
	Posição Focal [mm]	-6.0	-5.0	-4.0
	Pressão do gás de assistência [bar]	9.0	10.5	12.0

Alumínio, 2 mm de espessura

Na definição dos níveis a aplicar no procedimento DoE para o corte de tubos de secção circular e retangular em alumínio, a mesma metodologia foi empregue. Inicialmente, foi variada a velocidade de corte, desde 1 m/min até 15 m/min, em incrementos de 1 m/min. A posição focal foi mantida na superfície interior do tubo (-2 mm) e a pressão do gás de assistência (azoto) a 15 bar. Tanto para tubos de secção retangular, como para os de secção circular, o corte foi obtido para todos os níveis de velocidade inferiores a 8 m/min. Para velocidades iguais e superiores a esta, a penetração completa deixou de ser conseguida na realização dos contornos lineares (Figura 83). Para velocidades iguais ou superiores a 9 m/min, o mesmo ocorreu para os contornos retangulares (Figura 82). Para velocidades abaixo desta, não foram detetadas diferenças visualmente significativas.

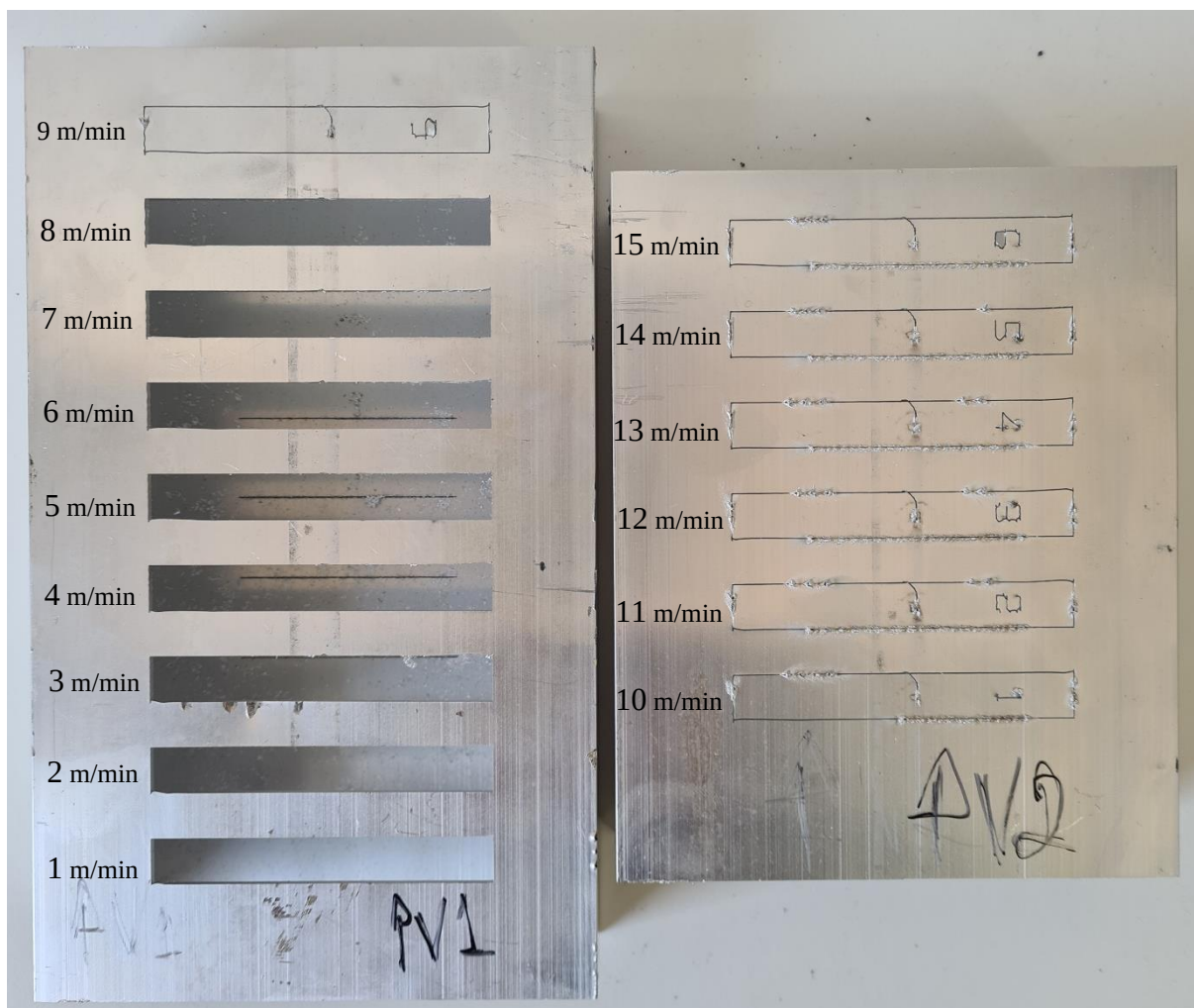


Figura 82 – Cortes realizados com incremento de velocidade (Tubo de secção retangular em alumínio, 2 mm de espessura). Vista de cima (contornos retangulares).

Posteriormente, a velocidade de corte foi mantida a 6 m/min e a pressão de azoto a 15 bar. A posição focal foi variada desde -8mm até +4 mm, segundo incrementos de 1 mm. Para posições focais abaixo de -4 mm e acima de + 2 mm, a penetração ao longo de toda a espessura não foi obtida, justificando-se pelo elevado nível de desfocagem do feixe, que proporciona uma redução da densidade de potência sobre a superfície do tubo e, como consequência, impossibilita a fusão do material ao longo de toda a espessura do material. O sucesso do corte apenas foi conseguido para posições entre -4 mm e +2 mm . O intervalo de níveis admitido para o procedimento DoE passa por variar a posição focal entre a superfície exterior (0 mm), o meio da espessura do tubo (-1 mm) e a superfície interior (-2 mm), possibilitando assim que a profundidade de foco se posicione sobre a espessura do tubo.

Por último, a pressão do gás de assistência foi variada, desde 5 bar até 22 bar, segundo incrementos de 1 bar. A velocidade de corte foi mantida a 6 m/min e a posição focal 2 mm abaixo da superfície exterior (-2 mm). O corte foi conseguido para toda a gama de pressões testadas, quer no tubo retangular, como no tubo circular. Contudo, para pressões inferiores a 10 bar, a escória aderente à aresta inferior de corte demonstrou-se visualmente mais acentuada. Para pressões superiores a 10 bar, não foi possível identificar diferenças significativas nas características de qualidade.

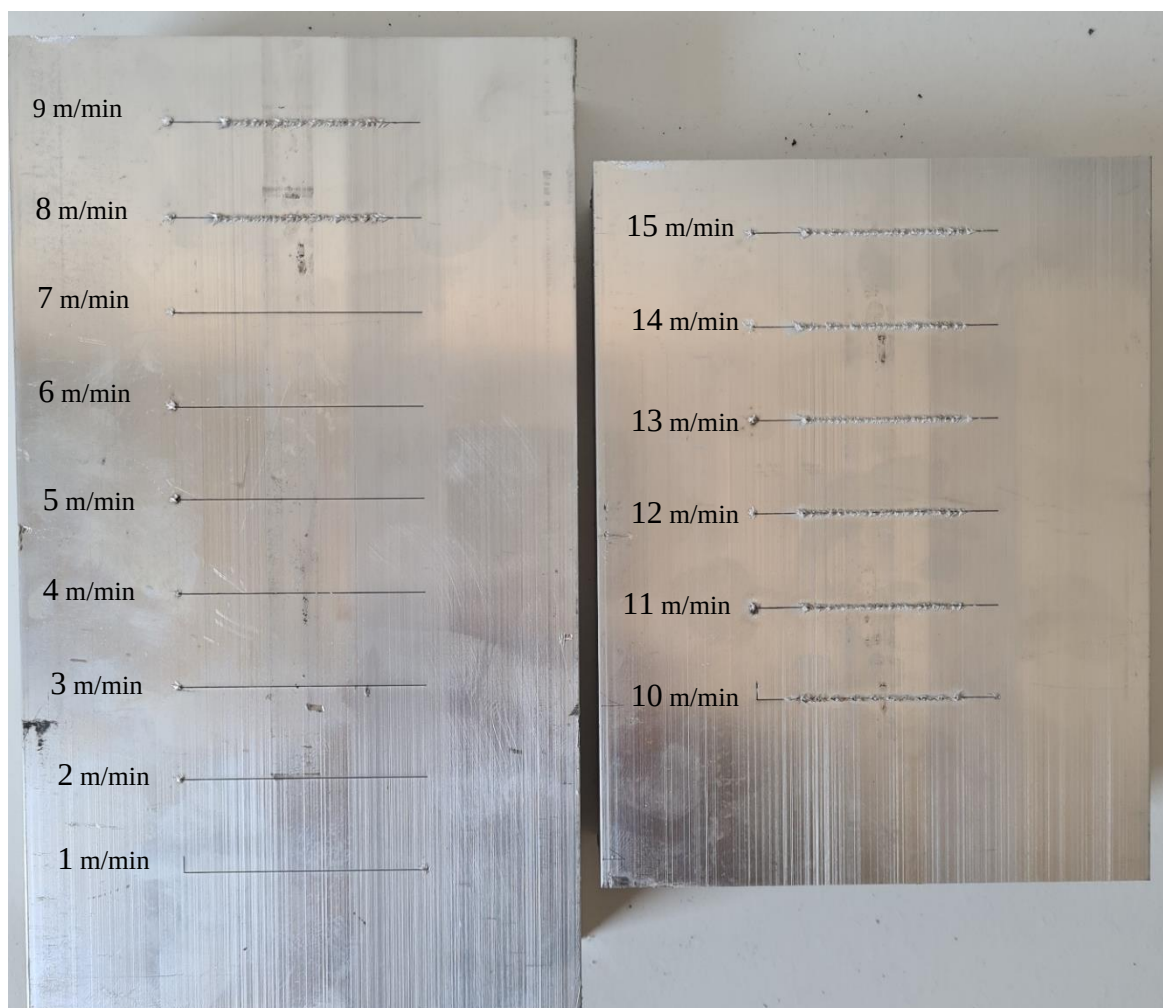


Figura 83 - Cortes realizados com incremento de velocidade (Tubo de seção retangular em alumínio, 2 mm de espessura). Vista de baixo (contornos lineares).

O intervalo de níveis admitido para o procedimento DoE no corte de alumínio é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Níveis admitidos para o procedimento DoE. Alumínio, 2 mm de espessura.

		Nível		
		1	2	3
Parâmetro	Velocidade de corte [m/min]	3.5	5.0	6.5
	Posição Focal [mm]	-2.0	-1.0	0
	Pressão do gás de assistência [bar]	10.0	13.0	16.0

Na Figura 84 são apresentados graficamente os níveis admitidos para os ensaios finais, tendo em conta os diferentes materiais/espessuras estudados.

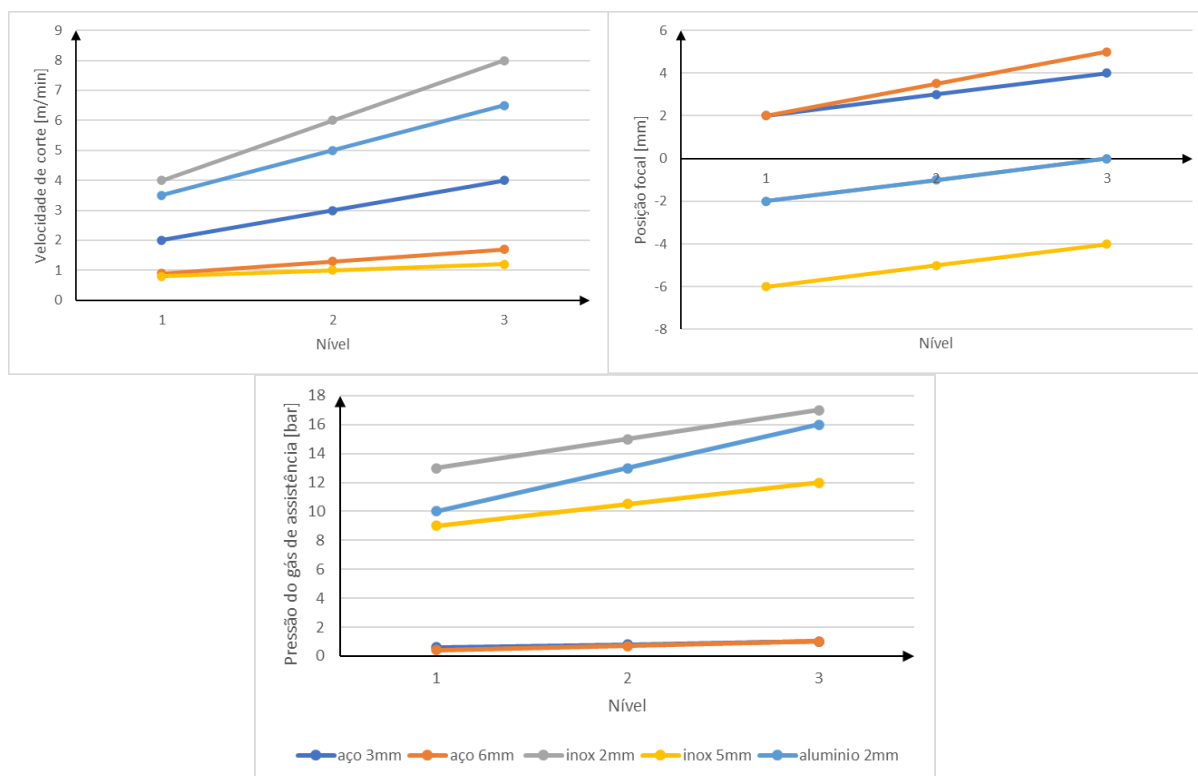


Figura 84 - Níveis empregues nos ensaios finais para os diferentes materiais e espessuras.

Pela Figura 84, é possível aferir que a velocidade máxima de corte varia de acordo com o material e a espessura. Uma vez que o nível 3, admitido para a velocidade de corte, é um nível próximo à velocidade máxima atingida durante os ensaios iniciais, pode ser concluído que, para um dado material, a velocidade de corte máxima diminui com o aumento da espessura.

Por outro lado, a velocidade máxima obtida para o alumínio com 2 mm de espessura é inferior à obtida para o aço inoxidável com a mesma espessura. Tal pode ser justificado pela superior refletividade do alumínio em relação ao ferro (Figura 37 – página 42), sendo então menos capacitado a absorver a energia disponibilizada pela radiação do feixe laser. Adicionalmente, a velocidade de corte máxima obtida para o aço estrutural com 6 mm de espessura, demonstrou-se superior à do aço inoxidável com 5 mm de espessura. Uma vez que o aço estrutural foi cortado pelo mecanismo de corte por fusão reativa, a energia térmica adicional, gerada pela reação de oxidação, justifica a superior velocidade de corte atingida.

Relativamente à posição focal, nos materiais finos (2 mm de espessura), foi possível realizar o corte localizando o foco ao longo da espessura. Contudo, para materiais mais espessos, foi necessário desfocar o feixe para garantir uma fenda suficientemente larga e permitir a eficaz expulsão do material fundido. Foi verificado que para o aço estrutural, onde foi utilizado oxigénio como gás de assistência, o corte apenas foi garantido posicionando o foco acima da superfície. Relativamente ao aço inoxidável, posicionar o foco abaixo da superfície, garantiu menos degradação térmica à aresta inferior da superfície de corte (Figura 81 – página 101)

Quanto à pressão do gás de assistência, quando utilizado oxigénio, as pressões empregues foram mais baixas (≤ 1 bar), com intuito de diminuir os defeitos associados à reação cíclica de

oxidação, nomeadamente as estrias na superfície de corte (Figura 79 – página 98). Para os materiais processados com azoto, as pressões foram substancialmente mais elevadas (≥ 9 bar), de forma a otimizar a eficácia da expulsão do material fundido do interior da fenda.

3.3.2. Medição das características de qualidade

Após a realização do ensaio final, onde é aplicado o procedimento DoE segundo o arranjo ortogonal (L9), os tubos ensaiados foram analisados em laboratório com recurso a uma lupa estereoscópica. Foram adquiridas imagens aos cortes lineares, através das quais foi medida a largura da fenda na superfície exterior do tubo. Os cortes segundo contornos retangulares, sendo “partes perdidas” do tubo, permitiram a análise da superfície de corte, tanto para medição da rugosidade, como para medição da altura da escória aderente.

Para medir as imagens adquiridas, foi utilizado o software ImageJ, onde é possível converter uma distância entre pixels em unidades de comprimento, desde que seja conhecida uma distância à escala em que a imagem foi captada. Na medição da largura da fenda, foi posicionado um micrómetro ocular próximo à fenda, com o objetivo de ter uma referência de distância. Posteriormente, foram efetuadas dez medições em localizações aleatórias da fenda. A média das respetivas medições (L1, L2, ..., L10 - Figura 85) será admitida como o valor medido.

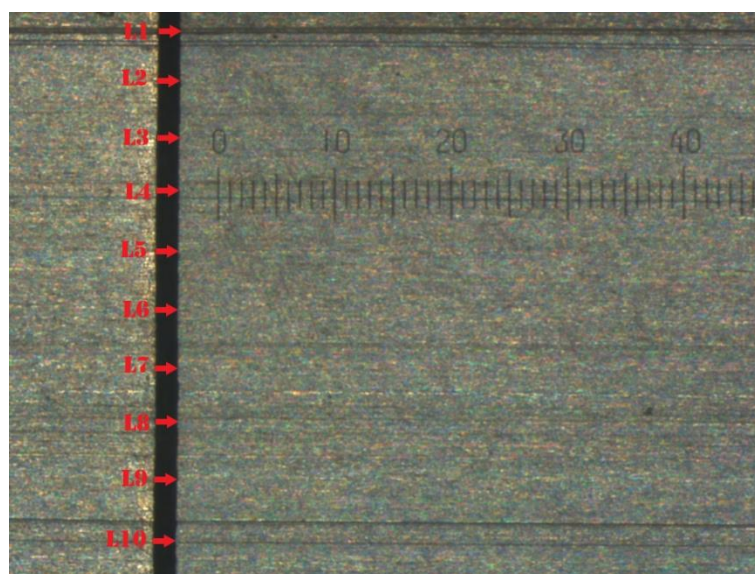


Figura 85 – Exemplo: medição da largura da fenda.

O mesmo procedimento foi aplicado na medição da escória aderente. Como referência foi utilizada a espessura do tubo, visto que é uma distância conhecida à escala da imagem. A altura da escória aderente foi medida perpendicularmente à superfície exterior do tubo, desde o local onde é notado o ponto de separação (início da região de arrasto), até ao ponto em que esta região se propaga como escória, para além da superfície interior do tubo.

Pela imagem adquirida à superfície de corte resultante de cada combinação de níveis ensaiada, foram realizadas 10 medições à altura da escória. A média das 10 medições, foi considerada como o valor medido. Na Figura 86, são exemplificadas por linhas encarnadas, dez possíveis medições à altura da escória aderente.

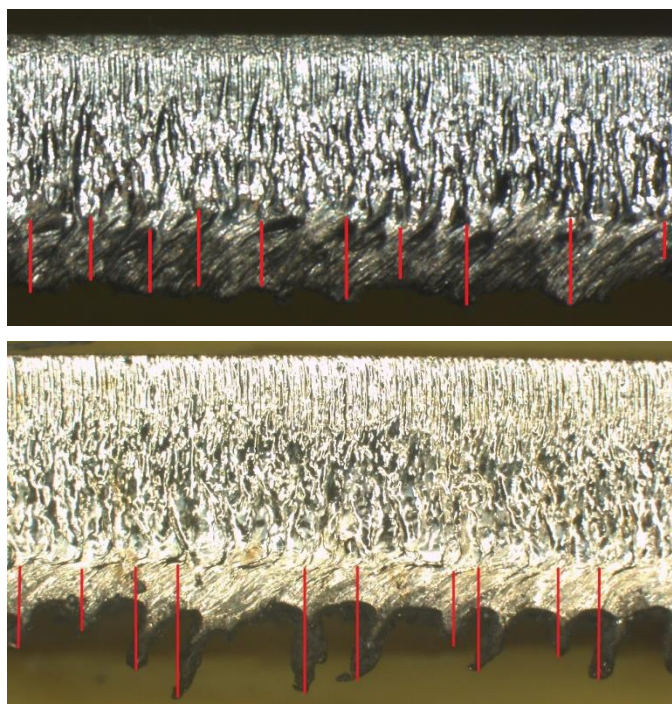


Figura 86 – Exemplo: medição da altura da escória aderente.

Contudo, nem todos os materiais/espessuras apresentaram escória ou região de arrasto. Assim, este parâmetro de qualidade apenas será avaliado para os materiais/espessuras onde foi verificado esse defeito.

Relativamente à rugosidade da superfície, esta foi medida de acordo com a norma EN-ISO 9013:2002. O rugosímetro foi calibrado antes de iniciar as medições. O parâmetro de rugosidade medido foi a média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz_5). Este parâmetro é calculado pelas médias das alturas máxima do perfil (Z_{ti}) medidas em 5 comprimentos de base (l_r) consecutivos, compreendidos num comprimento de avaliação (L_n) de 15 mm, tal como indica a Figura 55 (página 61).

Nos casos onde não é visível o ponto de separação do escoamento nem a respetiva região de arrasto, o parâmetro de rugosidade (Rz_5), foi medido numa região próxima à aresta inferior. Nos casos onde é notada a região de arrasto, tal como os apresentados na Figura 86, a rugosidade foi medida na região intermédia da superfície, ou seja, logo acima do ponto de separação do escoamento.

4. Apresentação dos Resultados Experimentais

A apresentação dos resultados e a respetiva análise será dividida por material e por espessura. Para cada material/espessura será apresentada uma tabela com as combinações de níveis empregues na matriz do ensaio final, de acordo com o arranjo ortogonal L9. Nessa mesma tabela, para cada uma das combinações de parâmetros utilizadas, serão apresentados os valores medidos para as características de qualidade em avaliação. Posteriormente, serão exibidas as imagens captadas às superfícies de corte.

4.1. Aço Estrutural, 3 mm de espessura

Na Tabela 26, são apresentadas as combinações de parâmetros utilizadas no procedimento DoE para o corte do tubo de aço estrutural (S275JOH), com 3 mm de espessura e secção circular ($\varnothing 100$ mm). Para cada combinação de parâmetros, são também apresentadas as variáveis de resposta medidas, nomeadamente, a largura da fenda e a média das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz_5).

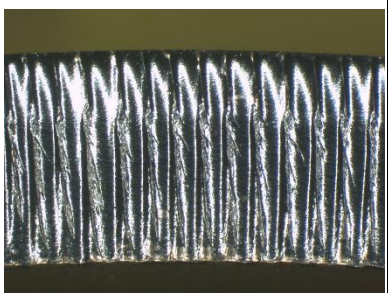
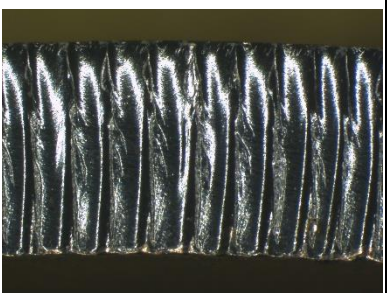
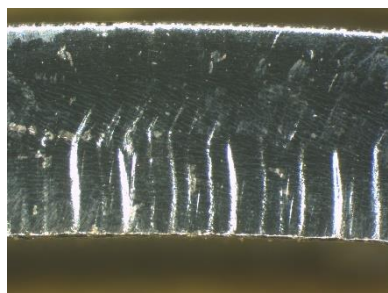
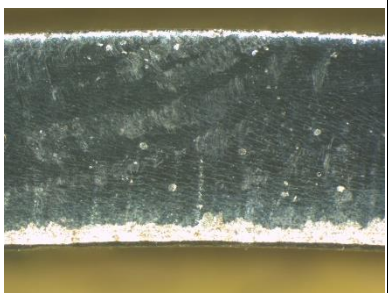
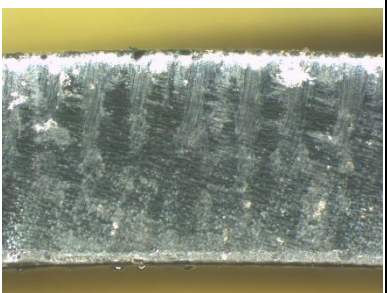
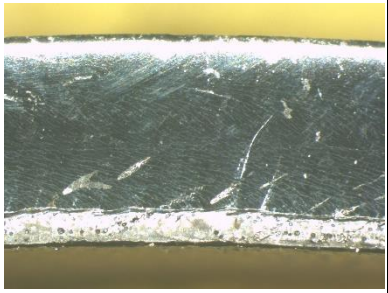
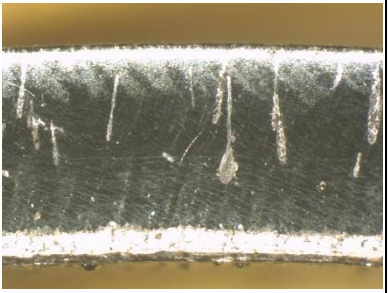
Tabela 26 - Resultados do procedimento DoE: Aço estrutural, 3 mm de espessura, tubo de secção circular.

Combinação de Parâmetros	Velocidade de corte [m/min]	Posição Focal [mm]	Pressão do gás de assistência [bar]	Largura da fenda [μ m]	Média das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz_5) [μ m]
C1	2	2	0.6	566	9.48
C2	2	3	0.8	715	17.04
C3	2	4	1	840	14.98
C4	3	2	0.8	589	4.66
C5	3	3	1	718	1.89
C6	3	4	0.6	848	1.21
C7	4	2	1	572	6.51
C8	4	3	0.6	642	1.22
C9	4	4	0.8	742	1.15

O tubo de onde foram retiradas as amostras e medidas as respostas é apresentado no ANEXO 1. A geometria do contorno de corte deste tubo diferenciou-se ligeiramente da geometria utilizada no corte dos restantes tubos, contudo o procedimento base foi mantido, ou seja, o corte de uma linha e de um retângulo para cada combinação de parâmetros (C1, C2, ... , C9). Apenas a localização radial desses cortes foi diferente, uma vez que foram realizados numa fase inicial do trabalho e a geometria de corte não teria ainda sido rigorosamente definida.

As imagens das superfícies de corte resultantes de cada combinação de parâmetros, são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço estrutural, 3 mm de espessura, tubo de secção circular.

C1	C2	C3
		
C4	C5	C6
		
C7	C8	C9
		

Numa análise às superfícies de corte da Tabela 27, pode ser observado que, na maioria dos casos, nem se verifica escória aderente, nem uma região de arrasto pronunciada (à exceção das combinações C7 e C4). Assim, a altura da escória não será avaliada para este material. É também visível o padrão de estrias ao longo de toda a espessura do material, para C2 e C3. Uma vez que nestas combinações, foi empregue o nível mais baixo de velocidade e níveis mais elevados de pressão de oxigénio, a formação de estrias pode ser justificada pelo fenómeno cíclico da reação de oxidação, fenómeno ilustrado pela Figura 54 (página 60). As superfícies de corte com menos defeitos visuais, são as obtidas para as combinações C5, C6, C8 e C9. Porém, nestas é visível a oxidação da aresta inferior de corte.

4.2. Aço Estrutural, 6 mm de espessura

Na Tabela 28, são apresentadas as combinações de parâmetros utilizadas no procedimento DoE para o corte de aço estrutural (S275JOH) com 6 mm de espessura, quer de secção circular (Ø114.3 mm), quer de secção retangular (80x40 mm). Para cada combinação de parâmetros, são também apresentadas as variáveis de resposta medidas para as diferentes geometrias, nomeadamente, a largura da fenda e a média das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz₅).

Tabela 28 - Resultados do procedimento DoE: Aço estrutural, 6 mm de espessura, tubo de secção circular e retangular.

Combinação de Parâmetros	Velocidade de corte [m/min]	Posição Focal [mm]	Pressão do gás de assistência [bar]	Largura da fenda [μm]		Média das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz ₅) [μm]	
				Tubo circular	Tubo retangular	Tubo circular	Tubo retangular
C1	0.9	2	0.4	591	591	8.518	12.808
C2	0.9	3.5	0.7	803	852	15.931	14.245
C3	0.9	5	1	981	1202	14.413	44.598
C4	1.3	2	0.7	572	607	11.197	13.937
C5	1.3	3.5	1	763	808	24.925	15.062
C6	1.3	5	0.4	947	1076	11.351	6.803
C7	1.7	2	1	533	604	16.124	13.239
C8	1.7	3.5	0.4	738	829	10.264	7.194
C9	1.7	5	0.7	972	1038	8.309	12.588

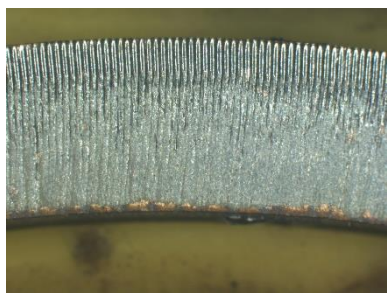
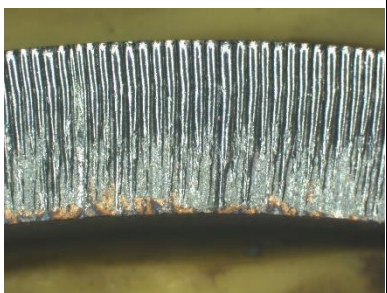
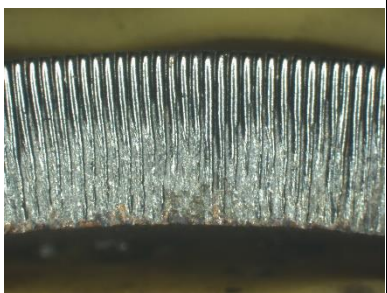
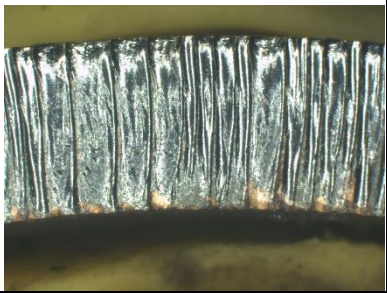
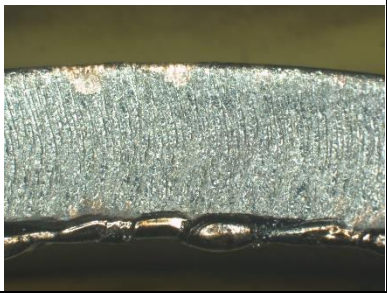
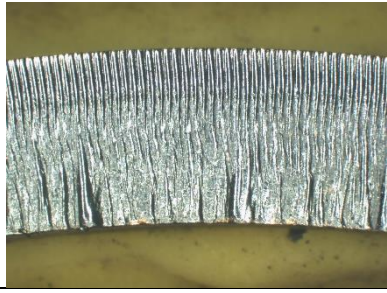
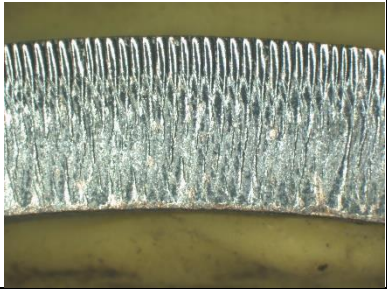
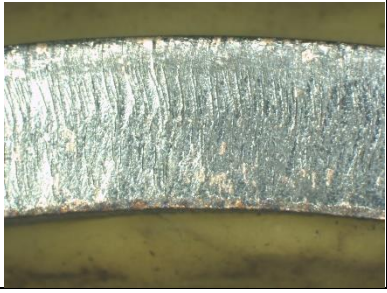
Os tubos de onde foram retiradas as amostras para avaliação, são apresentados no ANEXO 2. Para o tubo de secção circular, os cortes foram realizados segundo os contornos usados para a generalidade dos tubos (Figura 76 e Figura 77– páginas 93 e 94). Contudo, para o tubo de secção retangular, a estratégia de corte foi diferente. Visto que foi verificada uma elevada deposição de material na superfície interior do tubo, oposta à superfície onde foi realizado o corte, tornou-se inviável a utilização de ambas as superfícies. Assim sendo, o corte dos retângulos foi realizado numa porção de tubo e as linhas numa outra.

As dimensões dos contornos retangulares foram aumentadas, visto que foi observado um aumento do diâmetro do *piercing*. Deste modo, foi possível garantir que o *piercing* se restringia ao interior do contorno retangular. Por outro lado, tal como indica o ANEXO 2, o comprimento da porção do tubo onde foram realizados os contornos retangulares, foi também aumentado, de 200 mm para 320 mm, devido ao aumento das dimensões dos respetivos contornos retangulares. Relativamente aos contornos lineares, estes foram realizados noutra porção de tubo, esta com 110 mm de comprimento.

Na Tabela 29 e na Tabela 30 são apresentadas imagens das superfícies de corte, quer dos tubos de secção circular, quer dos de secção retangular, respetivamente. Através da análise visual às superfícies, pode ser verificada a tendência na formação de estrias cíclicas numa região próxima à aresta superior de corte, que é justificada pela utilização de oxigénio como gás de assistência, devido ao fenómeno cíclico de oxidação. A profundidade e frequência destas estrias

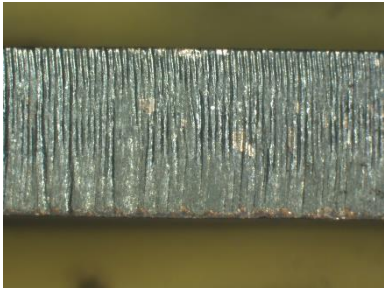
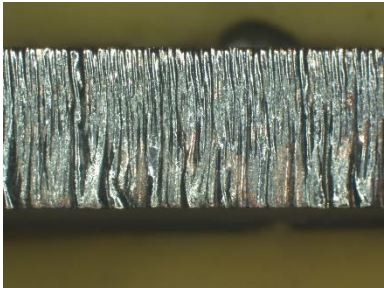
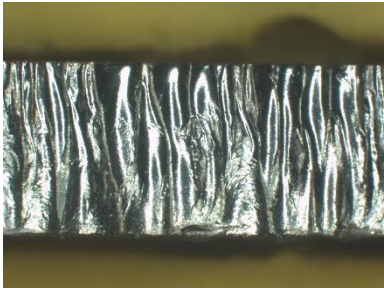
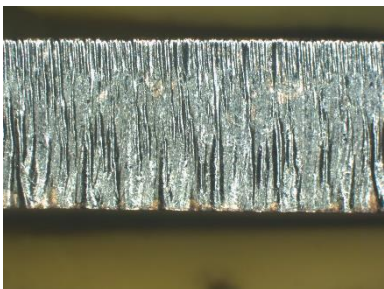
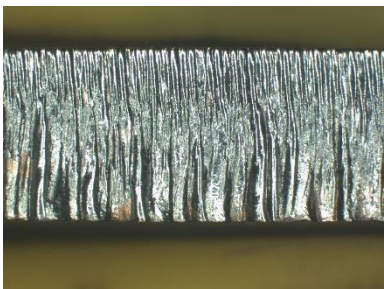
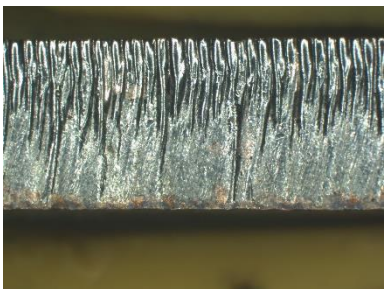
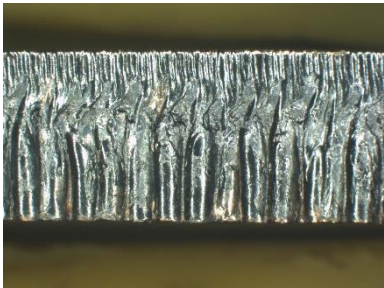
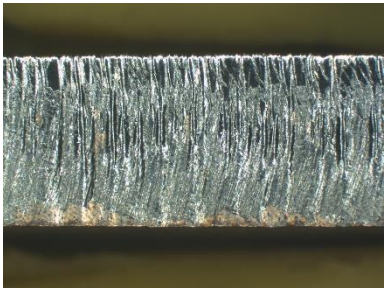
cíclicas é visivelmente alterada para diferentes posições focais, pressões do gás de assistência e velocidades de corte. Por outro lado, é também visível a inexistência de qualquer escória aderente à aresta inferior e, assim, esse parâmetro de qualidade não foi avaliado para este material. Excepcionalmente, a combinação de parâmetros C6 para o tubo circular, apresentou uma camada de escória aderente à superfície de corte.

Tabela 29 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço estrutural, 6 mm de espessura, tubo de secção circular.

C1	C2	C3
		
C4	C5	C6
		
C7	C8	C9
		

Em grande parte das superfícies, é observada uma região oxidada próxima à aresta inferior de corte, como consequência da utilização do mecanismo de corte por fusão reativa. A superfície com menos defeitos visuais, para o tubo de secção circular, foi a obtida pela combinação C9. Para tubos de secção retangular, as superfícies de corte apresentaram-se mais acidentadas. Contudo, é possível observar que a partir da combinação de parâmetros C3, C5 e C7, combinações que utilizam o maior nível de pressão do oxigênio, as estrias obtidas numa região inferior da superfície de corte são mais pronunciadas, possivelmente devido ao aumento do calor gerado na reação de oxidação (Sun e Brandt 2013).

Tabela 30 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço estrutural, 6 mm de espessura, tubo de secção retangular.

C1	C2	C3
		
C4	C5	C6
		
C7	C8	C9
		

4.3. Aço Inoxidável, 2 mm de espessura

Na Tabela 31, são apresentadas as combinações de parâmetros utilizadas no procedimento DoE para o corte de aço inoxidável (AISI 304) com 2 mm de espessura, quer de secção circular (Ø88.9 mm), quer de secção retangular (100x50 mm). Para cada combinação de parâmetros, são também apresentadas as variáveis de resposta medidas para as diferentes geometrias, nomeadamente, a largura da fenda e a média das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz₅).

Tabela 31 - Resultados do procedimento DoE: Aço inoxidável, 2 mm de espessura, tubo de secção circular e retangular.

Combinação de Parâmetros	Velocidade de corte [m/min]	Posição Focal [mm]	Pressão do gás de assistência [bar]	Largura da fenda [μm]		Média das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz ₅) [μm]	
				Tubo circular	Tubo retangular	Tubo circular	Tubo retangular
C1	4	-2	13	353	273	10.549	10.411
C2	4	-1	15	269	246	7.489	7.712
C3	4	0	17	257	265	7.573	6.309
C4	6	-2	15	343	315	10.458	10.079
C5	6	-1	17	349	264	8.304	9.125
C6	6	0	13	251	256	8.102	8.015
C7	8	-2	17	344	341	11.339	7.174
C8	8	-1	13	270	253	11.718	10.795
C9	8	0	15	256	167	5.811	5.716

Os tubos de onde foram retiradas as amostras para medição das características de qualidade, são apresentados no ANEXO 3. Em ambos, os cortes foram executados segundo os contornos usados para a generalidade dos tubos (Figura 76 e Figura 77 – páginas 93 e 94). Pelo ANEXO 3 é possível verificar a descoloração do material em diversas regiões, nomeadamente:

- Nas regiões onde foram feitos os *piercings* dos contornos lineares (Figura 87 (a)).
- Nas regiões opostas à superfície onde foram realizados os *piercings* dos contornos retangulares (Figura 87 (b)).
- Nas regiões opostas à superfície onde foram realizados os vértices dos contornos retangulares (Figura 87 (c)).

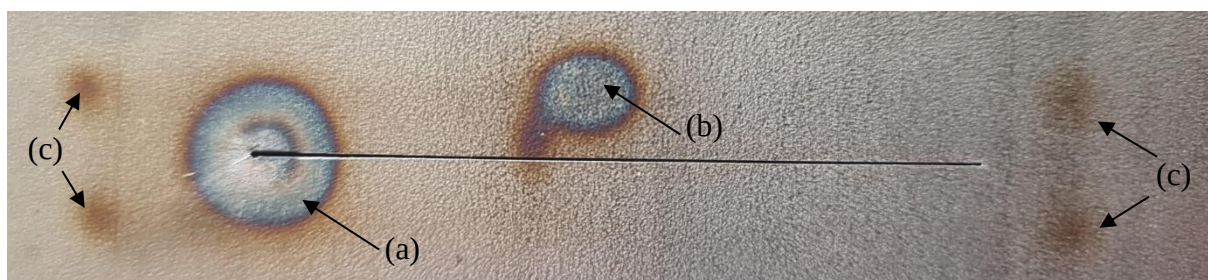


Figura 87 - Descoloração da superfície do tubo de secção retangular: Aço inoxidável, 2mm de espessura.

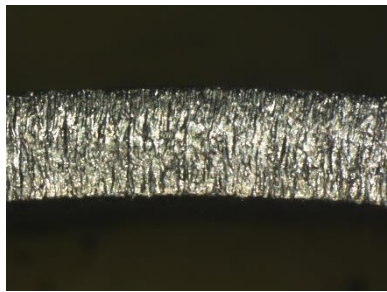
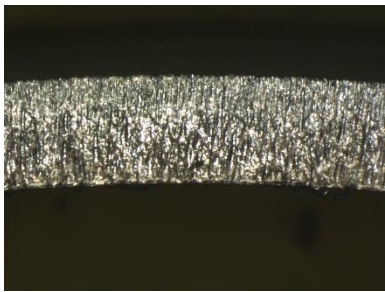
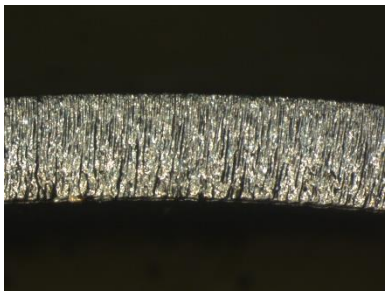
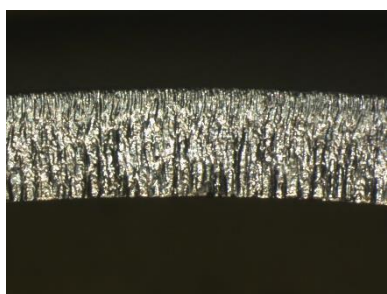
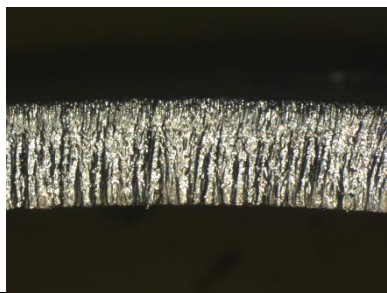
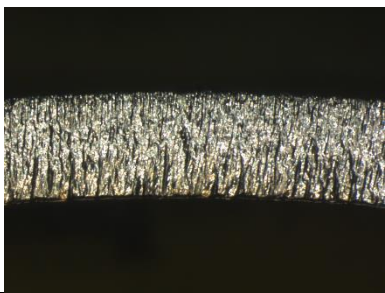
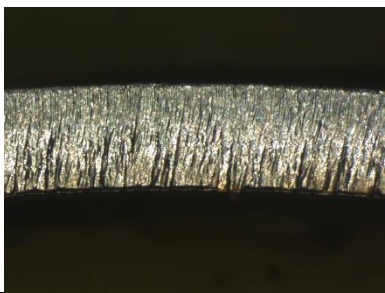
As regiões descoloridas são zonas termicamente afetadas resultado, da formação de uma camada de óxido mais espessa, composta por óxidos de ferro e crômio à superfície do material, consequência da elevação da temperatura acima de 250 °C (McGuire 2008). Pode confirmar-se por SEM/EDS que esta camada superficial tem maior teor mássico de crômio, devido à difusão deste elemento do material base para a superfície. Assim, a descoloração representa uma perda da resistência à corrosão do material base. (Tuthill e Avery 1999).

As marcas (a) e (b) da Figura 87, surgem devido aos parâmetros admitidos para realizar o *piercing* (Tabela 19 – página 91), parâmetros esses que foram mantidos ao longo do trabalho. Assim os parâmetros de *piercing*, nomeadamente: o tempo de *piercing*, a potência do laser, a frequência e o *duty-cycle*, não são os mais adequados para o corte de aço inoxidável com 2 mm de espessura, uma vez que é notada a degradação térmica do material por marcas de descoloração.

As marcas (c) da Figura 87, advêm da diminuição de velocidade devido à mudança de direção de corte, quando foram realizados os vértices dos contornos retangulares (face oposta), resultando num maior tempo de interação entre o feixe laser e o material, uma vez que a potência do laser foi mantida para velocidades inferiores. Para contornar tais defeitos, ou a potência do laser poderia ser reduzida, ou utilizado o modo pulsado de operação, de forma a que a quantidade de calor fornecida à frente de corte fosse, idealmente, mantida constante, durante esta desaceleração.

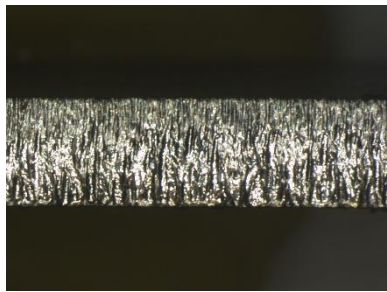
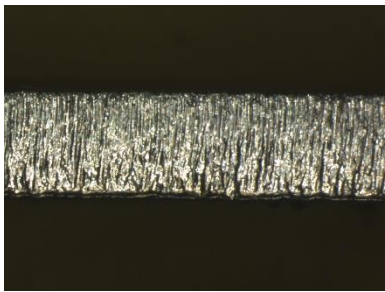
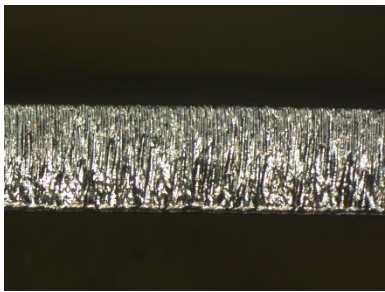
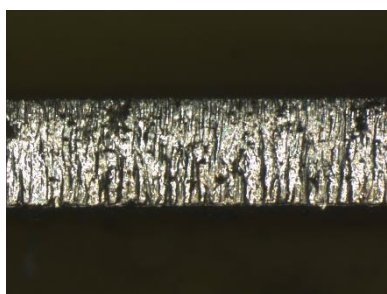
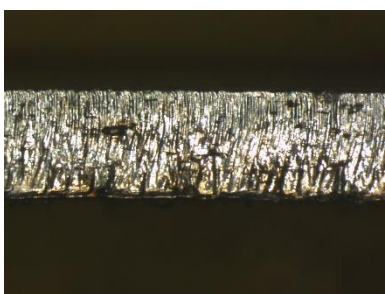
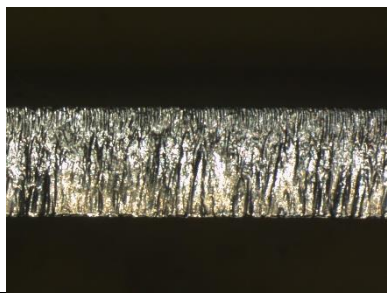
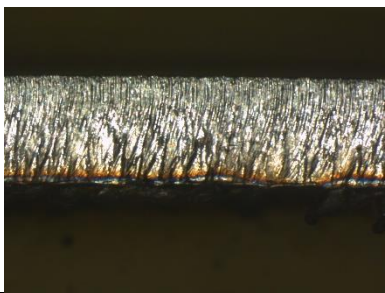
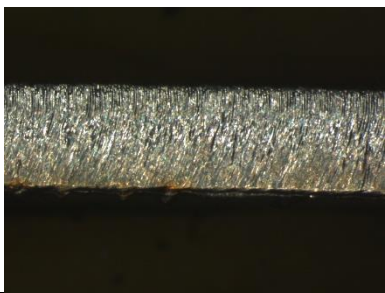
Apesar de identificados tais defeitos, o presente trabalho não estuda, nem os parâmetros de *piercing*, nem o corte de contornos complexos, mas sim o de corte contínuo de contornos simples. Assim, as características de qualidade em avaliação foram medidas numa região afastada das marcas de descoloração, de forma a que tais defeitos térmicos tenham o mínimo efeito sobre as variáveis de resposta medidas. As imagens das superfícies de corte para o tubo de secção circular são apresentadas na Tabela 32 e para o tubo de secção retangular, na Tabela 33.

Tabela 32 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço inoxidável, 2 mm de espessura, tubo de secção circular.

C1	C2	C3
		
C4	C5	C6
		
C7	C8	C9
		

O estado das superfícies de corte para ambas as geometrias do tubo, demonstrou-se mais acidentado numa região próxima à aresta inferior. Visto que foi utilizado um gás inerte como gás de assistência (azoto), a reação de oxidação é limitada e as estrias cíclicas menos pronunciadas. Por outro lado, pela combinação de parâmetros C8, é visível a descoloração da aresta inferior de corte, para o tubo de secção retangular, possivelmente relacionada com a ineficácia na expulsão do material fundido. Uma vez que na combinação C8, é utilizado o nível mais baixo de pressão e o mais alto de velocidade, o material fundido é acumulado por mais tempo na aresta inferior, resultando num aumento da temperatura desta região e, como consequência, ocorre a descoloração. Por outro lado, a combinação C9 foi a que garantiu uma superfície de corte mais limpa para o tubo de secção retangular. Para o tubo de secção circular não foi possível tirar conclusões visuais sobre a melhor qualidade de superfície, uma vez que as superfícies se demonstraram idênticas.

Tabela 33 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço inoxidável, 2 mm de espessura, tubo de secção retangular.

C1	C2	C3
		
C4	C5	C6
		
C7	C8	C9
		

4.4. Aço Inoxidável, 5 mm de espessura

Na Tabela 34, são apresentadas as combinações de parâmetros utilizadas no procedimento DoE para o corte de aço inoxidável (AISI 304), com 5 mm de espessura e secção retangular (100x50 mm). Para cada combinação de parâmetros, são também apresentadas as variáveis de resposta medidas, nomeadamente: a largura da fenda, a altura da escória aderente e a média das alturas máximas do perfil de rugosidade (R_{z5}).

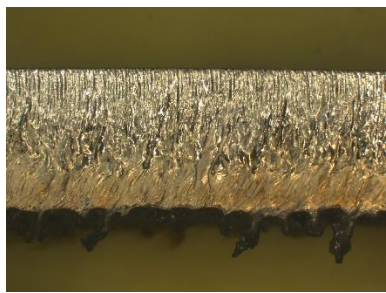
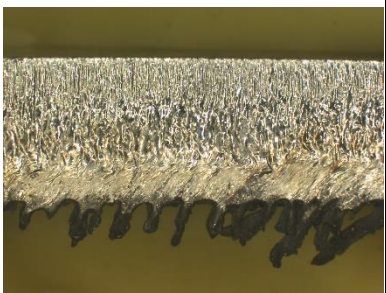
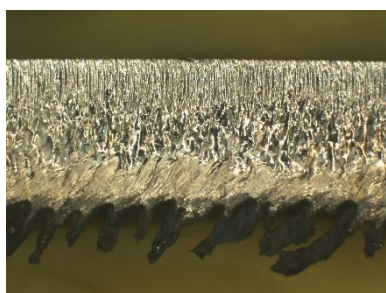
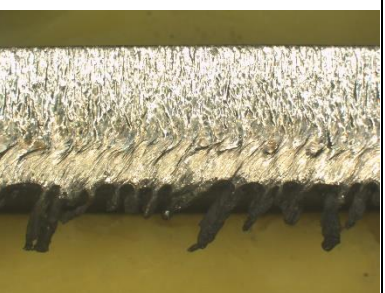
Tabela 34 - Resultados do procedimento DoE: Aço inoxidável, 5 mm de espessura, tubo de secção retangular.

Combinação de Parâmetros	Velocidade de corte [m/min]	Posição Focal [mm]	Pressão do gás de assistência [bar]	Largura da fenda [μm]	Altura da escória aderente [μm]	Média das alturas máximas do perfil de rugosidade (R_{z5}) [μm]
C1	0.8	-6	9	620	1821	9.77
C2	0.8	-5	10.5	567	1853	15.31
C3	0.8	-4	12	501	1943	16.16
C4	1.0	-6	10.5	652	1943	12.31
C5	1.0	-5	12	569	1707	13.33
C6	1.0	-4	9	455	1734	16.86
C7	1.2	-6	12	644	1319	12.59
C8	1.2	-5	9	548	1584	14.59
C9	1.2	-4	10.5	471	1636	12.50

O tubo de onde foram retiradas as amostras para realização das medições, é apresentada no ANEXO 4. Os cortes foram feitos segundo os contornos usados para a generalidade dos tubos (Figura 76 – página 93). Pelo ANEXO 4, é possível identificar uma região de cor acastanhada, em torno dos cortes lineares realizados com as combinações de parâmetros que utilizam o nível mais baixo de velocidade (C1, C2, C3), indicando assim uma ZTA mais larga. Tal é justificado pelo maior tempo de interação entre o feixe laser e o material, resultando numa maior dissipação do calor da frente de corte, para o material base.

Por outro lado, é também possível identificar uma região descolorida em torno do *piercing*, indicando que os parâmetros admitidos para esse efeito (Tabela 19 – página 91), resultam num fornecimento excessivo de calor ao material. Contudo essa região é menos evidente do que a observada para o mesmo material com 2 mm de espessura. As superfícies de corte resultantes do procedimento DoE aplicado a este material podem ser visualizadas na Tabela 35.

Tabela 35 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Aço inoxidável, 5 mm de espessura, tubo de secção retangular.

C1	C2	C3
		
C4	C5	C6
		
C7	C8	C9
		

Analisando as superfícies de corte, é possível identificar a deposição de escória na aresta inferior em todas as combinações de parâmetros utilizadas, indicando a ineficácia da expulsão do material do interior da fenda, possivelmente associada aos baixos níveis de pressão empregues ou à reduzida largura da fenda (Wandera e Kujanp 2010). Por outro lado, são visíveis três regiões da superfície de corte, com um padrões de irregularidades distintos. A região próxima à aresta superior da superfície, onde o laser funde diretamente o material e inicia-se o seu escoamento. A segunda região tem um padrão de irregularidades mais pronunciado, uma vez que o material não funde apenas pela ação direta do laser, mas também pelo escoamento de material fundido a elevadas temperaturas ao longo da espessura, ainda em regime laminar. Numa região mais abaixo, ocorre a separação do escoamento, onde é visível um padrão de irregularidades mais pronunciado e aleatório, devido à solidificação do material em regime turbulento de escoamento, sobre as paredes da fenda (Wandera 2016; Ivarson et al. 1994; Steen e Mazumder 2010).

É possível também verificar que a largura de cada uma das regiões abordadas varia com a variação dos factores controláveis. Por exemplo, as combinações C5 e C7 foram aquelas que garantiram uma maior profundidade de separação do escoamento, uma vez que a turbulência se inicia numa região mais próxima da aresta inferior, justificando-se pelo nível mais elevado de pressão gás de assistência empregue nestas combinações (Wandera e Kujanp 2010).

4.5. Alumínio, 2 mm de espessura

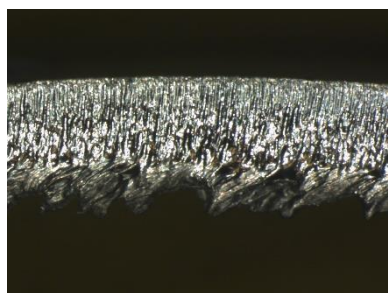
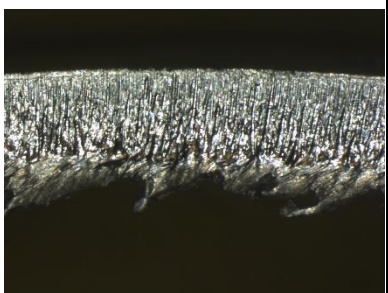
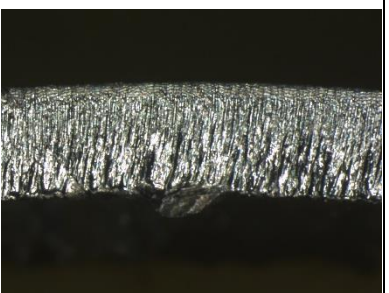
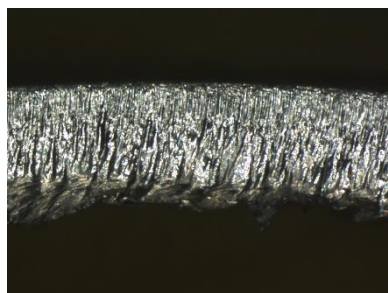
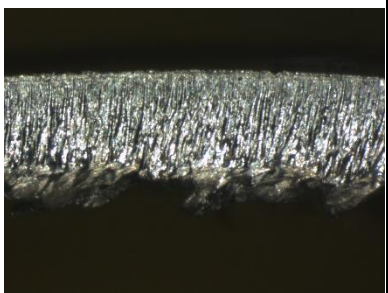
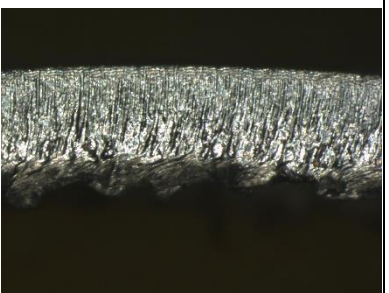
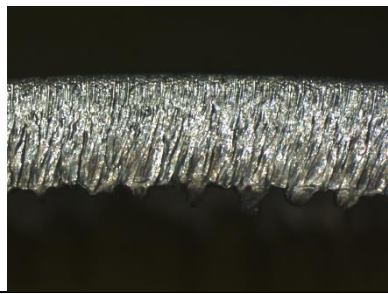
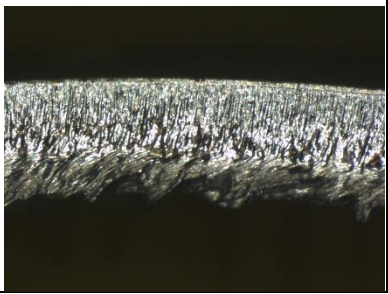
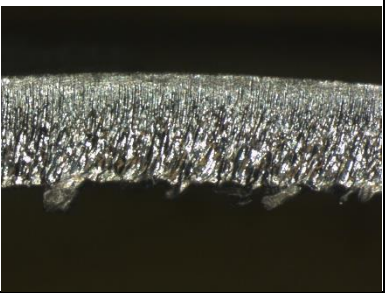
Na Tabela 36, são apresentadas as combinações de parâmetros utilizadas no procedimento DoE para o corte dos tubos em alumínio (AW6063) com 2 mm de espessura, quer de secção circular (Ø85 mm), quer de secção retangular (120x40 mm). Para cada combinação de parâmetros, são também apresentadas as variáveis de resposta medidas as diferentes geometrias, nomeadamente: a largura da fenda, a altura da escória aderente e a média das alturas máximas do perfil de rugosidade (R_{z5}).

Tabela 36 - Resultados do procedimento DoE: Alumínio, 2 mm de espessura, tubo de secção circular e retangular.

Combinação de Parâmetros	Velocidade de corte [m/min]	Posição Focal [mm]	Pressão do gás de assistência [bar]	Largura da fenda [μ m]		Altura da escória aderente [μ m]		Média das alturas máximas do perfil de rugosidade (R_{z5}) [μ m]	
				Tubo circular	Tubo retangular	Tubo circular	Tubo retangular	Tubo circular	Tubo retangular
C1	3.5	-2	10	279	233	670	660	12.425	12.132
C2	3.5	-1	13	201	188	601	854	10.365	10.376
C3	3.5	0	16	177	240	167	502	13.869	12.828
C4	5	-2	13	270	219	444	463	10.006	12.366
C5	5	-1	16	212	191	433	459	10.482	11.871
C6	5	0	10	173	264	517	895	11.724	8.880
C7	6.5	-2	16	278	233	219	107	10.887	12.922
C8	6.5	-1	10	196	190	719	986	10.461	12.110
C9	6.5	0	13	170	271	261	613	12.436	8.281

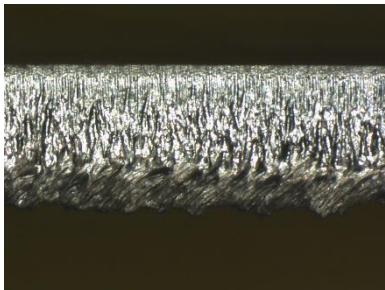
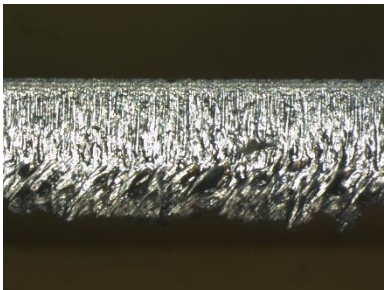
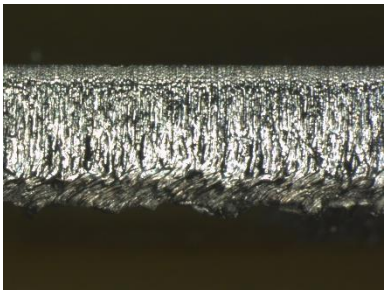
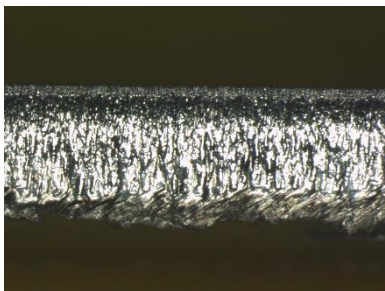
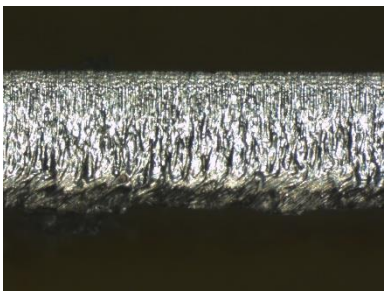
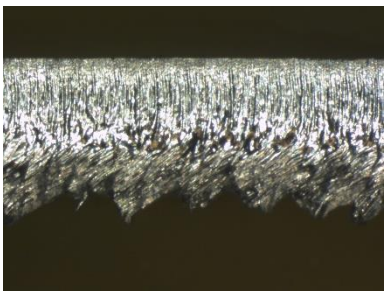
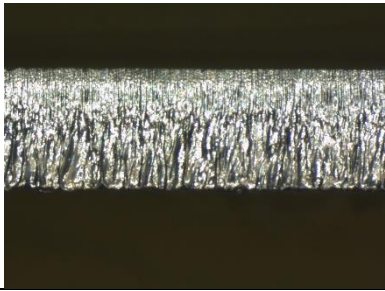
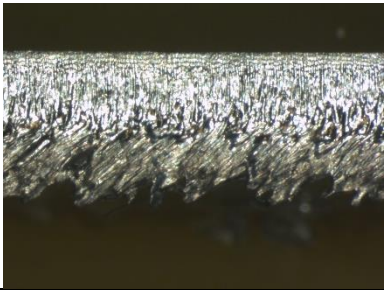
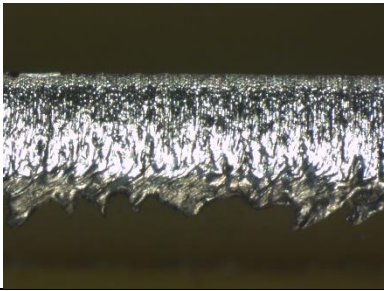
Os tubos de onde foram retiradas as amostras e medidas as respostas, são apresentados no ANEXO 5. Para ambos, os cortes foram realizados segundo os contornos experimentados para a generalidade dos tubos (Figura 76 e Figura 77 – páginas 93 e 94). As superfícies de corte obtidas pela aplicação do procedimento DoE, são apresentadas na Tabela 37 e na Tabela 38, para o tubo de secção circular e retangular, respetivamente.

Tabela 37 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Alumínio, 2 mm de espessura, tubo de secção circular.

C1	C2	C3
		
C4	C5	C6
		
C7	C8	C9
		

Através de uma análise às imagens, é visualizado, na maioria dos casos, duas regiões distintas. A parte superior da superfície, demonstra-se com um padrão de estrias regulares e pouco pronunciadas. Quanto à região inferior, para determinadas combinações de parâmetros, o estado da superfície apresentou-se mais irregular e com alguma escória aderente. A superfície que se demonstrou mais limpa, sem diferenciação de regiões, foi a combinação C7. Isto verificou-se tanto para tubos retangulares como para tubos circulares. As combinações C5 e C3 também se apresentaram com menos defeitos visuais. Tal pode ser justificado pelas tensões de corte exercidas pelo gás inerte de assistência (Wandera, Salminen e Kujanp 2009). Uma vez que para estas combinações foi utilizado o nível mais elevado de pressão, a capacidade de expulsão do material por parte do gás auxiliar, é superior, resultando em menos acumulação de material na aresta inferior de corte. Por outro lado, pressões mais elevadas retardam a separação do escoamento, ou seja, o escoamento é mantido laminar por uma distância superior. De acordo com um estudo realizado por Wandera (2016), o escoamento de material fundido deve ser mantido laminar para toda a espessura do material, evitando a aleatoriedade das estrias na parede da fenda de corte resultantes da solidificação do material que se encontrava em regime turbulento de escoamento (Wandera 2016).

Tabela 38 - Superfícies de corte para cada combinação de parâmetros: Alumínio, 2 mm de espessura, tubo de secção retangular.

C1	C2	C3
		
C4	C5	C6
		
C7	C8	C9
		

4.6. Qualidade das superfícies de corte

A rugosidade da superfície de corte é, entre todas as características de qualidade avaliadas no presente estudo, a única referida pela norma EN-ISO 9013:2002. Esta norma classifica os cortes realizados por processos térmicos, através de especificações geométricas e tolerâncias de qualidade. Como foi apresentado na Figura 56 (página 62), a norma EN-ISO 9013:2002 indica níveis de qualidade para diferentes valores de Rz_5 , de acordo com a espessura do material a cortar. As classes de qualidade são numeradas pela norma de 1 a 5, sendo a número 5 a pior qualidade (European Committee for Standardization 2002).

Na Figura 88, as rugosidades (Rz_5) medidas para as 9 superfícies de corte dos diferentes tubos ensaiados, são representadas graficamente de acordo com os níveis de qualidade abordados pela norma.

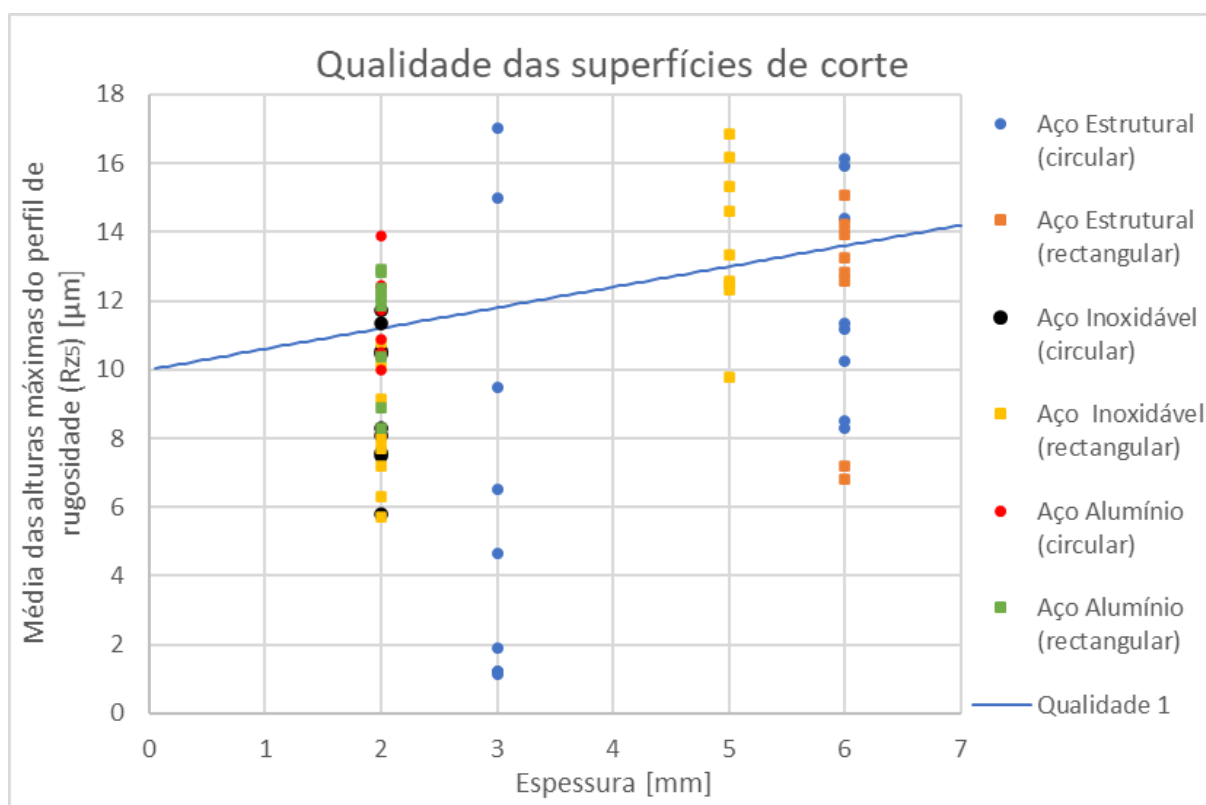


Figura 88 – Qualidade das superfícies de corte obtidas em função da rugosidade (Rz_5), de acordo com a norma EN-ISO 9013:2002.

Pela Figura 88, é possível aferir que, a maioria das combinações de parâmetros utilizadas para o corte dos diferentes tubos, proporciona superfícies de elevada qualidade (qualidade 1). Por outro lado, as superfícies classificadas com o nível 2, pouco se distanciam da linha limite de qualidade 1.

Este era um resultado expectável, visto que a norma faz referência a todos os processos de corte térmico e o corte a laser é, em comparação aos restantes, o processo que garante superfícies de corte menos rugosas. Por outro lado, este resultado indica que os níveis admitidos são adequados, sendo esperado que após a definição dos parâmetros ótimos, todas as superfícies sejam classificadas com a qualidade 1.

4.7. Análise estatística e discussão

Através dos valores medidos para as características de qualidade, será realizada uma análise estatística tendo por base o método de Taguchi. A análise dividir-se-á por característica de qualidade, ou seja, para cada material/espessura serão identificados quais os níveis de parâmetros, que minimizam o valor médio e maximizam o factor Sinal/Ruído (S/N) de cada uma das respostas (largura da fenda, altura da escória e rugosidade).

Através da análise à média das respostas, vão ser identificados os níveis que garantem uma média de resposta próxima à desejada. Pela análise aos factores Sinal/Ruído, será possível determinar os níveis que garantem maior robustez ao processo, ou seja, menos influência de ruído (factores não controláveis). Nos casos onde foi possível ensaiar duas geometrias diferentes, a geometria foi considerada um factor de ruído manipulado durante o ensaio, tendo como objetivo definir o conjunto de níveis que garante menor variabilidade no corte de ambas as geometrias. Nos casos onde não foi possível variar a geometria da secção do tubo, nenhum factor de ruído foi manipulado propositadamente e, assim, o factor sinal/ruído apenas terá em conta a variabilidade associada a factores não controláveis que tomam valores aleatórios durante o ensaio. Esses factores não controláveis podem estar associados: à temperatura do tubo antes de serem iniciados os cortes, à humidade e nível de oxigénio do meio envolvente, ao estado superficial dos tubos, à instabilidade térmica do processo (diferenças na absorção da energia pelo material com a direção de corte, flutuações de potência do laser e do calor gerado pela reação de oxidação), à instabilidade hidrodinâmica do processo, entre outros.

Os factores Sinal/Ruído avaliam a variação da resposta em relação ao valor pretendido, para ensaios realizados sob diferentes condições de ruído. Uma vez que serão apenas avaliados defeitos, o objetivo será minimizar qualquer uma das respostas medidas. O factor Sinal/Ruído que contempla a variação da resposta face ao valor nulo (“Menor melhor”) é calculado pela **Equação 4.1** (Kurt, Bagci e Kaynak 2009; Minitab® 2021):

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde n é o número de medições y_i realizadas para as características de qualidade, resultantes de cada combinação de parâmetros. Para os casos onde apenas será experimentada uma geometria, $n = 1$. Nos casos onde serão avaliadas duas geometrias de tubo diferentes, $n = 2$.

Posteriormente, será realizada uma análise de variância (ANOVA) aos valores médios da resposta. Através da ANOVA, será possível identificar a importância relativa dos três factores controláveis, pela comparação entre a média das respostas nos diferentes níveis de um dado factor. Passa por um teste de hipóteses, onde a hipótese nula (H_0) afirma que não há diferença entre a média da resposta para diferentes níveis de um dado factor e, assim, esse factor não tem influência na média da variável de resposta (Minitab® 2021). A hipótese alternativa (H_1), afirma que pelo menos um dos níveis desse factor, resulta numa resposta média significativamente diferente dos restantes níveis.

Aplicando um nível de significância, será possível evidenciar estatisticamente se a hipótese nula pode ser rejeitada para um dado factor controlável, ou seja, se esse factor tem influência significativa sobre o valor médio da resposta. Em adição, através da ANOVA será calculada a percentagem de contribuição de cada factor controlável, que representa a porção de variação observada no ensaio e atribuída a cada parâmetro (Ross 1996).

4.7.1.Aço Estrutural, 3 mm de espessura

4.7.1.1. Largura da fenda

Os resultados das medições realizadas para a largura da fenda após o corte de aço estrutural com 3 mm de espessura, foram apresentados na Tabela 26 (página 109). Através da **Equação 4.1**, foram calculados os factores S/N para as larguras de fenda obtidas para as diferentes combinações de parâmetros empregues no procedimento DoE (Tabela 39).

Tabela 39 – Factores S/N para as larguras de fenda. Aço estrutural, 3 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-55.06	-57.09	-58.49	-55.40	-57.12	-58.57	-55.15	-56.15	-57.41

Os efeitos de cada factor controlável são demonstrados na Tabela 40 e na Tabela 41, que indicam a média dos factores S/N e a média das respostas, respetivamente, para cada nível de cada factor. Os mesmos dados são também representados por gráficos de efeitos (Figura 89), que permitem uma análise intuitiva à influência dos níveis dos parâmetros, na resposta.

Tabela 40 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a largura de fenda. Aço estrutural, 3 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-56,88	-55,20	-56,59
2	-57,03	-56,79	-56,63
3	-56,24	-58,15	-56,92
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	0,80	2,95	0,33
Ranking	2	1	3

Tabela 41 - Resultado das médias das larguras de fenda [μm]. Aço estrutural, 3 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	707,0	575,7	685,3
2	718,3	691,7	682,0
3	652,0	810,0	710,0
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	66,3	234,3	28,0
Ranking	2	1	3

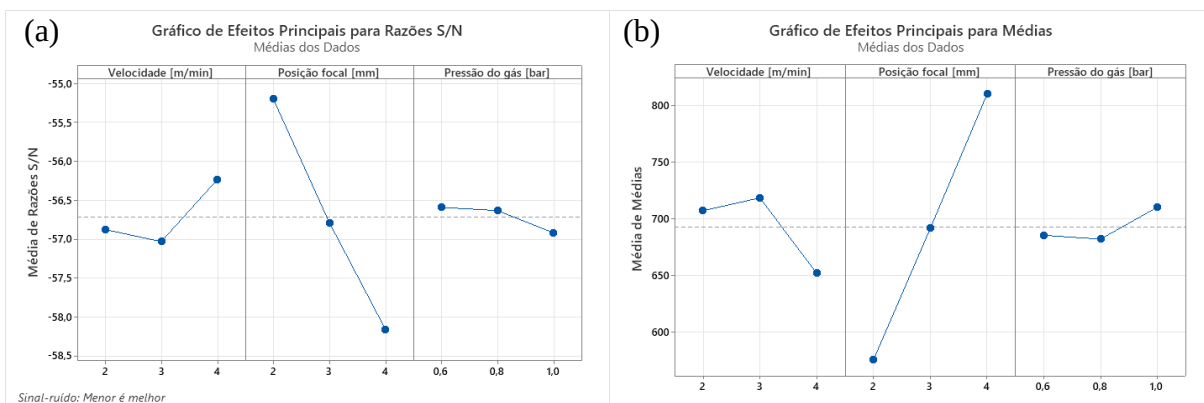


Figura 89 - Efeito dos parâmetros do processo na largura de fenda. Aço estrutural com 3 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da largura da fenda [μm].

Numa análise à Tabela 40, à Tabela 41 e à Figura 89, pode ser aferido que, tanto o factor S/N é maximizado, como a média da largura da fenda minimizada, para o nível 3 de velocidade de corte e nível 1 de posição focal. Relativamente à pressão de oxigénio, o factor S/N foi maximizado para o nível 1 e a média da resposta minimizada para o nível 2.

A maximização do factor S/N é pretendida de forma a garantir que os factores de ruído tenham o mínimo efeito na obtenção de uma largura de fenda reduzida, proporcionando, assim, a robustez do processo. A minimização do valor médio é desejada de forma que a largura média da fenda obtida seja o mais reduzida. Neste caso, a combinação de parâmetros que garante ambas, entra em conflito no nível de pressão do gás de assistência. Contudo, visto que o método DoE de Taguchi tem como principal objetivo garantir a robustez do processo, os parâmetros que maximizam S/N serão admitidos como ótimos para a redução da largura da fenda, sendo apresentados pela Tabela 42.

Tabela 42 - Parâmetros ótimos para redução da largura de fenda. Aço estrutural, 3 mm de espessura.

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
4 m/min	+2 mm	0.6 bar

Por outro lado, através da Tabela 40 e da Tabela 41, é possível identificar quais os parâmetros que apresentaram maior variação entre os resultados obtidos para os factores S/N e os obtidos para média das respostas, para os diferentes níveis de cada factor. O ranking classifica os factores controláveis, de acordo com a diferença entre máximo e o mínimo das respostas obtidas para cada nível ($\Delta_{\text{Max-Min}}$). Assim, é possível prever que a posição focal foi o parâmetro mais influente sobre a largura da fenda, uma vez que foi classificado em primeiro lugar, tanto para os factores S/N como para a média da resposta.

De forma a determinar a importância relativa entre parâmetros na redução da largura da fenda, foi efetuada uma análise de variância aos valores médios da resposta. O teste de hipótese foi realizado para um nível de significância de 5 %. Isto sugere que existe 5 % de risco de rejeitar a hipótese nula (H_0), quando ela realmente se verifica (Minitab® 2021). A ANOVA aos dados das médias da largura da fenda, foi realizada recorrendo ao software estatístico Minitab 20 e é apresentada na Tabela 43.

Tabela 43 - ANOVA à média das respostas para a largura de fenda. Aço estrutural, 3 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Percentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	7554	3776.8	3.78	0.209	8.09
Posição focal	2	82371	41185.4	41.18	0.024	88.26
Pressão	2	1404	701.8	0.70	0.588	1.50
Erro residual	2	2000	1000.1			2.14
Total	8	93328				100
S=31.6245; R ² =97.86 %						

O Valor-P na tabela ANOVA, é utilizado para determinar se a variação entre os valores médios obtidos, para os diferentes níveis cada um dos parâmetros, é estatisticamente significativa. Assim para um nível de significância de 5 %, caso o Valor-P seja inferior a 0.05, pode ser rejeitada a hipótese nula (Minitab® 2021). Tal acontece para a posição focal, podendo ser afirmado que existe evidência estatística de que a posição focal afeta a média da resposta (largura da fenda). Por outro lado, a hipótese nula (H_0) não deve ser rejeitada para os factores de velocidade e de pressão do gás de assistência, uma vez que não há evidência estatística que estes factores afetem a média da largura da fenda, pois a Valor-P > 0.05.

A Tabela 43 indica também que a posição focal contribuiu cerca de 88 % para o valor médio da resposta observada, seguindo-se a velocidade de corte com cerca de 8 % de contribuição. A contribuição da pressão do gás de assistência é desprezável, uma vez que apresenta uma contribuição inferior à do erro residual (Carbas 2008).

O coeficiente de determinação (R^2), é uma medida que indica a proporção de variação da resposta, que é explicada pelos factores controláveis (Alves 2019). Este valor varia de 0-100 %. Quanto mais próximo de 100 %, mais adequado é o modelo à variável de resposta, ou seja, a variação da resposta está mais relacionada com a variação dos níveis dos factores controláveis (Minitab® 2021).

Como era de esperar, a posição focal foi o parâmetro que mais afetou a largura da fenda, uma vez que está diretamente relacionado com a focagem do feixe laser e, assim, com o diâmetro do mesmo à superfície do tubo (Wandera e Kujanp 2010). Pela Figura 89 (b), é verificado que a largura da fenda aumenta com o distanciamento do plano de foco da superfície do tubo, uma vez que resulta num aumento significativo do diâmetro do feixe na sua superfície.

Por outro lado, os restantes parâmetros não se mostraram estatisticamente significativos sobre o valor médio da largura da fenda. Contudo, pela análise à Figura 89 (b), a largura da fenda é inferior para velocidades mais elevadas e para pressões mais reduzidas. Para velocidades mais elevadas há menos dissipação de calor para o material do substrato, uma vez que o feixe interage por menos tempo sobre uma dada localização do material, sendo o calor restringido a uma menor área, resultando em fendas mais estreitas. Por outro lado, para pressões de oxigénio reduzidas, a quantidade de calor gerada pela reação de oxidação é menor, limitando a propagação do calor para o material do substrato, reduzindo, assim, o volume de material fundido e, consequentemente, a largura da fenda (Madić e Radovanović 2012).

4.7.1.2. Rugosidade da superfície

Os resultados das medições realizadas à média das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz_5) das superfícies de corte resultantes da aplicação do procedimento DoE, para o aço estrutural com 3 mm de espessura, foram apresentados na Tabela 26 (página 109). As imagens adquiridas às respetivas superfícies, podem também ser visualizadas na Tabela 27 (página 110). Através da **Equação 4.1**, foram calculados os factores S/N para as rugosidades (Rz_5) das superfícies obtidas, para cada combinação de parâmetros (Tabela 44).

Tabela 44 - Factores S/N para a rugosidade das superfícies de corte (Rz_5). Aço estrutural, 3 mm.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-19.54	-24.63	-23.51	-13.37	-5.55	-1.65	-16.27	-1.71	-1.25

A média dos factores S/N e a média das respostas, para cada nível de cada factor controlável, são apresentadas na Tabela 45 e na Tabela 46. Na Figura 90, são apresentados os mesmos dados em gráficos de efeitos, onde é possível verificar a evolução dos factores S/N e da média da largura da fenda, com o aumento dos níveis de cada factor controlável.

Tabela 45 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a rugosidade das superfícies de corte (Rz_5). Aço estrutural, 3 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-22.560	-16.394	-7.633
2	-6.855	-10.629	-13.083
3	-6.411	-8.804	-15.111
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	16.149	7.590	7.478
Ranking	1	2	3

Tabela 46 - Resultado das médias da rugosidade das superfícies de corte (Rz_5) [μm]. Aço estrutural, 3 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	13.835	6.885	3.970
2	2.588	6.718	7.619
3	2.961	5.782	7.796
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	11,248	1,103	3,826
Ranking	1	3	2

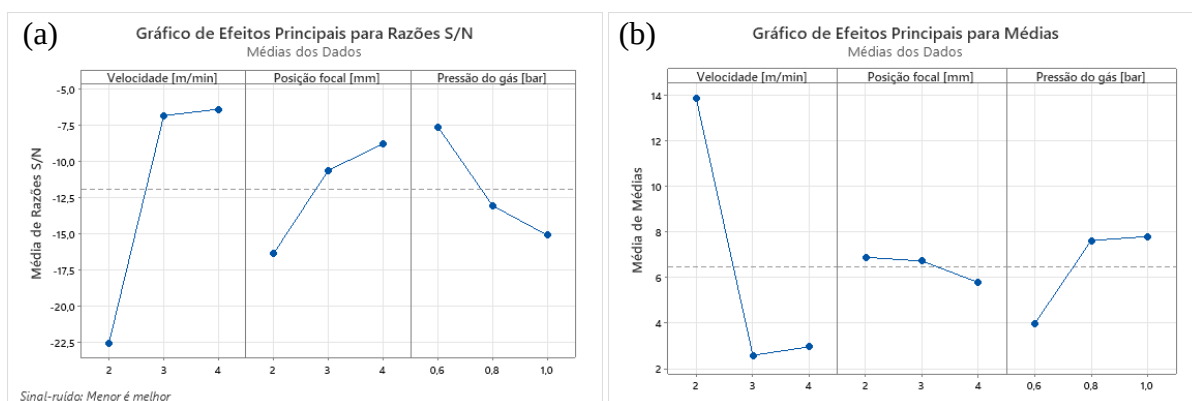


Figura 90 - Efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço estrutural com 3 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da rugosidade das superfícies de corte [μm].

A combinação de níveis que garante factores S/N mais elevados e respostas médias mais próximas de zero, é a combinação que admite o nível 3 de posição focal e o nível 1 de pressão do gás de assistência. Relativamente à velocidade de corte, o nível que garante a maximização do factor S/N é nível 3, enquanto o que garante uma média de rugosidade mais próxima à desejada é o nível 2. Contudo, os níveis que maximizam o factor S/N, são os níveis que garantem mais robustez ao processo e serão, por isso, admitidos como ótimos para a diminuição da rugosidade (Rz_5) da superfície de corte, tal como apresentado na Tabela 47.

Tabela 47 - Parâmetros ótimos para redução da rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço estrutural, 3 mm de espessura.

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
4 m/min	+4 mm	0.6 bar

Através do ranking referido na Tabela 46, pode ser visualizado que a velocidade de corte é o factor que mais afeta o valor médio da resposta, seguindo-se a pressão do gás de assistência e por último a posição focal. Por outro lado, na Tabela 45 a posição focal tem mais efeito sobre o factor S/N do que a pressão do gás de assistência, indicando, por isso, que a diferença entre a rugosidade obtida para os vários níveis de pressão, é a menos afetada pelos factores não controláveis do processo.

A ANOVA realizada à média da rugosidade da superfície de corte (Rz_5), é apresentada na Tabela 48, onde o teste de hipótese foi realizado para um nível de significância de 5 %.

Tabela 48 - ANOVA à média das rugosidades das superfícies de corte (Rz_5). Aço estrutural, 3 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Porcentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	244,894	122,447	9,41	0,096	81.35
Posição focal	2	2,119	1,059	0,08	0,925	0.70
Pressão	2	27,990	13,995	1,08	0,482	9.30
Erro residual	2	26,029	13,014			8.65
Total	8	301,031				100.00
S=3.6076; R^2 =91.35 %						

O Valor-P indica que para um nível de significância de 5 %, não há evidência estatística contra a hipótese nula (H_0) para qualquer um dos parâmetros. Contudo, quanto mais distante de zero se encontrar este valor, menos evidência existe contra esta hipótese. Assim sendo, a velocidade é o factor com mais significância sobre a média da rugosidade da superfície de corte (Rz_5), seguindo-se a pressão do gás de assistência e por último a posição focal. Em adição, se fosse considerado um nível de significância de 10 %, seria possível rejeitar a hipótese nula para a velocidade de corte, uma vez que o Valor-P < 0.10. Contudo, o risco de rejeitar a hipótese nula, caso esta fosse realmente verificada, aumentaria para 10 % (Minitab® 2021).

Relativamente aos factores que mais contribuíram para a variação observada à rugosidade da superfície de corte (Rz_5), a Tabela 48 indica que a velocidade de corte contribuiu cerca de 81 %, seguindo-se a pressão do gás de assistência com 9 % de contribuição e, por último, a posição focal, com uma contribuição insignificante, inferior à contribuição do erro residual.

A influência da velocidade de corte e da pressão do gás de assistência estão relacionadas com o fenómeno cíclico de oxidação quando utilizado o mecanismo de corte por fusão reativa, ou seja, quando é utilizado um gás que reage exotermicamente com o material, como é o caso do oxigénio. Este fenómeno é ilustrado na Figura 54 (página 60). Pressões de oxigénio mais elevadas, aumentam o calor gerado na frente de corte devido à reação de oxidação e, para velocidades de corte baixas, o feixe laser não acompanha a expansão da poça de fusão. Assim, o feixe inicialmente funde o material, a poça de fusão expande e solidifica, o ciclo recomeça quando o feixe atinge a região solidificada, formando as estrias cíclicas e como consequência um aumento da rugosidade (Wandera 2006). Para velocidades superiores tal fenómeno não é tão evidente, pois o feixe acompanha a expansão da poça de fusão, evitando que esta solidifique e se formem as estrias. Como pode ser verificado na Figura 90 (b), a média da resposta (Rz_5) aumentou com o aumento da pressão do oxigénio e diminuiu para velocidades de corte superiores.

A mesma conclusão foi retirada num estudo realizado por Madić e Radovanović (2012), através do corte a laser de aço macio com 2 mm de espessura, pelo mecanismo de corte por fusão reativa. Os autores afirmam que a diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade de corte, está associada à redução do tempo de interação do feixe com o material, resultando numa diminuição da energia térmica na frente de corte e, como consequência, a expansão da região fundida para o material do substrato é limitada, diminuindo a possibilidade de formação de estrias. Concluem também que a diminuição da pressão do gás de assistência restringe a propagação da poça de fusão, uma vez que existe menos oxigénio na frente de corte e o calor gerado pela reação exotérmica é mais reduzido (Madić e Radovanović 2012).

4.7.1.3. Parâmetros ótimos

De forma a definir a combinação de níveis que possibilite reduzir a generalidade dos defeitos analisados, na Tabela 49 é apresentado um resumo dos resultados obtidos para este material.

Tabela 49 - Níveis ótimos e percentagem de contribuição para cada uma das características de qualidade analisadas. Aço estrutural, 3mm de espessura.

	Velocidade de corte		Posição focal		Pressão do gás de assistência	
	Nível ótimo	Percentagem de contribuição	Nível ótimo	Percentagem de contribuição	Nível ótimo	Percentagem de contribuição
Largura da fenda	3	8.09 %	1	88.26 %	1	1.50 %
Rugosidade da superfície (Rz ₅)	3	81.35 %	3	0.70 %	1	9.30 %

Analisando a Tabela 49, é possível afirmar que tanto a largura da fenda como a rugosidade da superfície de corte (Rz₅), são minimizadas para o mesmo nível de velocidade de corte (nível 3) e de pressão do gás de assistência (nível 2).

Contudo, tal não se verifica para a posição focal, visto que o nível 1 garantiu a redução da largura da fenda e o nível 3 a redução da rugosidade. Contudo, uma vez que a percentagem de contribuição deste parâmetro foi bastante superior para a largura da fenda (88.26 %), face à sua contribuição para a rugosidade (0.70 %), o nível 1 de posição focal será admitido como o mais adequado para otimizar a globalidade das características de qualidade avaliadas.

Concluindo, para o aço de construção com 3 mm de espessura, a combinação de parâmetros que otimiza a qualidade de corte é:

- Velocidade de corte = 4 m/min (nível 3);
- Posição focal = +2 mm (nível 1);
- Pressão do gás de assistência = 0.6 bar (nível 1).

4.7.2.Aço Estrutural, 6 mm de espessura

4.7.2.1. Largura da fenda

Os resultados das medições realizadas à largura da fenda após o corte dos tubos de aço estrutural com 6 mm de espessura, quer de secção retangular, quer de secção circular, foram apresentados na Tabela 28 (página 111). Os factores S/N para a largura da fenda são apresentados na Tabela 50 e foram determinados considerando a geometria do tubo um factor de ruído, ou seja, foram calculados através da resposta obtida para os tubos de secção circular e da resposta obtida para os tubos de secção retangular.

Tabela 50 - Factores S/N para as larguras de fenda. Aço estrutural, 6 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-55.43	-58.36	-60.80	-55.41	-57.91	-60.12	-55.11	-57.90	-60.05

Os efeitos de cada factor controlável são expostos pela Tabela 51 e pela Tabela 52, que indicam a média dos factores S/N e a média das respostas, respetivamente, para cada nível de cada factor controlável. Na Figura 91, os mesmo dados são representados por gráficos de efeitos.

Tabela 51 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a largura de fenda. Aço estrutural, 6 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-58,20	-55,32	-57,81
2	-57,81	-58,05	-57,94
3	-57,68	-60,32	-57,94
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	0,51	5,00	0,13
Ranking	2	1	3

Tabela 52 - Resultado das médias das larguras de fenda [μm]. Aço estrutural, 6 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	836,7	583,0	795,3
2	795,5	798,8	807,3
3	785,7	1036,0	815,2
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	51,0	453,0	19,8
Ranking	2	1	3

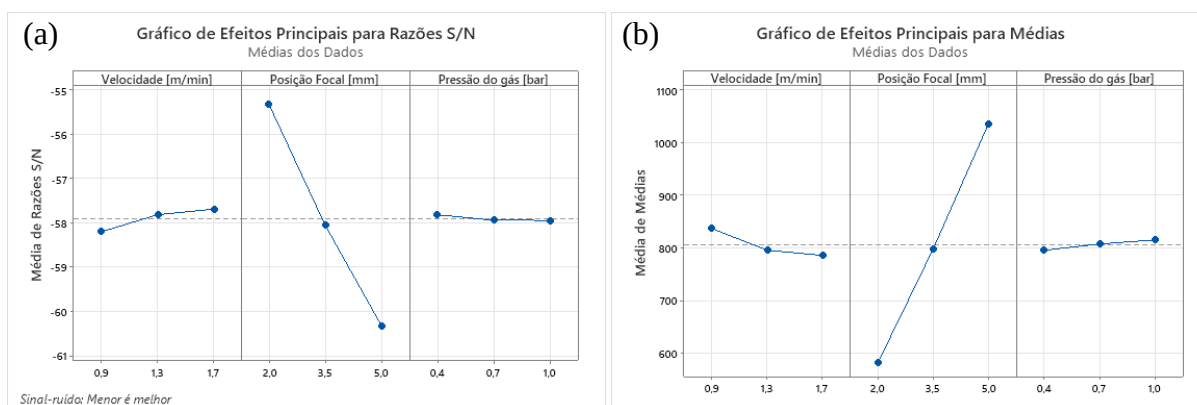


Figura 91 - Efeito dos parâmetros do processo na largura de fenda. Aço estrutural com 6 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da largura da fenda [μm].

Pela análise à Tabela 51, à Tabela 52 e à Figura 91, é possível afirmar que, tanto a média do factor S/N é maximizada, como a média da largura da fenda minimizada, para a mesma combinação de parâmetros, ou seja, nível 3 da velocidade de corte, nível 1 de posição focal e nível 1 de pressão do gás de assistência. Por outro lado, a posição focal é o factor que mais variação apresenta sobre as respetivas médias, seguindo-se a velocidade de corte e por último a pressão do gás de assistência. A combinação de parâmetros que garante a redução da largura da fenda para este material, tanto em tubos de secção circular como de secção retangular, é apresentada na Tabela 53.

Tabela 53 - Parâmetros ótimos para redução da largura de fenda. Aço estrutural, 6 mm de espessura.

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1.7 m/min	+2 mm	0.4 bar

A ANOVA realizada à média de respostas, para a largura da fenda, é apresentada na Tabela 54, onde o teste de hipótese será realizado para um nível de significância de 5 %.

Tabela 54 - ANOVA à média das respostas para a largura da fenda. Aço estrutural, 6 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Percentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	4392	2196	3,66	0,215	1.40
Posição focal	2	308041	154021	256,37	0,004	98.03
Pressão	2	599	299	0,50	0,667	0.19
Erro residual	2	1202	601			0.38
Total	8	314234				100
S=24.5108; R ² =99.62 %						

Analisando o Valor-P (Tabela 54), é possível afirmar que existe evidência, do ponto de vista estatístico, de que a posição focal afeta a média da largura da fenda (Valor-P < 0.05). Por outras palavras, a hipótese nula (H_0) pode ser rejeitada, visto que a posição focal é estatisticamente significativa na média da largura da fenda, para um nível de significância de 5 %. Por outro lado, a hipótese nula falha a ser rejeitada, quer para a velocidade de corte, como para a pressão do gás, não havendo prova estatística de que estes factores afetem a média da largura da fenda.

A percentagem de contribuição de cada um dos factores nos resultados observados para a largura da fenda, é apresentada na Tabela 54. A posição focal foi o parâmetro com maior contribuição (98 %), seguindo-se a velocidade de corte (1.4 %) e a pressão do gás de assistência (0.4 %).

Através da Figura 91 (b), é possível verificar que a média da largura da fenda aumenta principalmente com o distanciamento da posição focal da superfície do tubo, mas também com a diminuição da velocidade de corte e da pressão do gás de assistência. A influência da posição focal pode ser justificada pelo aumento do diâmetro do feixe na superfície do tubo, aumentando a área de material fundido e, dessa forma, a largura da fenda (Wandera e Kujanp 2010). Por outro lado, para velocidades reduzidas há mais calor a ser transferido para uma dada região do material, resultando numa maior dissipação de calor da frente de corte e, consequentemente, um maior volume de material é fundido e expulso da fenda, resultando em fendas mais largas. O mesmo acontece para pressões de oxigénio mais elevadas, visto que o gás é reativo, o aumento de pressão impulsiona a reação exotérmica oxigénio/material, aumentando o fornecimento de calor à frente de corte e, como consequência, um maior volume de material fundido é expulso pela fenda (Rasheed 2012; Madić e Radovanović 2012). Contudo, através do Valor-P da Tabela 54, não existe evidência estatística para um nível de significância de 5 % que a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência tenham efeito sobre as médias das respostas.

4.7.2.2. Rugosidade da superfície

Os resultados das medições realizadas à média das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz_5) após o corte dos tubos em aço estrutural com 6 mm de espessura, quer de secção retangular, como de secção circular, foram apresentados na Tabela 28 (página 111). As imagens captadas à superfície de corte resultante de cada combinação de parâmetros, podem ser verificadas na Tabela 29 (página 112), para os tubos de secção circular e na Tabela 30 (página 113), para os tubos de secção retangular. A rugosidade foi medida numa região próxima à aresta inferior da superfície de corte, visto que não foi observada qualquer região de arrasto, nem de escória.

Os factores S/N para a rugosidade da superfície (Rz_5) são apresentadas na Tabela 55 e foram determinados pela **Equação 4.1**, considerando a geometria do tubo um factor de ruído.

Tabela 55 - Factores S/N para a rugosidade das superfícies de corte (Rz_5). Aço estrutural, 6 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-20.73	-23.59	-30.41	-22.04	-26.27	-19.42	-23.38	-18.95	-20.56

Os efeitos de cada factor controlável são expostos na Tabela 56 e na Tabela 57, que indicam a média dos factores S/N e a média das respostas, respetivamente, para cada nível de cada parâmetro. Na Figura 92, os mesmo dados são representados por gráficos de efeitos.

Tabela 56 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a rugosidade das superfícies de corte (Rz_5). Aço estrutural, 6 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-24.91	-22.05	-19.70
2	-22.58	-22.94	-22.06
3	-20.96	-23.46	-26.69
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	3.94	1.42	6.98
Ranking	2	3	1

Tabela 57 - Resultado das médias da rugosidade das superfícies de corte (Rz_5) [μm]. Aço estrutural, 6 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	18.419	12.637	9.490
2	13.879	14.603	12.701
3	11.287	16.344	21.393
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	7.132	3.706	11.904
Ranking	2	3	1

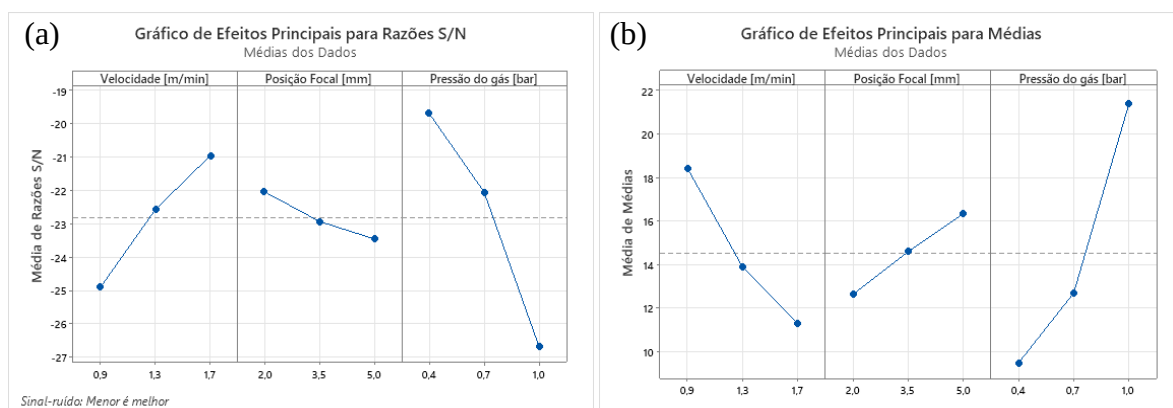


Figura 92 - Efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço estrutural com 6 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da rugosidade das superfícies de corte [μm].

Analisando a Tabela 56 e a Tabela 57, a combinação de factores que maximiza os factores S/N e minimiza a média da rugosidade da superfície de corte (Rz_5), é a que utiliza o nível 3 de velocidade de corte, o nível 1 de posição focal e o nível 1 de pressão do gás de assistência. Deste modo, os parâmetros que permitem, não só a minimização da rugosidade média, como

também a robustez no processo, durante o corte de tubos em aço estrutural com 6 mm em espessura, quer de secção circular quer de secção retangular, são exibidos na Tabela 58.

Tabela 58 - Parâmetros ótimos para redução da rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço estrutural, 6 mm de espessura.

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1.7 m/min	+2 mm	0.4 bar

De acordo com o ranking da Tabela 56, o factor controlável que mais afeta a média do factor S/N, é a pressão do gás de assistência, seguindo-se a velocidade de corte e, por último, a posição focal. O mesmo acontece para as médias da variável de resposta, como pode ser observado na Tabela 57.

Posteriormente foi realizada uma ANOVA à média das respostas (Rz_5), tal como apresentado na Tabela 59. Foi utilizado um nível de significância de 5 % para o teste de hipóteses, em que a hipótese nula afirma que a média da resposta não difere significativamente com o nível de determinado factor e, assim, não tem efeito sobre o valor da resposta. A hipótese alternativa afirma que essa diferença existe e, por isso, esse factor tem influência na média das respostas medidas.

Tabela 59 - ANOVA à média das rugosidades das superfícies de corte (Rz_5). Aço estrutural, 6 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Percentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	78.20	39.10	2.91	0.256	22.13
Posição focal	2	20.63	10.32	0.77	0.566	5.84
Pressão	2	227.57	113.78	8.46	0.106	64.41
Erro residual	2	26.89	13.45			7.61
Total	8	353.29				100
S= 3.668; R^2 =92.39 %						

O Valor-P da Tabela 59, mede a evidência contra a hipótese nula. Assim, quanto mais afastado se encontrar este valor de zero, menos evidência existe para considerar que determinado factor tem influência significativa sobre a média da rugosidade da superfície (Minitab® 2021). De acordo com os respetivos valores, a pressão do gás de assistência foi o factor mais significativo sobre a média da rugosidade da superfície (Rz_5), seguindo-se a velocidade de corte e por último a posição focal. Contudo, visto que foi admitido um nível de significância de 5 %, não existe evidência estatística para poder rejeitar a hipótese nula para qualquer um dos parâmetros e, por isso, não é possível afirmar que os mesmos tenham influência sobre a média das respostas.

O factor que mais contribuiu para a média das respostas (Rz_5) durante a aplicação do procedimento DoE, quer para tubos de secção circular, como tubos de secção retangular, foi a pressão do gás de assistência, com uma contribuição percentual de cerca de 64 %. A velocidade

de corte demonstrou uma contribuição de 22 % e por último, a posição focal, com uma contribuição inferior à do erro residual, cerca de 6 %.

Tal como foi verificado para o mesmo material com espessura de 3 mm, a pressão do gás de assistência e a velocidade de corte foram os factores com maior contribuição para a rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Contudo para a espessura de 6 mm, a velocidade de corte demonstrou-se menos influente que a pressão do gás, podendo ser justificado pela abrangência do intervalo de níveis testado. Uma vez que para os 3 mm de espessura, a diferença entre o nível mais baixo e o mais alto de velocidade de corte foi de 2 m/min, no caso em questão a diferença foi apenas de 0.8 m/min, diminuindo então a contribuição deste parâmetro para a variação da resposta.

A mesma conclusão pode ser retirada para ambas as espessuras. Uma vez utilizado o mecanismo de corte por fusão reativa, a pressão de oxigénio e a velocidade de corte são os parâmetros mais influentes para a rugosidade, pois definem a quantidade de calor fornecida à frente de corte. A presença de uma maior quantidade de oxigénio com o aumento da pressão do gás, impulsiona a reação de oxidação metal/gás e a diminuição da velocidade aumenta a interação entre o feixe e o material. O fenómeno cíclico da reação de oxidação que foi ilustrado na Figura 54 (página 60), é, por isso, mais evidente, originando estrias cíclicas ao longo da superfície de corte e estimulando o aumento da rugosidade da superfície (Rasheed 2012; Madić e Radovanović 2012). Tal pode ser verificado na Figura 92, onde é visível a diminuição da média da resposta (Rz_5) com a diminuição da pressão do gás de assistência e o aumento da velocidade de corte.

4.7.2.3. Parâmetros ótimos

Tendo como objetivo definir a combinação de níveis que permite a otimização de todas as características de qualidade abordadas para este material, na Tabela 60 são resumidos os resultados obtidos durante a análise anterior.

Tabela 60 - Níveis ótimos e percentagem de contribuição para cada uma das características de qualidade analisadas. Aço estrutural, 6 mm de espessura.

	Velocidade de corte		Posição focal		Pressão do gás de assistência	
	Nível	Percentagem de contribuição	Nível	Percentagem de contribuição	Nível	Percentagem de contribuição
Largura da fenda	3	1.40 %	1	98.03 %	1	0.19 %
Rugosidade da superfície (Rz_5)	3	22.13 %	1	5.84 %	1	64.41 %

A Tabela 60 indica que, tanto a largura da fenda, como a rugosidade da superfície de corte, são minimizadas para a mesma combinação de parâmetros. Assim, pode ser concluído que a combinação que garante a otimização da qualidade de corte é:

- Velocidade de corte = 1.7 m/min (nível 3);
- Posição focal = +2 mm (nível 1);
- Pressão do gás de assistência = 0.4 bar (nível 1).

4.7.3.Aço Inoxidável, 2 mm de espessura

4.7.3.1. Largura da fenda

Os resultados das medições realizadas à largura da fenda após o corte dos tubos de aço inoxidável com 2 mm de espessura, quer de secção retangular, quer de secção circular, foram apresentados na Tabela 31 (página 114). Os factores S/N (“Menor melhor”) para a largura da fenda, foram determinados através da **Equação 4.1** e são apresentados na Tabela 61, considerando a geometria do tubo um factor de ruído.

Tabela 61 - Factores S/N para as larguras de fenda. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-49.98	-48.22	-48.33	-50.35	-49.81	-48.08	-50.69	-48.35	-46.69

Os efeitos de cada factor controlável são tabelados na Tabela 62 e na Tabela 63, que indicam a média dos factores S/N e a média das respostas, respetivamente, para cada nível de cada factor controlável. Os mesmos dados são também representados por gráficos de efeitos na Figura 93.

Tabela 62 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a largura de fenda. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-48,85	-50,34	-48,81
2	-49,41	-48,80	-48,42
3	-48,58	-47,70	-49,61
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	0,83	2,64	1,19
Ranking	3	1	2

Tabela 63 - Resultado das médias das larguras da fenda [μm]. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	277,2	328,2	276,0
2	296,3	275,2	266,0
3	271,8	242,0	303,3
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	24,5	86,2	37,3
Ranking	3	1	2

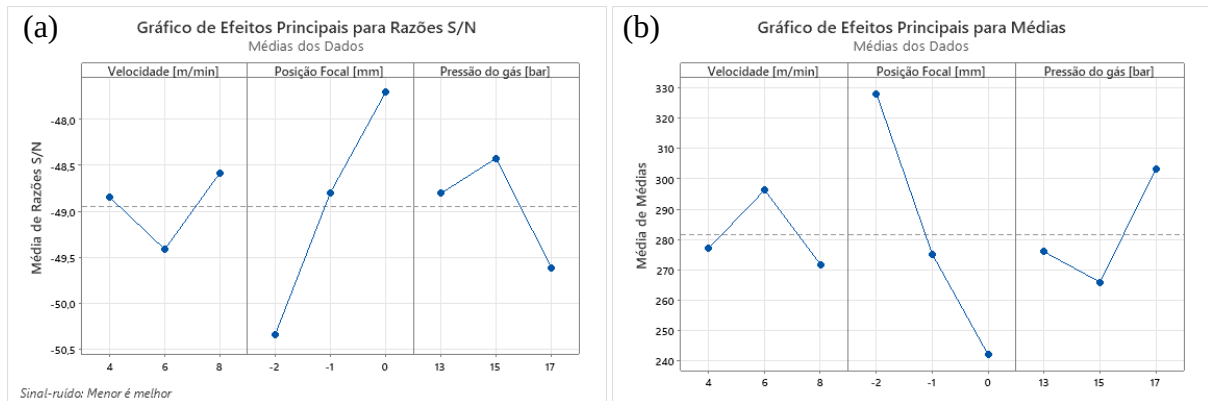


Figura 93 - Efeito dos parâmetros do processo na largura da fenda. Aço inoxidável com 2 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da largura da fenda [μm].

A Tabela 62 e a Figura 93 (a), indicam que os níveis de parâmetros que maximizam os factores S/N, são: o nível 3 de velocidade de corte, o nível 3 de posição focal e o nível 2 de pressão do gás de assistência. A maximização dos factores S/N é desejada para garantir a robustez do processo, ou seja, que a largura da fenda seja o mais reduzida possível para diferentes condições de ruído. Por outro lado, a Tabela 63 e a Figura 93 (b), indicam que a mesma combinação de parâmetros, minimiza a média da resposta. Assim sendo, a combinação de parâmetros que garante a redução da largura da fenda é a apresentada na Tabela 64.

Tabela 64 - Parâmetros ótimos para redução da largura da fenda. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
8 m/min	0 mm	15 bar

A ANOVA realizada às médias da resposta, é apresentada na Tabela 65. O teste de hipótese foi realizado para um nível de significância de 5 %. A hipótese nula indica que a variação de determinado parâmetro, não influencia a variação observada na variável de resposta. A hipótese alternativa pode ser aceite, caso seja verificado que o valor da resposta é significativamente diferente para pelo menos um nível desse parâmetro.

Tabela 65 - ANOVA à média das respostas para a largura da fenda. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Percentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	996,1	498,03	9,63	0,094	6.79
Posição focal	2	11333,7	5666,86	109,62	0,009	77.24
Pressão	2	2240,9	1120,44	21,67	0,044	15.27
Erro residual	2	103,4	51,69			0.70
Total	8	14674,1				100
S=7.1889; R ² =99.30 %						

Numa análise ao Valor-P, obtido na Tabela 65 para cada um dos factores, pode ser concluindo que a posição focal e a pressão do gás de assistência, são parâmetros estatisticamente significativos na média largura da fenda, uma vez que a hipótese nula pode ser rejeitada para um nível de significância de 5 % (Valor-P < 0.05). Isto significa que existe evidência estatística de ambos os parâmetros têm efeito sobre a média da resposta. Por outro lado, para o mesmo nível de significância, não é possível rejeitar a hipótese nula para a velocidade de corte e, assim, este parâmetro não tem efeito estatisticamente significativo sobre a média da largura da fenda.

A percentagem de contribuição de cada um dos factores nos resultados observados, é fornecida na Tabela 65. A posição focal foi o parâmetro com maior contribuição (77 %), seguindo-se a pressão do gás de assistência (15 %) e, por último, a velocidade de corte (7 %).

Tal como foi concluído para o aço de construção, a posição focal é o parâmetro que mais efeito tem sobre a largura da fenda, uma vez que está diretamente relacionada com a área do feixe laser sobre a superfície do material e, por isso, com a área de material que é fundido. Na Figura 93(b), pode ser observado que a média da largura da fenda, diminui com a aproximação do plano de foco da superfície exterior do tubo.

A pressão do gás de assistência (azoto), também se demonstrou estatisticamente significativa no valor medido para a largura da fenda. O nível de pressão mais elevado originou fendas mais largas. Tal está em concordância com as conclusões retiradas de um estudo realizado por Ghany e Newishy (2005), onde os autores afirmam que o aumento da largura da fenda com o aumento da pressão do gás, no corte de aço inoxidável com 1.2 mm de espessura, é justificado pelas superiores tensões de corte exercidas pelo escoamento de gás a alta pressão, sobre o material fundido que se encontra sobre as paredes da fenda.

O mesmo estudo indica que o aumento da velocidade de corte resulta em fendas mais estreitas. Embora não tenha sido provado estatisticamente que a velocidade de corte influencia a largura da fenda, a fenda foi mais estreita para a velocidade de corte mais elevada (Figura 93 (b)). Teoricamente esse é o resultado esperado, uma vez que para velocidades reduzidas, a interação feixe/material é superior, havendo mais energia na frente de corte e resultando numa maior dissipação de calor para o material do substrato (Ghany e Newishy 2005). Como consequência a área de material fundido é maior e as fendas mais largas.

4.7.3.2. Rugosidade da superfície

Os resultados das medições realizadas à média das alturas máximas do perfil de rugosidade (Rz_5) após o corte dos tubos de aço inoxidável com 2 mm de espessura, quer de secção retangular, quer de secção circular, foram apresentados Tabela 31 (página 114). As imagens das superfícies de corte foram exibidas na Tabela 32 (página 116), para os tubos de secção circular. Para os tubos de secção retangular, as respetivas superfícies de corte foram expostas na Tabela 33 (página 117)

A rugosidade foi medida numa região próxima à aresta inferior da superfície de corte. Os factores S/N (“Menor melhor”) para a rugosidade da superfície (Rz_5), são apresentados na Tabela 66 e foram determinados pela **Equação 4.1**, considerando a geometria do tubo um factor de ruído.

Tabela 66 - Factores S/N para a rugosidade das superfícies de corte (R_{z5}). Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-20.41	-17.62	-16.86	-20.23	-18.81	-18.13	-19.54	-21.04	-15.21

Os efeitos de cada factor controlável são apresentados na Tabela 67 e na Tabela 68, tabelas que indicam a média dos factores S/N e a média das respostas, respetivamente, para cada nível de cada factor. Na Figura 94, os mesmo dados são representados por gráficos de efeitos.

Tabela 67 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a rugosidade das superfícies de corte (R_{z5}). Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-18,30	-20,06	-19,86
2	-19,06	-19,16	-17,69
3	-18,60	-16,73	-18,41
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	0,76	3,33	2,17
Ranking	3	1	2

Tabela 68 - Resultado das médias da rugosidade das superfícies de corte (R_{z5}) [μm]. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	8.340	10.002	9.932
2	9.014	9.190	7.877
3	8.759	6.921	8.304
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	0.673	3.081	2.054
Ranking	3	1	2

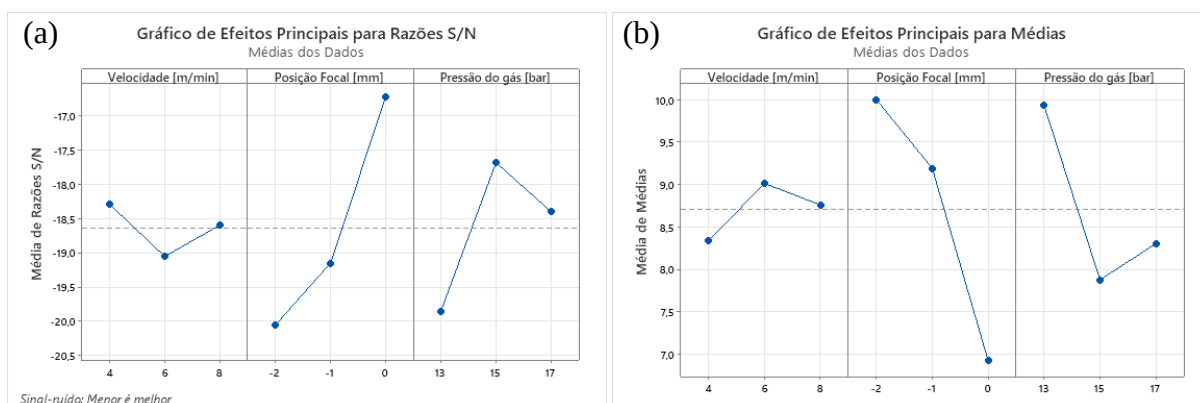


Figura 94 - Efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço inoxidável com 2 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da rugosidade das superfícies de corte [µm].

A Tabela 67, indica que a combinação de níveis que maximiza a média dos factores S/N, ou seja, que garante que a resposta se aproxime do valor desejado sob diferentes condições de ruído, é a combinação que utiliza o nível 1 de velocidade de corte, o nível 3 de posição focal e o nível 2 de pressão do gás de assistência (azoto). Da mesma forma, pela Tabela 68, é possível verificar que a mesma combinação de parâmetros, possibilita que o valor médio da resposta se aproxime do valor desejado, ou seja, do valor nulo. Por outro lado, é possível verificar que o factor controlável que mais afeta a média dos factores S/N, bem como a média das respostas, é a posição focal, factor classificado com o ranking 1, seguindo-se a pressão do gás de assistência e, por último, a velocidade de corte.

Assim sendo, a combinação de parâmetros que garante a rugosidade mínima para diferentes geometrias da secção do tubo e diferentes condições de ruído, é apresentada na Tabela 69.

Tabela 69 - Parâmetros ótimos para redução da rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
4 m/min	0 mm	15 bar

A ANOVA realizada à média das respostas medidas para a rugosidade da superfície de corte (Rz_5), é apresentada na Tabela 70. O teste de hipóteses foi realizado para um nível de significância de 5 %, ou seja, a probabilidade de aceitar que um factor controlável tem efeito sobre a média da resposta quando, na realidade, esse efeito não existe, é de 5 % (Minitab® 2021).

Tabela 70 - ANOVA à média das rugosidades das superfícies de corte (Rz_5). Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Percentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	0.6933	0.3467	0.25	0.800	2.69
Posição focal	2	15.2999	7.6500	5.52	0.153	59.27
Pressão	2	7.0509	3.5255	2.55	0.282	27.31
Erro residual	2	2.7694	1.3847			10.73
Total	8	25.8136				100
S= 1.1767; R^2 =89.27 %						

Analisando os Valores-P, apresentados na Tabela 70, é possível observar não existe evidência estatística, nos dados amostrais, de que a hipótese nula possa ser rejeitada para qualquer um dos factores controláveis, ou seja, não é possível afirmar que algum dos parâmetros tenha efeito significativo sobre a média das respostas (Rz_5) para o nível de significância admitido, uma vez que o Valor-P > 0.05.

Por outro lado, o factor que demonstrou mais influência sobre a rugosidade das superfícies de corte (Rz_5) observadas, foi a posição focal, com uma contribuição de cerca de 59 %. A pressão do gás de assistência contribuiu cerca de 27 % e a velocidade de corte, foi o factor que menos contribuiu, com cerca de 3 %.

Pela Figura 94 (b), pode ser observado que a rugosidade das superfícies de corte (Rz_5) é menor, caso a posição focal seja localizada sobre a superfície do tudo, ou seja, na posição que garante uma menor largura de fenda. A largura da fenda pode estar relacionada com a rugosidade da superfície, visto que para fendas mais largas o volume de material fundido é superior, diminuindo a capacidade de expulsão do material do interior da fenda, resultando num aumento da rugosidade da superfície.

Relativamente à pressão do gás de assistência, sendo um gás inerte, o aumento da pressão impulsiona as tensões de corte geradas pelas forças viscosas subjacentes ao escoamento de gás sobre a camada de material fundido (Riveiro et al. 2019). Tal pode ser verificado na Figura 94 (b), que indica que para os dois níveis mais elevados de pressão, a rugosidade da superfície foi inferior à média, justificando-se pela superior capacidade do gás em expulsar este material do interior da fenda.

Uma vez que a contribuição da velocidade de corte foi pouco significativa, pode ser contraditório a retirada de conclusões acerca deste parâmetro. Contudo foi verificado que a rugosidade mínima, foi obtida para o nível mais baixo de velocidade. Este resultado diferencia-se dos estudos realizados por outros autores, dado que para materiais com espessura reduzida, afirmam que a rugosidade é diminuída com o aumento da velocidade, até um nível crítico. Aumentar a velocidade acima desse nível crítico, resultaria num novo aumento da rugosidade (Rajaram, Sheikh-Ahmad e Cheraghi 2003; Jiang et al. 2020; Wandera 2006). Neste trabalho foi observado o oposto.

4.7.3.3. Parâmetros ótimos

De forma a definir os níveis dos parâmetros que reduzem a globalidade dos defeitos avaliados para este material, na Tabela 71 são resumidos os dados obtidos para as respectivas características de qualidade.

Tabela 71 - Níveis ótimos e percentagem de contribuição para cada uma das características de qualidade analisadas. Aço inoxidável, 2 mm de espessura.

	Velocidade de corte		Posição focal		Pressão do gás de assistência	
	Nível	Percentagem de contribuição	Nível	Percentagem de contribuição	Nível	Percentagem de contribuição
Largura da fenda	3	6.79 %	3	77.24 %	2	15.27 %
Rugosidade da superfície (Rz₅)	1	2.69 %	3	59.27 %	2	27.31 %

A partir da Tabela 71, pode ser aferido que, quer a largura da fenda, quer a rugosidade da superfície, são reduzidas para os mesmos níveis de posição focal (nível 3) e de pressão do gás de assistência (nível 2).

Quanto à velocidade de corte, é possível verificar incompatibilidade entre o nível que reduz a largura da fenda (nível 3) e o nível que reduz a rugosidade da superfície (nível 1). Por outro lado, comparando a Figura 93 (página 139) com a Figura 94 (página 142), é possível identificar que a diferença entre os a média das respostas obtidas utilizado o nível mais baixo e o nível mais alto de velocidade de corte, é mínima, tanto para a largura da fenda como para a rugosidade da superfície. Porém, uma vez que a velocidade de corte apresentou maior contribuição para o valor medido à largura da fenda (6.79 %), face à contribuição apresentada para a rugosidade da superfície (2.69 %), o nível 3 de velocidade será admitido como ótimo.

Assim, a combinação que proporciona a redução da generalidade dos defeitos estudados é:

- Velocidade de corte = 8 m/min (nível 3);
- Posição focal = 0 mm (nível 3);
- Pressão do gás de assistência = 15 bar (nível 2).

4.7.4.Aço Inoxidável, 5 mm de espessura

4.7.4.1. Largura da fenda

Os resultados das medições realizadas à largura da fenda após o corte de aço inoxidável com 5 mm de espessura, foram apresentados Tabela 34 (página 118). Os factores S/N (“Menor melhor”) para as larguras de fenda, foram calculados através da **Equação 4.1** e são apresentadas na Tabela 72.

Tabela 72 - Factores S/N para as larguras de fenda. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-55.85	-55.07	-54.00	-56.28	-55.10	-53.16	-56.18	-54.78	-53.46

Os efeitos de cada factor controlável são apresentados na Tabela 73 e na Tabela 74, que indicam a média dos factores S/N e a média das respostas, respetivamente, para cada nível de cada parâmetro. Os mesmos dados são também representados por gráficos de efeitos na Figura 95.

Tabela 73 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a largura de fenda. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-54.97	-56.10	-54.59
2	-54.85	-54.98	-54.94
3	-54.80	-53.54	-55.09
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	0.17	2.56	0.50
Ranking	3	1	2

Tabela 74 - Resultado das médias das larguras de fenda [μm]. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	562.7	638.7	541.0
2	558.7	561.3	563.3
3	554.3	475.7	571.3
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	8.3	163.0	30.3
Ranking	3	1	2

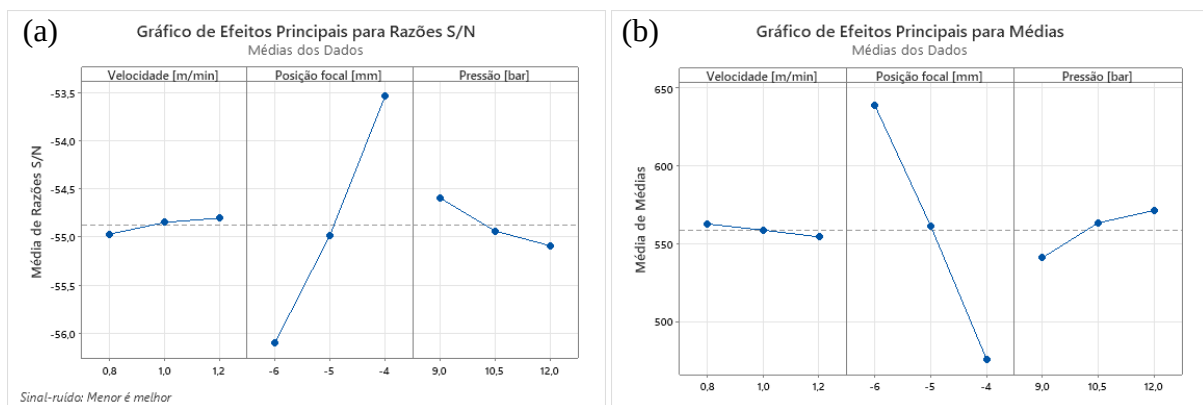


Figura 95 - Efeito dos parâmetros do processo na largura de fenda. Aço inoxidável com 5 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da largura da fenda [μm].

A Tabela 73, a Tabela 74 e a Figura 95, indicam que a combinação de factores controláveis que maximiza a média do factor S/N e minimiza a média da resposta, é a que utiliza o nível 3 de velocidade de corte, nível 3 de posição focal e o nível 1 de pressão do gás de assistência. Por outro lado, analisando os rankings apresentados nas respectivas tabelas, a posição focal foi o parâmetro que mais afetou a variação, quer do factor S/N, quer da média da resposta, seguindo-se a pressão do gás e por último a velocidade de corte. Assim sendo, na Tabela 75 são exibidos os níveis dos parâmetros que garantem a robustez do processo na obtenção de fendas estreitas.

Tabela 75 - Parâmetros ótimos para redução da largura de fenda. Aço inoxidável, 5 mm de espessura

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1.2 m/min	-4 mm	9 bar

A ANOVA realizada à média de respostas para a largura da fenda, é apresentada na Tabela 76, onde o teste de hipótese foi realizado para um nível de significância de 5 %.

Tabela 76 - ANOVA à média das respostas para a largura de fenda. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Percentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	104,2	52,1	0,32	0,758	0.25
Posição focal	2	39888,2	19944,1	122,02	0,008	95.42
Pressão	2	1482,9	741,4	4,54	0,181	3.55
Erro residual	2	326,9	163,4			0.78
Total	8	41802,2				100
S=0.2158; R²=99.22 %						

Através de uma análise à Tabela 76, é possível afirmar que o único parâmetro que apresentou evidência estatística sobre a média das respostas, foi a posição focal, uma vez que o Valor-P < 0.05. Assim, para este factor pode ser aceite como válida a hipótese alternativa (H_1) e concluído que a posição focal afeta significativamente a largura da fenda. Relativamente à velocidade e à pressão do gás de assistência, não existem evidências estatísticas que possibilitem a rejeição da hipótese nula (H_0), ou seja, que possibilitem afirmar que estes parâmetros tenham efeito sobre a média das respostas.

A mesma Tabela 76, indica ainda a percentagem de contribuição dos fatores controláveis nos valores médios observados. A posição focal foi o parâmetro que mais contribuiu para a variação da largura da fenda (95 %), seguindo-se a pressão do gás de assistência (3.55 %) e por último a velocidade de corte (0.25 %), que apresentou uma contribuição desprezável, inferior à contribuição do erro residual.

Como foi verificado para os materiais/espessuras analisados até aqui, a posição focal é o parâmetro que mais influência demonstra sobre a largura da fenda, uma vez que define o diâmetro do feixe sobre a superfície do tubo, originando fendas mais largas quando o plano focal se distancia do plano desta superfície, ou seja, quando o feixe está mais desfocado (Figura 95 (b)) (Wandera e Kujanp 2010).

Por outro lado, é possível verificar pela Figura 95 (b), que a largura da fenda tende a aumentar com o aumento da pressão do gás de assistência. Tal como foi concluído para o mesmo material com 2 mm de espessura, o aumento da pressão do gás justifica o aumento da largura da fenda, dado que a força exercida pelo gás sobre as paredes da fenda é superior. Como consequência, existe mais capacidade para expulsar o material termicamente afetado que se encontra próximo às paredes, resultando em fendas ligeiramente mais largas (Ghany e Newishy 2005).

Embora a contribuição da velocidade de corte para a largura da fenda tenha sido diminuta, pela Figura 95 (b), é possível identificar um aumento da largura da fenda com a redução da velocidade de corte. Tal é justificado pelo superior fornecimento de calor à frente de corte e pela dissipação do mesmo para o material do substrato. Uma vez que para velocidades reduzidas a interação feixe/material é superior, a frente de calor dissipa-se o material do substrato, aumentando o volume de material fundido e, como consequência, a largura da fenda (Ozaki et al. 2012).

4.7.4.2. Rugosidade da superfície

Os resultados das medições realizadas para a rugosidade (Rz_5) das superfícies de corte resultantes da aplicação do procedimento DoE em aço inoxidável com 5 mm de espessura, foram apresentados na Tabela 34 (página 118). As superfícies de corte podem ser visualizadas na Tabela 35 (página 119). Os factores S/N para a rugosidade da superfície (Rz_5) obtida para cada combinação de parâmetros, foram calculados a partir da **Equação 4.1** e são apresentados na Tabela 77.

Tabela 77 - Factores S/N para as rugosidades das superfícies de corte (Rz_5). Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-19.80	-23.70	-24.17	-21.80	-22.50	-24.54	-22.00	-23.28	-21.94

Os efeitos de cada factor controlável são expostos na Tabela 78 e na Tabela 79, que indicam a média dos factores S/N e a média das respostas, respetivamente, para cada nível de cada parâmetro. Os mesmos dados são também representados por gráficos de efeitos na Figura 96.

Tabela 78 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-22.56	-21.20	-22.54
2	-22.95	-23.16	-22.48
3	-22.41	-23.55	-22.89
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	0.54	2.34	0.41
Ranking	2	1	3

Tabela 79 - Resultado das médias da rugosidade da superfície de corte (Rz_5) [μm]. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	13.75	11.56	13.74
2	14.17	14.41	13.37
3	13.23	15.17	14.03
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	0.94	3.61	0.66
Ranking	2	1	3

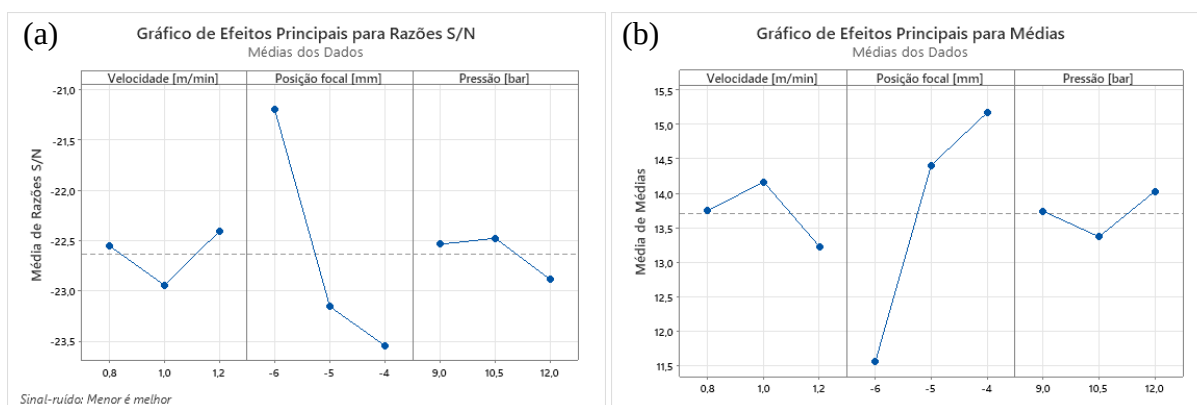


Figura 96 - Efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Aço inoxidável com 5 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da rugosidade das superfícies de corte [μm].

Pelos resultado obtidos para as médias dos factores S/N (Tabela 78 e Figura 96 (a)), a combinação de níveis que possibilita uma redução da rugosidade numa região intermédia da superfície de corte, é a que utiliza o nível 3 de velocidade de corte, o nível 1 de posição focal e o nível 2 de pressão do gás de assistência. Esta combinação assegura também a diminuição da média das respostas (Rz_5), tal como indicado pela Tabela 79 e pela Figura 96 (b). Assim sendo,

esta será a combinação de parâmetros definida como ótima, para a redução da rugosidade nesta região da superfície (Tabela 80).

Tabela 80 - Parâmetros ótimos para redução da rugosidade da superfície de corte (Rz_5) Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1.2 m/min	-6 mm	10.5 bar

Analizando os rankings da Tabela 78 e da Tabela 79, a posição focal foi o parâmetro que mais divergência demonstrou nos resultados obtidos, tanto para a média dos factores S/N, como para a média da resposta (Rz_5), seguindo-se a velocidade de corte e, por último, a pressão do gás de assistência.

A ANOVA realizada à média das respostas, é apresentada na Tabela 81. O teste de hipótese foi realizado para um nível de significância de 5 %. Caso haja evidência estatística de que a hipótese nula possa ser rejeitada para um dado parâmetro, pode ser admitido que esse parâmetro tem efeito sobre o valor médio da variável resposta.

Tabela 81 - ANOVA à média das rugosidades das superfícies de corte (Rz_5). Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor P	Porcentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	1.3301	0.6650	0.08	0.922	3.36
Posição focal	2	21.7646	10.8823	1.38	0.421	55.02
Pressão	2	0.6540	0.3270	0.04	0.960	1.65
Erro residual	2	15.8077	7.9039			39.96
Total	8	39.5564				100
S= 2.8114; R^2 =60.04 %						

O Valor-P da Tabela 81, indica a evidência contra a hipótese nula. Quanto mais próximo do valor nulo, mais evidência estatística existe para que a hipótese nula seja rejeitada, ou seja, para afirmar que um dos factores tem efeito significativo sobre valor médio da resposta. Contudo, para o nível de significância admitido (5 %), nenhum dos factores se demonstrou significativo. Assim, não há prova estatística para afirmar que algum dos parâmetros em causa, tenha efeito sobre a variação da média da resposta.

O factor que mais contribuiu para a variação da resposta observada foi a posição focal, com 55 % de contribuição, seguindo-se a velocidade de corte (3%) e, por último, a pressão do gás de assistência (2%). É também visível uma elevada contribuição do erro residual, cerca de 40 %. Isto significa que 40 % da variabilidade da resposta, não é explicada pelos factores controláveis em teste, indicando por isso, a baixa adaptabilidade do modelo (Minitab® 2021).

A análise à Figura 96 (b), indica que a rugosidade da superfície de corte (Rz_5), diminui com o distanciamento da posição focal da superfície do tubo exterior do tubo. Como foi visto anteriormente, a largura da fenda é superior para a posição de -6 mm, posição essa que garantiu

menor rugosidade da superfície. Sendo este um material espesso, o volume de material expulso através da fenda é necessariamente maior e, por isso, fendas mais largas garantem mais eficácia na expulsão desse material (Wandera, Salminen e Kujamp 2009).

Um estudo realizado por Wandera, Salminen e Kujamp (2009), conclui que a largura da fenda é um parâmetro determinante no corte de materiais espessos, uma vez que afeta o padrão de estrias. Esse estudo assinala que no corte de aço inoxidável com 10 mm de espessura, através de um laser de fibra com 5 kW de potência, posicionar o foco mais abaixo da superfície do material, diminui a rugosidade da superfície de corte, devido ao aumento da largura da fenda (Wandera, Salminen e Kujamp 2009). O mesmo se verificou no presente trabalho, onde o posicionamento do foco mais abaixo da superfície do material, garantiu a rugosidade mínima.

Contudo esta observação é oposta à conclusão retirada para o corte do mesmo material, mas com 2 mm de espessura. Tal pode ser justificado pela espessura do material. Sendo este um material mais espesso, há mais necessidade de alargar a fenda para possibilitar a devida ejeção do material fundido. Por outro lado, para materiais finos, o aumento da largura da fenda aumenta o volume de material fundido, reduzindo a capacidade de ser expulso do interior da fenda.

Um estudo realizado por Wandera (2016), conclui que a rugosidade da superfície de corte é diminuída com o aumento da pressão do gás de assistência (azoto), no corte de aço inoxidável com 10 mm de espessura (Wandera 2016). Tal pode ser justificado pelo aumento das tensões de corte exercidas pelo gás a alta pressão, sobre o material fundido, auxiliando a sua expulsão do interior da fenda (Wandera 2016).

Jarosz, Löschner e Niesłony (2016) investigaram a influência da velocidade de corte na rugosidade da superfície. Para tal foram testados 3 níveis de velocidade distintos, utilizando um laser CO₂ com 6 kW de potência, durante o corte de aço inoxidável com 10 mm de espessura. Concluíram que a rugosidade (Rz₅) medida em regiões distintas da superfície aumenta para velocidades de corte mais elevadas (Jarosz, Löschner e Niesłony 2016).

Os resultados obtidos no presente trabalho indicam que a rugosidade é superior para o nível mais elevado de pressão do gás. Por outro lado, a rugosidade é diminuída, para o nível mais elevado de velocidade. Estas observações diferem das conclusões admitidas na bibliografia pesquisada. Porém, uma vez que a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência apresentaram uma contribuição residual para a rugosidade (Rz₅), seria oportuno repetir o procedimento experimental para este material, desta vez utilizando níveis mais abrangentes para os factores controláveis em questão, de forma a confirmar as conclusões admitidas.

4.7.4.3. Altura da escória aderente

Os resultados das medições realizadas à altura da escória aderente após o corte dos tubos de aço inoxidável com 5 mm de espessura, foram apresentados na Tabela 34 (página 118). As imagens captadas às superfícies de corte deste material, foram expostas na Tabela 35 (página 119). A altura da escória foi medida perpendicularmente à superfície exterior do tubo, desde o ponto em que é notada a transição do escoamento, até ao ponto em que esta região se propaga como escória para além da superfície interior do tubo, como indica a Figura 86 (página 107). Os factores S/N (“Menor melhor”) para a altura da escória aderente, foram calculados através da **Equação 4.1** e são exibidos na Tabela 82.

Tabela 82 - Factores S/N para as alturas da escória aderente. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-65.21	-65.36	-65.77	-65.77	-64.64	-64.78	-62.40	-64.00	-64.28

A Tabela 83 e a Tabela 84, indicam a média dos factores S/N e a média das respostas, respetivamente, calculadas para cada nível de cada factor controlável. Os mesmos dados são também representados por gráficos de efeitos na Figura 97.

Tabela 83 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a altura da escória aderente. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-65,44	-64,46	-64,66
2	-65,07	-64,67	-65,13
3	-63,56	-64,94	-64,27
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	1,89	0,48	0,86
Ranking	1	3	2

Tabela 84 - Resultado das médias para a altura da escória aderente [μm]. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	1872	1694	1713
2	1795	1715	1811
3	1513	1771	1656
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	359	77	154
Ranking	1	3	2

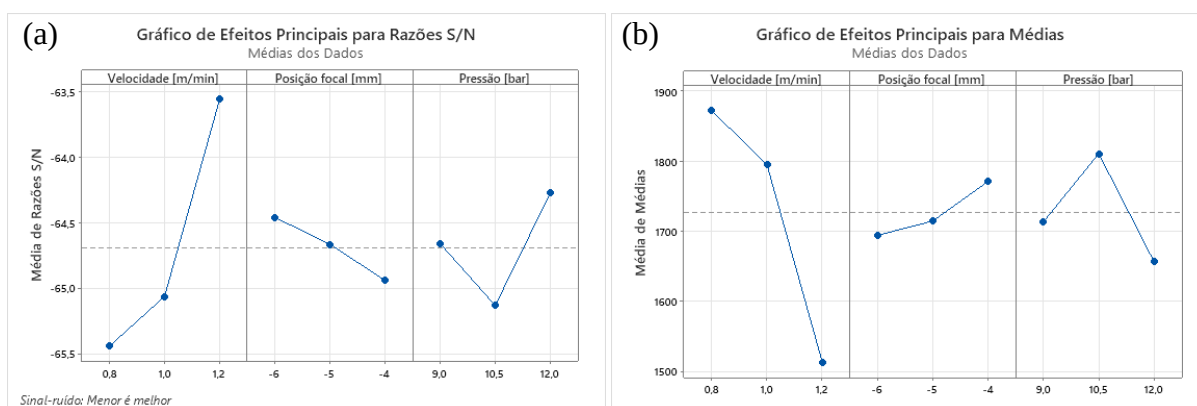


Figura 97 - Efeito dos parâmetros do processo na altura da escória aderente. Aço inoxidável com 5 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da altura da escória aderente [μm].

Pela análise à Tabela 83 e à Tabela 84, é possível verificar que a combinação de níveis que maximiza o factor S/N e minimiza a média da resposta, neste caso a altura da escória, é a que utiliza o: nível 3 de velocidade de corte, o nível 1 de posição focal e o nível 3 de pressão do gás de assistência (azoto). Por outro lado, o parâmetro que mais efeito demonstrou sobre a média dos factores S/N e as médias da resposta, foi a velocidade de corte, seguindo-se a pressão do gás de assistência e por último a posição focal. Posto isto, na Tabela 85 são apresentados os níveis que possibilitam uma redução da altura da escória aderente, para diferentes condições de ruído.

Tabela 85 - Parâmetros ótimos para redução da altura da escória aderente. Aço inoxidável, 5 mm de espessura

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1.2 m/min	-6 mm	12 bar

A ANOVA realizada à média das variáveis de resposta é apresentada na Tabela 86. O teste de hipótese foi realizado para um nível de significância de 5 %.

Tabela 86 - ANOVA à média das respostas para a altura da escória aderente. Aço inoxidável, 5mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Percentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	214489	107244	4,04	0,199	68.38
Posição focal	2	9465	4732	0,18	0,849	3.02
Pressão	2	36569	18284	0,69	0,592	11.66
Erro residual	2	53144	26572			16.94
Total	8	313666				100
S= 163.0092; R ² =83.06 %						

Pela Tabela 86, pode ser aferido que o Valor-P é superior a 0.05 para todos os factores, indicando que para o nível de significância admitido, não existe evidência estatística contra a hipótese nula. Assim, não foi possível provar que algum dos parâmetros tenha sido significativo, do ponto de vista estatístico, para a altura da escória aderente.

Relativamente à contribuição de cada um dos factores controláveis para a resposta observada, a velocidade de corte foi o parâmetro que mais contribuiu (68 %), seguindo-se a pressão de azoto (12 %) e por último a posição focal (3 %). O erro residual teve uma contribuição de 17 %, indicando que essa percentagem de variação da resposta, não é explicada pela variação dos factores controláveis.

A velocidade de corte foi o factor que mais afetou a média da resposta e, analisando a Figura 97(b), para níveis mais elevados de velocidade de corte menor foi a altura da escória. As imagens captadas às superfícies de corte (Tabela 35 – página 119), demonstram, com clareza, o ponto de separação do escoamento, onde o escoamento transita de regime laminar para turbulento. Uma vez que a altura da escória foi medida a partir do ponto de separação, esta pode ser minimizada aumentando a profundidade de separação do escoamento, ou seja, deslocando este ponto para uma região próxima da aresta inferior de corte.

Um estudo realizado por Wandera e Kunjanp (2010) sobre o corte de aço inoxidável com 10mm de espessura, através de um laser de fibra (5 kW), conclui que a profundidade de separação do escoamento é aumentada pelo aumento da velocidade de corte e da pressão de azoto de assistência. A mesma conclusão foi confirmada experimentalmente em diversos estudos (Singh et al. 2021; Zheng 1990; Wandera 2016). Para velocidades de corte reduzidas a dissipação de calor da frente de corte para o material do substrato é superior, aumentando o volume de material fundido e resultando numa distribuição desse calor por uma maior área (Jiang et al. 2020). Assim, a temperatura global da poça de fusão é menor, resultando num aumento da sua viscosidade. Um aumento do volume e da viscosidade do material fundido, motiva a acumulação de material numa região inferior da superfície de corte, resultando em escória (Wandera e Kujanp 2010; Jiang et al. 2020).

Relativamente à pressão do gás, os mesmos autores afirmam que para pressões mais elevadas, o número de Reynolds do escoamento é superior e assim, a região dominada por efeitos viscosos (camada limite) é diminuída, uma vez que os efeitos das forças inerciais do escoamento são superiores (Palma 2018). A redução da espessura da camada limite, possibilita que o regime do escoamento seja mantido laminar por uma maior distância, deslocando o ponto de transição para a aresta inferior da superfície de corte (Wandera e Kujanp 2010; Riveiro et al. 2019). Como consequência a altura da escória aderente diminui, uma vez que foi medida a partir deste ponto.

Embora a percentagem de contribuição da posição focal seja reduzida, pela Figura 97 é possível verificar que a altura da escória é inferior para posições de foco mais afastadas da superfície (feixe desfocado), ou seja, para larguras de fenda superiores. Para fendas mais largas o material fundido é expulso com maior eficácia, reduzindo a possibilidade de ocorrer a separação do escoamento (Wandera e Kujanp 2010). Contudo, desfocar o feixe, pode resultar numa diminuição excessiva da densidade de potência à superfície do material e, como consequência, a perda de penetração ao longo de toda a espessura.

4.7.4.4. Parâmetros ótimos

De forma a definir quais os níveis dos parâmetros que permitem a otimização do conjunto das características de qualidade consideradas para este material, na Tabela 87 são resumidos os resultados obtidos na análise anterior.

Tabela 87 - Níveis ótimos e percentagem de contribuição para cada uma das características de qualidade analisadas. Aço inoxidável, 5 mm de espessura.

	Velocidade de corte		Posição focal		Pressão do gás de assistência	
	Nível	Percentagem de contribuição	Nível	Percentagem de contribuição	Nível	Percentagem de contribuição
Largura da fenda	3	0.25 %	3	95.42 %	1	3.55 %
Rugosidade da superfície (Rz _s)	3	3.36 %	1	55.02 %	2	1.65 %
Altura da escória aderente	3	68.38 %	1	3.02 %	3	11.66 %

A Tabela 87 indica que todas as características de qualidade são otimizadas para o mesmo nível de velocidade de corte (nível 3).

Relativamente à posição focal, existe divergência entre o nível que minimiza a largura da fenda (nível 3) e o nível que minimiza, quer a rugosidade da superfície, quer a altura da escória aderente (nível 1). Embora a contribuição da posição focal seja mais significativa sobre a largura da fenda, será admitido o nível 1 como ótimo, uma vez que este nível minimiza duas das características avaliadas e tem contribuição significativa sobre a rugosidade da superfície. Analisando as imagens adquiridas às superfícies de corte pela Tabela 35 (página 119) e os resultados das medições realizadas (Tabela 34 - página 118), estes parâmetros garantem um bom compromisso entre as diferentes características de qualidade.

Por outro lado, o nível ótimo da pressão do gás de assistência variou para todas as características em avaliação. Utilizando a mesma metodologia, será admitido o nível 3 como nível ótimo, visto que a pressão foi mais influente na variação da altura da escória, com 11.66 % de contribuição.

Concluindo, para o corte de aço inoxidável com 5 mm de espessura, os níveis que otimizam a globalidade das características de qualidade em análise são:

- Velocidade de corte = 1.2 m/min (nível 3);
- Posição focal = -6 mm (nível 1);
- Pressão do gás de assistência = 12 bar (nível 3).

4.7.5. Alumínio, 2mm de espessura

4.7.5.1. Largura da fenda

Os resultados das medições realizadas às larguras de fenda resultantes da aplicação do procedimento DoE em tubos de alumínio com 2 mm de espessura, foram apresentados na Tabela 36 (página 120). As superfícies de corte podem ser visualizadas na Tabela 37 (página 121) e na Tabela 38 (página 122), quer para tubos de secção circular, quer para tubos de secção retangular, respetivamente. Os factores S/N (“Menor melhor”) para as larguras de fenda obtidas, foram calculados através da **Equação 4.1**, considerando a geometria do tubo um factor de ruído. Os respetivos factores S/N são exibidas na Tabela 88.

Tabela 88 – Factores S/N para as larguras de fenda. Alumínio, 2 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-48.20	-45.78	-46.48	-47.81	-46.10	-46.97	-48.18	-45.71	-47.09

Os efeitos de cada factor controlável são apresentados na Tabela 89 e na Tabela 90, tabelas que indicam a média dos factores S/N e a média das respostas, respetivamente, para cada nível de cada factor controlável. Os mesmos dados são também representados por gráficos de efeitos na Figura 98.

Tabela 89 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a largura de fenda. Alumínio, 2 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-46,82	-48,06	-46,96
2	-46,96	-45,86	-46,90
3	-46,99	-46,85	-46,92
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	0,17	2,20	0,07
Ranking	2	1	3

Tabela 90 - Resultado das médias das larguras de fenda [μm]. Alumínio, 2 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	219,7	252,0	222,5
2	221,5	196,3	219,8
3	223,0	215,8	221,8
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	3,3	55,7	2,7
Ranking	2	1	3

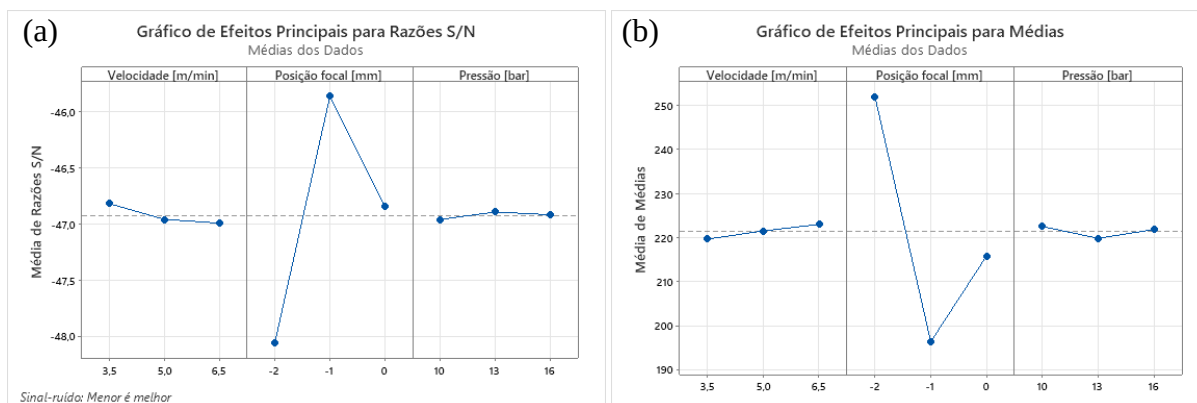


Figura 98 - Efeito dos parâmetros do processo na largura de fenda. Alumínio com 2 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da largura da fenda [μm].

Através da análise à Tabela 89 e à Figura 98 (a), é possível identificar a combinação de parâmetros que maximiza o factor S/N, sendo esta: o nível 1 de velocidade de corte, o nível 2 de posição focal e o nível 2 de pressão de azoto. Essa será a combinação que garante que a largura da fenda é reduzida para diferentes condições de ruído, ou seja, tanto para tubos de secção circular, como para tubos de secção retangular. A mesma combinação garante que o valor médio das respostas seja o mais reduzido (Tabela 90 e Figura 98 (b)). Assim sendo, na Tabela 91 são exibidos os níveis dos factores controláveis que garantem a redução da largura da fenda e a robustez do processo.

Tabela 91 - Parâmetros ótimos para redução da largura de fenda. Alumínio, 2 mm de espessura.

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
3.5 m/min	-1 mm	13 bar

Analisando os rankings da Tabela 89 e da Tabela 90, a posição focal foi o parâmetro que mais efeito apresentou sobre resultados obtidos, tanto para a média dos factores S/N, como para a média da resposta (R_{z5}), seguindo-se a velocidade de corte e, por último, a pressão do gás de assistência.

A ANOVA realizada à média de respostas para a largura da fenda, é apresentada na Tabela 92. O teste de hipóteses foi realizado para um nível de significância de 5 %.

Tabela 92 - ANOVA à média das respostas para a largura de fenda. Alumínio, 2 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Percentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	16.72	8.36	0.09	0.915	0.33
Posição focal	2	4787.06	2393.53	26.59	0.036	95.83
Pressão	2	11.56	5.78	0.06	0.940	0.23
Erro residual	2	180.06	90.03			3.60
Total	8	4995.39				100
S=9.4883; R ² =96.40 %						

Pela Tabela 92, é possível verificar que a posição focal apresenta um efeito estatisticamente significativo sobre a média das respostas. Uma vez que o Valor-P, para este factor, é inferior a 0.05, a hipótese nula (H_0) pode ser rejeitada. Tal não se verifica para os restantes factores, pois apresentam valores distantes de 0.05, não havendo prova estatística de que tenham efeito sobre a média da largura da fenda.

A posição focal foi o factor controlável que mais contribuiu para a largura da fenda observada no ensaio DoE, com uma percentagem de contribuição superior a 95 %. As contribuições dos factores velocidade de corte e pressão do gás de assistência, demonstraram-se desprezáveis, de valor inferior à contribuição do erro residual.

Mais uma vez, a posição focal foi o parâmetro que apresentou mais influência sobre o valor médio da largura da fenda, sendo justificado pela variação do diâmetro do feixe laser à superfície do tubo. De acordo com a Figura 98, a largura da fenda é reduzida posicionando o plano de foco a meia espessura do tubo e não na sua superfície superior. Contudo, pela análise aos valores medidos e apresentados na Tabela 36 (página 120), isso só se verificou para os tubos de secção retangular. Nos tubos de secção circular a largura da fenda demonstrou-se mais reduzida posicionando o foco na superfície do tubo. Visto que o objetivo do estudo é minimizar o largura da fenda para ambas as secções, o posicionamento do foco a meia espessura foi admitido como ótimo.

Em relação aos restantes parâmetros, uma vez que a sua contribuição foi inferior à do erro residual, pode ser aferido que a variação da média largura da fenda é mais afetada por factores não tratados pelo modelo do que propriamente pela velocidade de corte e a pressão. Assim, não foram retiradas conclusões sobre a influência destes parâmetros.

4.7.5.2. Rugosidade da superfície

As medições realizadas à rugosidade das superfícies de corte (Rz_5) resultantes da aplicação do procedimento DoE no corte de alumínio com 2mm são, foram apresentadas na Tabela 36 (página 120). As imagens das superfícies de corte do tubo de secção circular, foram exibidas na Tabela 37 (página 121). Na Tabela 38 (página 122), foram apresentadas as superfícies obtidas no corte do tubo de secção retangular. A rugosidade foi medida numa região intermédia da superfície, ou seja, numa região onde a separação do escoamento ainda não teria ocorrido. Os factores S/N foram calculados de acordo com a **Equação 4.1**, visto que o objetivo é diminuir ao máximo a rugosidade com o mínimo de efeito dos factores de ruído. A geometria do tubo foi considerada um factor de ruído que foi manipulado, contudo o factor S/N, tem também em

consideração, outros factores de ruído que são aleatórios e não controlados ao longo do procedimento. Os valores para os factores S/N são apresentados pela Tabela 93.

Tabela 93 – Factores S/N para a rugosidade das superfícies de corte (Rz_5). Alumínio, 2 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-21.78	-20.32	-22.52	-21.02	-20.98	-20.34	-21.55	-21.07	-20.48

Na Tabela 94, na Tabela 95 e na Figura 99 são apresentadas as médias dos factores S/N e as médias das rugosidades, obtidas para cada nível de cada parâmetro.

Tabela 94 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a rugosidade das superfícies de corte (Rz_5). Alumínio, 2 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-21.54	-21.45	-21.07
2	-20.78	-20.79	-20.60
3	-21.03	-21.11	-21.68
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	0.76	0.66	1.08
Ranking	2	3	1

Tabela 95 - Resultado das médias da rugosidade das superfícies de corte (Rz_5) [μm]. Alumínio, 2mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	12.00	11.79	11.29
2	10.89	10.94	10.64
3	11.18	11.34	12.14
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	1.11	0.85	1.50
Ranking	2	3	1

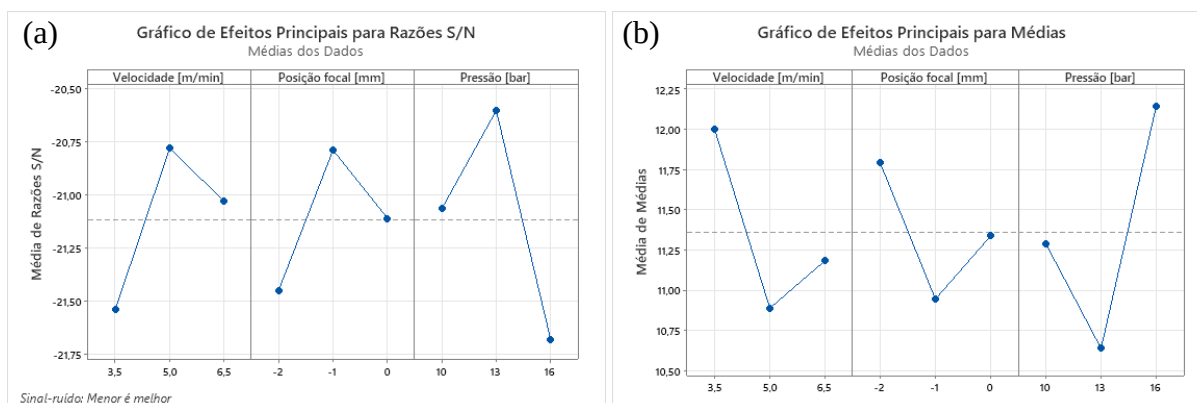


Figura 99 - Efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Alumínio com 2 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da rugosidade das superfícies de corte [μm].

Pelos resultados obtidos pode ser aferido que a combinação de níveis que garante menos rugosidade numa região intermédia da superfície de corte é: o nível 2 de velocidade de corte, o nível 2 de posição focal e o nível 2 de pressão do gás de assistência. Nesse sentido, os parâmetros que otimizam esta característica de qualidade são apresentados na Tabela 96.

Tabela 96 - Parâmetros ótimos para redução da rugosidade da superfície de corte (Rz_5). Alumínio, 2 mm de espessura.

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
5 m/min	-1 mm	13 bar

Pelos rankings referidos na Tabela 94, pode ser concluído que o parâmetro que mais contribuiu para a variação do factor S/N foi a pressão do gás de assistência, seguindo-se a velocidade de corte e por último a posição focal. O mesmo foi observado para o valor médio da rugosidade da superfície, tal como pode ser observado pela Tabela 95.

De forma a evidenciar estatisticamente a influência dos diferentes parâmetros no valor médio da rugosidade, foi realizada uma análise de variância (Tabela 97), admitindo um nível de significância de 5 %. Passa por um teste de hipóteses, onde o risco de rejeitar a hipótese nula, caso esta realmente se verifique, é de 5 %. A hipótese nula pode ser rejeitada caso seja verificado que o valor médio da resposta para pelo menos um dos níveis de um factor controlável, é significativamente diferente dos restantes valores médios. Pela ANOVA, será também possível identificar a percentagem de contribuição de cada um dos factores, no valor médio da resposta observado.

Tabela 97 - ANOVA à média das rugosidades da superfície de corte (Rz_5). Alumínio, 2 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Porcentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	1.988	0.9941	1.11	0.473	24.05
Posição focal	2	1.074	0.5370	0.60	0.624	12.99
Pressão	2	3.418	1.7088	1.91	0.343	41.35
Erro residual	2	1.786	0.8928			21.61
Total	8	8.266				100
S=0.9449; R^2 =78.40 %						

O Valor-P apresentado na Tabela 97, indica que nenhum dos factores controláveis demonstrou evidência estatística para poder ser rejeitada a hipótese nula. Assim, para o nível de significância admitido, nenhum dos factores controláveis foi influente sobre o valor médio da rugosidade da superfície.

Pela percentagem de contribuição é possível admitir, com base nos resultados observados, que a pressão do gás de assistência (azoto), contribuiu cerca de 41 %, seguindo-se a velocidade de corte com 24 %, e, por último, a posição focal com 13 %. Por outro lado, a variação da resposta associada a factores não admitidos pelo modelo, aproxima-se de 22 % (erro residual), indicando assim, que esses factores têm uma contribuição superior face à posição focal.

A mesma conclusão foi retirada num estudo realizado por Janković et al. (2019), onde foi analisada a influência da potência de um laser CO_2 , da velocidade de corte e da pressão do gás de assistência (azoto) na rugosidade da superfície, pelo processamento de uma liga de alumínio com 3mm de espessura. Os autores reconheceram que os parâmetros mais influentes para a rugosidade da superfície de corte foram a velocidade de corte e a pressão do azoto de assistência.

Por outro lado, era esperada uma redução da rugosidade com o progressivo aumento da pressão do gás de assistência. Contudo, tal só se verificou para os dois primeiros níveis de pressão ensaiados. Para o valor mais elevado de pressão, ocorreu um aumento abrupto da rugosidade. Tal pode ser justificado pelo aumento da transferência de calor por convecção, entre o material fundido e o azoto de assistência. Para pressões muito altas, a temperatura da poça de fusão é mais reduzida, pois a transferência de calor com o gás de assistência é superior, aumentando, assim, a viscosidade do material fundido e comprometendo eficácia na sua expulsão (Janković et al. 2019).

O mesmo foi observado para o aço inoxidável com 2mm de espessura. A rugosidade diminuiu para o nível intermédio de pressão, aumentado ligeiramente para o nível mais elevado. Contudo neste material, alumínio, esse aumento foi mais acentuado.

No caso da velocidade de corte, diversos estudos, demonstram que existe um valor crítico para a velocidade, que otimiza a rugosidade da superfície de corte. A rugosidade diminui com o aumento da velocidade até esse valor. O aumento da velocidade acima desse valor, volta a aumentar a rugosidade da superfície (Janković et al. 2019; Jiang et al. 2020; Rajaram, Sheikh-Ahmad e Cheraghi 2003; Wandera 2006). O mesmo foi identificado no presente trabalho, onde através da Figura 99 (b), é possível verificar que o nível intermédio de velocidade de corte foi o que garantiu menor rugosidade à superfície. Assim, pode ser admitido que o valor crítico de velocidade para a redução da rugosidade, se localiza próximo dos 5 m/min.

A posição focal que garantiu menos rugosidade à superfície foi a mesma que garantiu uma menor largura da fenda. Igual conclusão tinha sido obtida para o aço inoxidável com a mesma espessura (2mm). A largura da fenda pode estar relacionada com a rugosidade da superfície, visto que para fendas mais largas, o volume de material fundido é superior. Deste modo, a expulsão do material do interior da fenda é menos eficaz, resultando num aumento da rugosidade da superfície. Contudo, no caso do alumínio, a percentagem de contribuição da posição focal foi mais reduzida do que no caso do aço inoxidável.

4.7.5.3. Altura da escória aderente

Os resultados das medições realizadas à altura da escória aderente após o corte dos tubos de alumínio com 2 mm de espessura, quer de secção circular, quer de secção retangular, foram apresentados na Tabela 36 (página 120). As superfícies de corte dos respetivos tubos são apresentadas na Tabela 37 e na Tabela 38 (páginas 121 e 122). A altura da escória foi medida perpendicularmente à superfície exterior do tubo, desde o ponto em que é observada a separação do escoamento, até ao ponto em que esta região se propaga como escória, para além da superfície interior do tubo. Os factores S/N (“Menor melhor”), foram calculados para cada combinação de parâmetros utilizada no procedimento DoE e são apresentados na Tabela 98, tendo como objetivo a redução da altura da escória aderente para diferentes condições de ruído.

Tabela 98 – Factores S/N para as alturas da escória aderente. Alumínio, 2 mm de espessura.

	Combinação de parâmetros								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Factor S/N [dB]	-56.46	-57.37	-51.46	-53.13	-52.99	-57.28	-44.73	-58.72	-53.46

A Tabela 99, a Tabela 100 e a Figura 100, apresentam as médias dos respetivos factores S/N e as médias das alturas da escória aderente, medida para os diferentes níveis de parâmetros empregues no procedimento DoE.

Tabela 99 - Resultado das médias dos factores Sinal/Ruído [dB] para a altura da escória aderente. Alumínio, 2 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	-55,09	-51,44	-57,48
2	-54,47	-56,36	-54,65
3	-52,30	-54,07	-49,73
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	2,79	4,92	7,76
Ranking	3	2	1

Tabela 100 - Resultado das médias para a altura da escória aderente [μm]. Alumínio, 2 mm de espessura.

Nível	Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
1	575.7	427.2	741.2
2	535.2	675.3	539.3
3	484.2	492.5	314.5
$\Delta_{\text{Max-Min}}$	91.5	248.2	426.7
Ranking	3	2	1

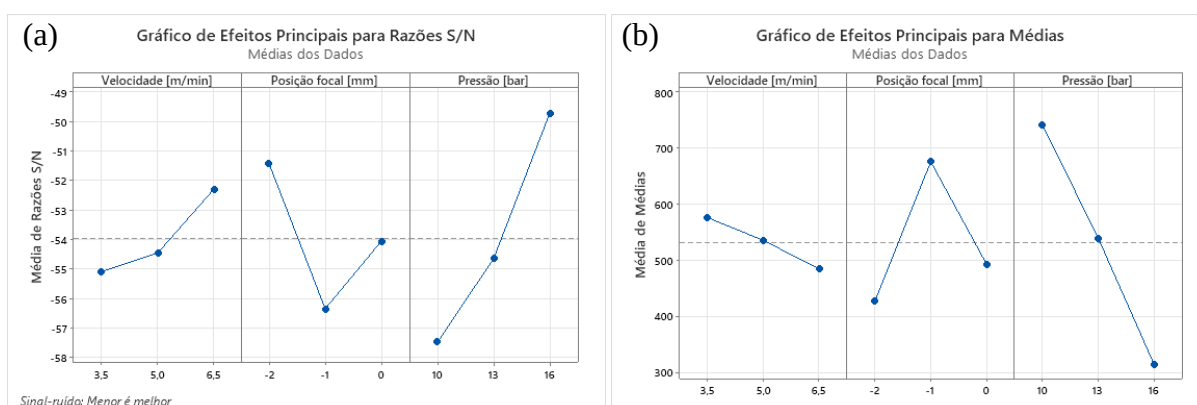


Figura 100 - Efeito dos parâmetros do processo na altura da escória aderente. Alumínio com 2 mm de espessura. (a): Média dos factores S/N [dB]; (b): Média da altura da escória aderente [μm].

Numa análise à Tabela 99, a combinação de níveis que maximiza o factor S/N, ou seja, que garante que a altura da escória aderente seja a mais reduzida para diferentes condições de ruído, é a combinação que utiliza o nível 3 de velocidade de corte, o nível 1 da posição focal e o nível 3 de pressão do gás de assistência (azoto). A mesma combinação minimiza a média das respostas medidas, tal como indica a Tabela 100. Assim, de acordo com o método de Taguchi, essa é a combinação de parâmetros que garante o mínimo de escória aderente para diferentes condições de ruído, sendo apresentada na Tabela 101.

Tabela 101 - Parâmetros ótimos para redução da altura da escória aderente. Alumínio, 2 mm de espessura.

Velocidade	Posição Focal	Pressão do gás de assistência
6 m/min	-1 mm	13 bar

Pelos rankings referidos na Tabela 99 e na Tabela 100, a pressão do gás de assistência foi o parâmetro que mais efeito apresentou sobre a média dos factores S/N e sobre a média da resposta, seguindo-se a posição focal e, por último, a velocidade de corte.

De forma a analisar estatisticamente a influência dos respetivos parâmetros sobre a altura da escória aderente, foi realizada uma análise de variância aos resultados obtidos. Será admitido um nível de significância de 5 % para confirmar a evidência contra a hipótese nula, ou seja, o erro de rejeitar a hipótese nula caso esta realmente se verifique, é de 5 %. A hipótese nula afirma que um dado parâmetro não tem influência sobre a média da resposta. A hipótese alternativa é

aceite caso haja evidência estatística de que essa média variou significativamente para pelo menos um dos níveis do respetivo parâmetro.

Tabela 102 - ANOVA à média das respostas para a altura da escória aderente. Alumínio, 2 mm de espessura.

	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Variância	Valor-F	Valor-P	Percentagem de contribuição [%]
Velocidade	2	12614	6307	8.84	0.102	3.26
Posição focal	2	99283	49642	69.57	0.014	25.68
Pressão	2	273331	136666	191.52	0.005	70.69
Erro residual	2	1427	714			0.37
Total	8	386655				100
S= 26.7130; R ² =99.63 %						

O Valor-P da Tabela 102, indica que existe evidência estatística de que a pressão do gás de assistência e a posição focal têm influência sobre o valor médio da altura de escória aderente, para um nível de significância de 5 % (Valor-P < 0.05). Assim a hipótese nula (H_0) pode ser rejeitada para ambos os parâmetros. Em relação à velocidade de corte, tal rejeição não pode ser admitida, uma vez que o Valor-P > 0.05.

A percentagem de contribuição indica que cerca de 71 % da variação observada na média da resposta, está relacionada com a alteração dos níveis de pressão do gás de assistência. Seguiu-se a posição focal com 26 % de contribuição e, por último, a velocidade de corte com 3 %. É também possível verificar a baixa contribuição do erro residual, com cerca de 3.7 % (R² = 99.63 %). Isto significa que cerca de 99.63 % da variação da média é explicada pela variação dos factores controláveis, indicando que o modelo admitido é adequado para a resposta em avaliação (Minitab® 2021).

Pela Figura 100 (b), é observado que a média da altura de escória aderente, é diminuída com o progressivo aumento da pressão do gás. Como era de esperar, pressões mais elevadas impulsionam as tensões de corte exercidas pelo gás sobre o material a expulsar do interior fenda, resultando em menos deposição de material na aresta inferior da superfície de corte (Wandera, Salminen e Kujanp 2009; Singh et al. 2021). Por outro lado, também aumentam da profundidade de separação do escoamento, ou seja, o regime de escoamento do material fundido, é mantido laminar ao longo da parede da fenda (Riveiro et al. 2019; Wandera e Kujanp 2010). O aumento da profundidade de escoamento diminui o valor da resposta, uma vez que a altura da escória aderente foi medida a partir do ponto de separação. Por outro lado, garante uma superfície de corte mais limpa, sem estrias aleatórias originadas pela solidificação do material, que se encontrava em regime turbulento, sobre a parede da fenda.

A Figura 100 (b), indica também que a média da altura da escória aderente aumenta com a diminuição da velocidade de corte. Para velocidades de corte reduzidas, a dissipação de calor da frente de corte para o material do substrato é superior, resultando numa diminuição da temperatura da poça de fusão e, conseqüentemente, no aumento da sua viscosidade. O aumento da viscosidade resulta numa diminuição da taxa de material removido numa região próxima à aresta inferior de corte, onde o material se acumula formando escória (Wandera 2016; Wandera e Kujanp 2010). Por outro lado, para velocidades de corte superiores, há uma diminuição do calor fornecido por unidade de comprimento, reduzindo o volume de material fundido. Conseqüentemente, o volume de material aderente à aresta inferior diminui, uma vez que a sua

expulsão é mais eficaz (Singh et al. 2021). Vários estudos comprovam experimentalmente que a deposição de escória é diminuída para velocidades de corte mais elevadas, próximas à velocidade de corte máxima (Zheng 1990; Singh et al. 2021; Wandera, Salminen e Kujanp 2009).

Relativamente à posição focal, a altura da escória aderente diminui para a posição focal mais afastada da superfície exterior do tubo. Como foi visto durante a análise à largura da fenda, esta posição foi a que garantiu uma maior largura de fenda. Fendas mais largas otimizam a expulsão do material fundido do seu interior, resultando numa menor quantidade de material aderente à aresta inferior da superfície de corte (Wandera 2016; Wandera, Salminen e Kujanp 2009).

Relativamente à altura da escória aderente, as mesmas conclusões obtidas para este material (alumínio), foram obtidas para o aço inoxidável com 5 mm de espessura. Tanto o aumento da velocidade, como o aumento da pressão o gás de assistência, reduzem a deposição de escória na aresta inferior da superfície de corte, como também aumentam a profundidade de separação do escoamento. Embora a posição focal tenha apresentado menos contribuição para a variação da altura da escória aderente, foi verificado para ambos os materiais, que o posicionamento do foco mais abaixo da superfície interior do tubo, possibilitou uma redução da altura da escória aderente, uma vez que a fenda se demonstrou mais larga, aumentando a eficácia na expulsão do material do seu interior.

4.7.5.4. Parâmetros ótimos

Com intuito de definir uma combinação de parâmetros adequada para minimizar, de uma forma geral, todos os defeitos analisados para este material (alumínio), na Tabela 103 são apresentados, resumidamente, os resultados obtidos durante a avaliação de cada uma das características de qualidade.

Tabela 103 - Níveis ótimos e percentagem de contribuição para cada uma das características de qualidade analisadas. Alumínio, 2 mm de espessura.

	Velocidade de corte		Posição focal		Pressão do gás de assistência	
	Nível	Percentagem de contribuição	Nível	Percentagem de contribuição	Nível	Percentagem de contribuição
Largura da fenda	1	0.33 %	2	95.83 %	2	0.23 %
Rugosidade da superfície (Rz_s)	2	24.05 %	2	12.99 %	2	41.35 %
Altura da escória aderente	3	3.26 %	1	25.68 %	3	70.69 %

Pela análise à Tabela 103 pode ser concluído que as diferentes características de qualidade são otimizadas para diferentes níveis dos factores controláveis. Assim, a combinação admitida como ótima, será fundamentada pela percentagem de contribuição de cada um dos factores nas diferentes características.

Relativamente à velocidade de corte, esta apresentou maior contribuição (24.05 %) para a variação da rugosidade da superfície, face à contribuição demonstrada quer para a largura da fenda (0.33 %), quer para a altura da escória aderente (3.26 %). Sendo assim, o nível de velocidade de corte que otimiza a rugosidade da superfície (nível 2) será admitido como ótimo.

Por outro lado, a característica de qualidade mais influenciada pela posição focal foi a largura da fenda, onde a contribuição deste parâmetro foi de 95.83 %. Uma vez que a contribuição deste parâmetro foi mais reduzida tanto para a rugosidade da superfície (12.99 %), como para a altura da escória aderente (25.68 %), o nível que otimiza a largura da fenda (nível 2), será admitido como ótimo.

Por último, a pressão do gás de assistência demonstrou-se mais significativa para reduzir a altura da escória aderente, onde a contribuição demonstrada foi de 70.69 %. Por outro lado, a variação da pressão do gás contribui 41.35 % para a variação observada na rugosidade da superfície e 0.23 % para a variação observada na largura da fenda. Posto isto, o nível de pressão que minimiza a altura da escória aderente (nível 3) será admitido como ótimo.

Resumindo, para o alumínio com 2 mm de espessura, a combinação de parâmetros que minimiza a generalidade dos defeitos analisados é:

- Velocidade de corte = 5 m/min (nível 2);
- Posição focal = -1 mm (nível 2);
- Pressão do gás de assistência = 16 bar (nível 3).

De forma a observar a adequação dos parâmetros em questão, na realização de cortes segundo contornos mais complexos, esta combinação de parâmetros foi empregue na realização da geometria apresentada na Figura 101.



Figura 101 – Cortes complexos realizados em alumínio com 2 mm de espessura, utilizando a combinação de parâmetros definida como ótima.

O corte segundo os contornos admitidos foi realizado com sucesso, contudo foi verificado que a velocidade de corte não foi mantida constante durante a realização de todo o contorno, devido à desaceleração da cabeça durante as várias mudanças de direção, originando, por isso, várias variações/flutuações aos fenómenos que regem o processo. Em adição, durante as

mudanças de direção com um ângulo acentuado, a excessiva redução de velocidade, resulta numa maior interação entre o feixe e o material, diminuindo a precisão do contorno e resultando num aumento visível da largura da fenda.

Foi também verificada a contaminação da superfície interior do tubo, devido à deposição do material expulso da fenda sobre a esta superfície, oposta à face de corte, necessitando, por isso, processos de limpeza posteriores de forma a garantir a qualidade do produto.

5. Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

Os conceitos teóricos subjacentes ao processo de corte a laser foram discutidos no capítulo 2. Foi verificado que as fontes de radiação laser de fibra ótica têm ganho cada vez mais importância a nível industrial, como alternativa às restantes fontes laser utilizadas no processamento de materiais metálicos. Estas garantem a qualidade do feixe a elevadas potências, a reduzida necessidade de manutenção e um comprimento de onda próximo à unidade de micrómetro, possibilitando assim um aumento na capacidade de absorção da energia disponibilizada pelo feixe laser, por parte dos materiais metálicos.

No mesmo capítulo foram estudados os diversos mecanismos de corte a laser, destacando-se o mecanismo de corte por fusão e o de corte por fusão reativa, no processamento de metais. Foi também verificado que o corte a laser se distingue dos restantes processos alternativos de corte térmico, por garantir um conjunto próprio de vantagens, nomeadamente: superfícies de corte com elevada qualidade, flexibilidade e precisão na geometria de corte reproduzida, elevada produtividade, redução do desperdício de material, redução da necessidade de processamentos posteriores e menor necessidade de mão de obra, devido ao elevado nível de automatização do processo. Como principais desvantagens, este processo é incapacitado a cortar materiais de elevada espessura e o investimento associado à aquisição do equipamento é elevado.

Posteriormente, foi feita uma abordagem aos parâmetros que regem o processo e aos métodos utilizados para avaliação da qualidade de corte. Boa qualidade de corte é geralmente caracterizada por: larguras de fenda reduzidas, superfícies de corte com rugosidade reduzida e uniformes ao longo de toda a espessura, inexistência de escória aderente à aresta inferior desta superfície, perpendicularidade das paredes da fenda, redução da área termicamente afetada (ZTA), minimização da degradação térmica e da deposição de detritos na superfície interior dos tubos. A otimização dos parâmetros do processo é indispensável para que seja obtida uma boa qualidade de corte. Assim, foi concluído que a potência do laser, a velocidade de corte, o tipo do bico, a pressão do gás de assistência e a posição focal; são, entre os restantes parâmetros do processo, os mais importantes para controlo da qualidade.

O princípio de funcionamento e uma análise ao mercado de máquinas de corte a laser de tubos foram outros dois temas abordados. As máquinas de corte 2D são geralmente dotadas com oito eixos principais, onde seis deles destinam-se ao suporte e movimentação do tubo e os restantes dois aplicam-se à movimentação da cabeça de corte. As máquinas de corte 3D, apresentam um eixo adicional que possibilita a inclinação da cabeça, garantindo a qualidade no corte de contornos em chanfro. As principais diferenças entre as máquinas disponíveis no mercado são: a potência máxima da fonte laser que as integram, o número de eixos, o limite dimensional dos tubos que podem processar e as diferentes soluções construtivas do módulo de alimentação e de descarga.

No capítulo 3 foi aplicada experimentalmente uma metodologia para ajuste dos parâmetros do processo, de forma a garantir a otimização da qualidade de corte em tubos de diferentes materiais (aço de construção, aço inoxidável e alumínio), espessuras e geometrias de secção. Para tal, foi utilizada a máquina de corte a laser de tubos da AMOB, equipada com uma fonte laser de fibra ótica com 2 kW de potência. Foi empregue o método de Taguchi para planeamento da experiência e modificados segundo 3 níveis, 3 parâmetros do processo: a velocidade de corte, a posição focal e a pressão do gás de assistência. Três características de qualidade foram avaliadas para diferentes combinações destes 3 parâmetros, nomeadamente: a largura da fenda, a rugosidade da superfície de corte e a altura da escória aderente.

No capítulo 4, os dados obtidos foram manipulados estatisticamente, analisados e discutidos, com intuito de definir a combinação de parâmetros que garante a redução individual

e da globalidade dos defeitos avaliados. A análise e discussão dos resultados foi dividida por material e espessura. A geometria da secção do tubo foi admitida como factor de ruído, com o objetivo de definir a combinação de parâmetros adequada para tubos com o mesmo material e espessura, mas de geometria distinta.

Pelos resultados obtidos durante o procedimento experimental, as conclusões retiradas para a generalidade dos materiais/espessuras, são abaixo resumidas:

- A velocidade de corte máxima diminui com o aumento da espessura para um dado material;
- A posição focal é o parâmetro que mais contribui para a largura da fenda;
- Posicionar o foco próximo da superfície do tubo, na maioria dos casos, reduz a largura da fenda;
- Velocidades de corte mais elevadas minimizam a generalidade dos defeitos para todos os materiais, à exceção do alumínio;
- A escória aderente só foi observada no corte de aço inoxidável com 5 mm de espessura e no corte de alumínio com 2 mm de espessura;
- A posição focal que garante fendas mais largas, possibilita a redução da altura de escória aderente, uma vez que aumenta a eficácia na expulsão do material do interior da fenda.

No corte dos tubos de aço estrutural, uma vez utilizado oxigénio como gás de assistência foi verificado que:

- O aumento da pressão do gás resulta no aumento da largura da fenda, pois intensifica o calor gerado devido à reação de oxidação, calor que se dissipa da frente de corte para o material base e, por isso, mais material é fundido e expulso pela fenda;
- O aumento da pressão do gás resulta no aumento da rugosidade da superfície, uma vez que intensifica o fenómeno cíclico da reação de oxidação e aumenta a probabilidade de surgirem estrias ao longo da superfície;
- Velocidades de corte mais elevadas reduzem a dissipação do calor da frente de corte, minimizando a largura da fenda e a probabilidade de surgirem estrias;
- A maioria das superfícies de corte apresentam-se com uma camada superficial de óxido, resultado da reação química entre o metal e o oxigénio durante o processo;
- Posicionar o foco acima da superfície melhora a qualidade de corte;

Os parâmetros definidos como ótimos para o aço estrutural foram:

- Tubo com 3 mm de espessura:
 - Velocidade de corte = 4 m /min;
 - Posição focal = +2 mm;
 - Pressão do gás de assistência = 0.6 bar.
- Tubo com 6 mm de espessura:
 - Velocidade de corte = 1.7 m /min;
 - Posição focal = +2 mm;
 - Pressão do gás de assistência = 0.4 bar.

No corte dos tubos de aço inoxidável, utilizando azoto como gás de assistência, foi verificado que:

- O aumento da pressão do gás resulta no aumento da largura da fenda, pois intensifica a força exercida pelo gás sobre o material próximo das paredes da fenda;
- O aumento da pressão do gás, pelo mesmo motivo, é mais eficaz na expulsão do material fundido do interior da fenda, resultando num aumento da profundidade de separação do escoamento e numa diminuição de escória aderente;
- O aumento da velocidade reduz a largura da fenda e a altura da escória aderente, pois a interação entre o feixe e o material é menor, minimizando a dissipação do calor para o material do substrato, o volume de material fundido e a tendência a que este se deposite na aresta inferior da superfície de corte;
- Fendas mais largas diminuem a rugosidade da superfície de corte quando cortados materiais espessos;
- Fendas mais estreitas diminuem a rugosidade da superfície de corte quando cortados materiais finos.

Os parâmetros definidos como ótimos para o aço inoxidável foram:

- Tubo com 2 mm de espessura:
 - Velocidade de corte = 8 m /min;
 - Posição focal = 0 mm;
 - Pressão do gás de assistência = 15 bar.
- Tubo com 5 mm de espessura:
 - Velocidade de corte = 1.2 m /min;
 - Posição focal = -6 mm;
 - Pressão do gás de assistência = 12 bar.

No corte dos tubos de alumínio, utilizando azoto como gás de assistência, foi verificado que:

- A largura da fenda foi minimizada, posicionando o foco a meia espessura;
- A rugosidade foi diminuída para a posição focal que garante fendas mais estreitas;
- Pressões de azoto mais elevadas reduzem a deposição de escória aderente à aresta inferior de corte, pois aumenta a profundidade de separação do escoamento e a eficácia na expulsão do material fundido;
- A velocidade de corte intermédia foi a que garantiu a melhor qualidade;

Os parâmetros definidos como ótimos para este material foram:

- Tubo com 2 mm de espessura:
 - Velocidade de corte = 5 m/min;
 - Posição focal = -1 mm;
 - Pressão do gás de assistência = 16 bar.

Como continuação da investigação realizada nesta dissertação, abaixo são mencionados alguns temas sugeridos para investigações futuras:

- Medição das características de qualidade resultantes das diferentes combinações definidas como ótimas;
- Definição de um modelo matemático para previsão das características de qualidade avaliadas;
- Repetir o procedimento experimental para o aço inoxidável com 5 mm, desta vez com níveis mais abrangentes de pressão do gás de assistência, uma vez que foi verificada uma elevada deposição de escória na aresta inferior de corte;
- Comparar a influência de diferentes tipos de gases de assistência (reativos e inertes), nos parâmetros do processo e na qualidade de corte obtida;
- Investigar a interação entre os diferentes parâmetros admitidos;
- Avaliar a influência do *Cross-Jet* na qualidade de corte;
- Analisar a influência dos parâmetros do processo que foram inalterados ao longo do presente trabalho;
- Estudo do processo de *piercing*. Otimização da qualidade do produto pelo ajuste dos parâmetros de *piercing*, de acordo com o material a cortar e a respetiva espessura;
- Estudo aprofundado sobre a influência da espessura do material nos parâmetros do processo;
- Examinar a influência da linha de soldadura do tubo e do aumento de espessura nas arestas dos tubos de secção retangular, na qualidade de corte;
- Definir os parâmetros que otimizam a qualidade na realização de cortes segundo contornos complexos, onde seja alterada a direção de corte.

Como proposta à AMOB, para melhorar a qualidade dos produtos processados pela respetiva máquina, é sugerido :

- Desenvolver um sistema que permita, não só a extração de detritos do interior do tubo, como também evite a degradação térmica provocada pelo feixe à superfície interior do tubo – páginas 66 e 67.
- Desenvolver uma metodologia para compensar a redução da velocidade de corte durante a mudança de direção do contorno, com a diminuição do calor transferido ao material – páginas 49 e 50.

É esperado que esta dissertação tenha contribuído substancialmente, não só para fortalecer o conhecimento teórico subjacente ao processo, como também para garantir a qualidade dos tubos processados por corte a laser pela AMOB.

6. Referências

- ©Mitutoyo, Corporation. 2009. Medidor de Rugosidade Superficial Modelo SJ-210. Manual do Usuário.
- ©Precitec, GmbH & Co. KG. 2018. ProCutter Lasermatic®: Cutting head with motor-controlled focal position adjustment for fibre-coupled lasers. Operating Instructions. Germany.
- Abdullah, Jamaluddin. 2010. "Laser metal forming processes for rapid prototyping - A review". *International Journal of Production Research* 38: 3973-96.
- Ahmadi, B, MJ Torkamany, B Jaleh e J Sabaghzadeh. 2009. "Theoretical comparison of oxygen assisted cutting by CO2 and Yb: YAG fiber lasers". *Chinese journal of physics* 47, no. 4: 465-75.
- Alves, Alexandra da Silva. 2019. *As dimensões da qualidade da experiência do consumidor e o seu impacto na lealdade: o caso Salsa Jeans*. Porto: Faculdade de Economia da Universidade do Porto.
- Amaral, I., F. J. G. Silva, G. F. L. Pinto, R. D. S. G. Campilho e R. M. Gouveia. 2019. "Improving the Cut Surface Quality by Optimizing Parameters in the Fibre Laser Cutting Process". *Procedia Manufacturing* 38: 1111-20.
- AMOB S.A. 2021. <https://www.amobgroup.com/>.
- Ashby, M.F. 2011. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier Science.
- Barros, Manuel. 2020. "Orgulha-nos saber que as nossas máquinas são utilizadas em praticamente todos os setores existentes.". Em *interMETAL*, edição de Luísa Santos: INDUGLOBAL UNIPessoal LDA.
- Barros, Manuel. 2021. Sem esquecer as raízes, AMOB aposta na tecnologia de ponta. Em *Opinião pública: Semanário Regional*, edição de Carla Alexandra Soares. Vila Nova de Famalicão: Editave Multimédia, Lda.
- Berkmanns, J. e M. Faerber. 2008a. Laser basics. LASERLINE Technical. edição de BOC: Linde Group.
- Berkmanns, J. e M. Faerber. Laser cutting. LASERLINE Technical. edição de BOC: Linde Group.
- BLM Group. 2016. "LT8.20 tube laser cutting machine | BLM GROUP". Acedido a 27/06/2021. https://www.youtube.com/watch?v=UjkK_YxXSsg.
- BLM Group. 2019. "Laser shearing machine from BLM". *Tube Products INTERNATIONAL Magazine*.
- BLM Group. 2021. "Lasertube Technology". Acedido a 05/07/2021. <https://www.blmgroupp.com/laser-tube-cutting-machines>.
- Callister, W.D. e D.G. Rethwisch. 2013. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9ª ed.: John Wiley and Sons, Inc.
- Carbas, Ricardo 2008. "Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto.
- Caristan, C.L. 2004. *Laser Cutting Guide for Manufacturing*. Society of Manufacturing Engineers.
- Carvalho, Maria Inês Barbosa de. 2007. *Lasers*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Departamento de Bioengenharia - Óptica e Electromagnetismo.
- Chapman, Glenn. 2008. *Photonics and Laser Applications in Engineering*. Simon Fraser University.
- Chen, Shang-Liang. 1998. "The effects of gas composition on the CO2 laser cutting of mild steel". *Journal of Materials Processing Technology* 73, no. 1: 147-59.
- Coherent, Inc. 2009. *Understanding Laser Beam Parameters Leads to Better System Performance and Can Save Money*. https://www.coherent.com/assets/pdf/Understanding-Beam-Parameters_FORMFIRST.pdf.
- Coherent, Inc. 2019. *Heavy Metal Pipe Cutting for Oil Wells*. https://content.coherent.com/legacy-assets/pdf/COHR_HeavyMetalPipeCutting_WP_0519.pdf.
- COREMARK Metals. 2020. "Tube laser cutting". Acedido a 04/07/2021. <https://www.coremarkmetals.com/tube-laser-cutting>.
- Costa Rodrigues, Gonçalo, Vitalii Vorkov e Joost Duflou. 2018. "Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets". *Procedia CIRP* 74: 714-18. 10.1016/j.procir.2018.08.026.

- D. Nigade, V. Jadhav. 2016. "Laser Beam Cutting Parameter Optimization for Mild Steel". *Journal of Material Science and Mechanical Engineering* 3, no. 3: 258-61.
- da Silva, Helder José, Paulo Lucio e Irving Brown. 2015. "Análise de tendência e caracterização sazonal e interanual da evaporação de referência para o sudoeste da Amazônia Brasileira: Acre, Brasil". Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 10.13140/RG.2.2.30219.44328.
- Eltawahni, Hayat. 2011. "Optimisation of process parameters of high power CO2 Laser cutting for advanced materials". Doctoral Thesis, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Dublin City University.
- European Committee for Standardization. 2002. *Thermal cutting — Classification of thermal cuts, Geometrical product specification and quality tolerances*. (EN ISO 9013:2002).
- European Committee for Standardization. 2005. *Welded steel tubes for pressure purposes - Technical delivery conditions - Part 7: Stainless steel tubes*. (EN 10217-7:2005).
- European Committee for Standardization. 2006. *Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels - Part 1: Technical delivery conditions*. (EN 10219-1:2006).
- European Committee for Standardization. 2008. *Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 2: Mechanical properties*. (EN 755-2:2008).
- Faro, Tiago. 2006. "Estudo e otimização do corte LASER de alta velocidade em chapa metálica fina". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Farson, D.F., J.F. Ready e T. Feeley. 2001. *LIA Handbook of Laser Materials Processing*. Springer Berlin Heidelberg.
- Fujikura, Ltd. 2016. "What is fiber laser?". Acedido a 24/08/2021. <http://www.fiberlaser.fujikura.jp/eng/products/about-fiber-laser.html>.
- Gadallah, Mohamed H. e Hany Abdu. 2015. "Modeling and optimization of laser cutting operations". *Manufacturing Review* 2: 1-15. 10.1051/mfreview/2015020.
- García-López, Erika, Juansethi R. Ibarra-Medina, Hector R. Siller, Jan A. Lammel-Lindemann e Ciro A. Rodriguez. 2018. "Surface Finish and Back-Wall Dross Behavior during the Fiber Laser Cutting of AZ31 Magnesium Alloy". *Micromachines* 9, no. 10: 485.
- Genna, Silvio, Erica Menna, Gianluca Rubino e Vincenzo Tagliaferri. 2020. "Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality". *Applied Sciences* 10, no. 14: 4956.
- Ghany, K. Abdel e M. Newishy. 2005. "Cutting of 1.2mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser". *Journal of Materials Processing Technology* 168, no. 3: 438-47.
- Golyshev, A., A. Orishich e Victor Shulyatyev. 2017. *Experimental investigation of the effect of the laser beam polarization state on the quality of steel sheet cutting*. Vol. 1893. 10.1063/1.5007462.
- Goppold, Cindy, Thomas Pinder, Susanne Schulze, Patrick Herwig e Andrés Fabián Lasagni. 2020. "Improvement of Laser Beam Fusion Cutting of Mild and Stainless Steel Due to Longitudinal, Linear Beam Oscillation". *Applied Sciences* 10, no. 9: 3052.
- Goppold, Cindy, Karsten Zenger, Patrick Herwig, Andreas Wetzig, Achim Mahrle e Eckhard Beyer. 2014. "Experimental Analysis for Improvements of Process Efficiency and Cut Edge Quality of Fusion Cutting with 1µm Laser Radiation". *Physics Procedia* 56: 892-900.
- Granta Design, Limited. 2020. CES EduPack software. Cambridge, UK.
- Havrilla, David e Phillip Anthony. 1999. "Laser Cutting Process Fundamentals and Troubleshooting Guideline". Em *Process Fundamentals of Industrial Laser Welding and Cutting* edição de Inc. Rofin-Sinar Plymouth, Michigan.
- Heston, Tim. 2010. "Analyzing the potential of the solid-state laser". *The FABRICATOR*. <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/lasercutting/analyzing-the-potential-of-the-solid-state-laser>.

- Hitz, C.B., J.J. Ewing e J. Hecht. 2012. *Introduction to Laser Technology*. Wiley.
- Hunkjet Technocraft, Pvt. Ltd. 2019. "Laser Cutting Services". <http://www.hunkjet.co.in/laser-cutting-services-5548288.html>.
- Ion, J. 2005. *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*. Elsevier Science.
- Ivarson, A., John Powell, J. Kamalu e C. Magnusson. 1994. "The oxidation dynamics of laser cutting of mild steel and the generation of striations on the cut edge". *Journal of Materials Processing Technology* 40: 359-74. 10.1016/0924-0136(94)90461-8.
- Janković, Predrag, Miloš Madić, Miroslav Radovanović, Dušan Petković e Srđan Mladenović. 2019. "Optimization of Surface Roughness from Different Aspects in High-Power CO₂ Laser Cutting of AA5754 Aluminum Alloy". *Arabian Journal for Science and Engineering* 44. 10.1007/s13369-019-04037-9.
- Jarosz, Krzysztof, Piotr Löschner e Piotr Niesłony. 2016. "Effect of Cutting Speed on Surface Quality and Heat-affected Zone in Laser Cutting of 316L Stainless Steel". *Procedia Engineering* 149: 155-62.
- Jensen, Henrik Dahl e Jacob Erik Stadel Petersen. 2012. "High quality laser cutting in aluminium". Master Thesis, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Aalborg University.
- Jiang, D., Panjehpour, Sina Niazi e Mohammad Akbari. 2020. "Laser Cutting of Al 6061-T6 Aluminium Alloy Sheet: Effect of Cutting Condition and Sheet Thickness on the Temperature and Edge Cut Quality". *Lasers in Engineering* 45: 293-308.
- Kannatey-Asibu, E. 2009. *Principles of Laser Materials Processing*. Wiley.
- Kloeckner Metals UK. 2016. "Laser cutting and the automotive sector". Acedido a 25/08/2021. <https://www.kloecknermetalsuk.com/latest-news/laser-cutting-automotive-sector/>.
- Kongcharoen, Teeraphat e Maturose Suchatawat. 2018. "Effects of the Laser Process Parameters on Kerf Quality". *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 7, no. 2: 164-68. 10.18178/ijmerr.7.2.164-168.
- Kumar Dubey, Avanish e Vinod Yadava. 2008. "Multi-objective optimisation of laser beam cutting process". *Optics & Laser Technology* 40, no. 3: 562-70.
- Kurt, Mustafa, Eyup Bagci e Yusuf Kaynak. 2009. "Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 40, no. 5: 458-69. 10.1007/s00170-007-1368-2.
- Lapointe, Jerome e Raman Kashyap. 2015. "Laser Processed Photonic Devices". Em *Planar Waveguides and other Confined Geometries*, edição de Gerd Marowsky, 129-67. New York: Springer. 10.1007/978-1-4939-1179-0_6.
- Lasagni, Andrés. 2019. "Introduction to laser processing: the laser beam, a tool for multiple applications". Comunicação apresentada em Center for Advanced Micro-Photonics Dresden, 05/09/2019.
- Laser Lab Source. 2017. "Laser Diode Driver Basics and Circuit Design Fundamentals". Acedido a 25/08/2021. <https://www.laserdiodecontrol.com/laser-diode-driver-basics-and-fundamentals>.
- Maddaloni, P., M. Bellini e P. De Natale. 2016. *Laser-Based Measurements for Time and Frequency Domain Applications: A Handbook*. CRC Press.
- Madić, Miloš e Miroslav Radovanović. 2012. "Comparative modeling of CO₂ laser cutting using multiple regression analysis and artificial neural network". *International Journal of Physical Sciences* 7. 10.5897/IJPS12.109.
- Mahrle, Achim e Eckhard Beyer. 2009. "Theoretical aspects of fibre laser cutting". *Journal of Physics D: Applied Physics* 42: 175507. 10.1088/0022-3727/42/17/175507.
- McGuire, M.F. 2008. *Stainless Steels for Design Engineers*. ASM International.
- Minitab®. 2021. Minitab, LLC. <https://www.minitab.com/>.

- Miraoui, Imed, Mohamed Boujelbene e Mouna Zaied. 2016. "High-Power Laser Cutting of Steel Plates: Heat Affected Zone Analysis". *Advances in Materials Science and Engineering* 2016: 1242565. 10.1155/2016/1242565.
- Miyamoto, Isamu e H. Maruo. 1991. "Mechanism of laser cutting". *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde* 29: 283-94. 10.22486/iwj.v25i2.148338.
- Montiel i Ponsoda, Joan. 2013. "Analysis of photodarkening effects in ytterbium-doped laser fibers". Doctoral Thesis, Department of Micro- and Nanosciences, Aalto University School of Electrical Engineering.
- Moraes, Simões. 2015. *Desenho Técnico Básico*. Edição de Porto Editora.
- Moreira, Hugo. 2017. "Projeto e desenvolvimento de um sistema laser de estado sólido para uso em Velocimetria de Partículas". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Moura, Luís Miguel Pinto de. 2016. "Otimização do processo de moldação associado à produção de rolhas de champanhe e de outras bebidas efervescentes". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ozaki, Hitoshi, Yosuke Koike, Hiroshi Kawakami e Jippei Suzuki. 2012. "Cutting Properties of Austenitic Stainless Steel by Using Laser Cutting Process without Assist Gas". *Advances in Optical Technologies* 2012: 234321.
- Palma, Jorge Laginha. 2018. *Escoamentos Exteriores (1/6): Características gerais. Resistência aerodinâmica e sustentação. Escoamento separado, zona de recirculação, esteira, e pontos de estagnação, separação e recolagem*. Departamento de Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pannier Corporation. 2019. "Laser Wavelengths". Acedido a 24/08/2021. <https://www.pannier.com/laser/laser-wavelengths/>.
- Pocorni, Jetro. 2017. "Laser Cutting and Piercing: Experimental and Theoretical Investigation". Doctoral Thesis, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Luleå University of Technology.
- Powell, Carol e David Jordan. 2005. *Fabricating Stainless Steels for the Water Industry. Guidelines for Achieving Top Performance*. Nickel Institute.
- Powell, John. 1998. "Cutting Non-metals". Em *CO2 Laser Cutting*, edição de John Powell, 91-115. London: Springer London. 10.1007/978-1-4471-1279-2_4.
- Powell, John, Dirk Petring, Ramachandran Kumar, Saeed Mashikhi, A. Kaplan e K. Voisey. 2008. "Laser-oxygen cutting of mild steel: The thermodynamics of the oxidation reaction". *Journal of Physics D: Applied Physics* 42: 015504. 10.1088/0022-3727/42/1/015504.
- Rajaram, N., J. Sheikh-Ahmad e S. H. Cheraghi. 2003. "CO2 laser cut quality of 4130 steel". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43, no. 4: 351-58. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00270-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00270-5). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695502002705>.
- Rasheed, Jasim Hassan. 2012. "Studying roughness of steel cutting process by laser". *Diyala Journal of Engineering Sciences* 05, no. 01: 181-90.
- Ready, J.F. 1997. *Industrial Applications of Lasers*. Elsevier Science.
- Riveiro, A., F. Quintero, F. Lusquinhos, R. Comesaña, J. del Val e J. Pou. 2011. "The Role of the Assist Gas Nature in Laser Cutting of Aluminum Alloys". *Physics Procedia* 12: 548-54.
- Riveiro, Antonio, Felix Quintero, Mohamed Boutinguiza, J. del Val, Rafael Comesaña, Fernando Lusquinhos e Juan Pou. 2019. "Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas". *Materials* 12: 157. 10.3390/ma12010157.
- Rodrigues, Luis Maria Mota. 2013. "Aplicação dos métodos de Taguchi e estudo da capacidade do processo: caso de estudo na indústria automóvel". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- ROFIN-SINAR, Laser GmbH. 2017. HighLight FL Laser de fibra. Manual de utilização.
- Ross, P.J. 1996. *Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design*. McGraw-Hill.

- Shane. 2019. "The ultimate guide to fiber laser cutting". Acedido a 20/05/2021. <https://www.machinemfg.com/fiber-laser-cutting/>.
- Silfvast, William. 2004. *Laser Fundamentals*. Cambridge University Press.
- Silfvast, William T. 2003. "Lasers". Em *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, edição de Robert A. Meyers, 267-81. New York: Academic Press.
- Singh, Anitesh Kumar, Kalinga Simant Bal, Abhishek Rudra Pal, Dipanjan Dey e Asimava Roy Choudhury. 2021. "A novel method to reduce dross in laser beam cutting of Ti-6Al-4 V alloy sheet". *Journal of Manufacturing Processes* 64: 95-112.
- Sobih, Mohamed, P. Crouse e Lin Li. 2007. "Striation-free fibre laser cutting of mild steel sheets". *Applied Physics A* 90: 171-74. 10.1007/s00339-007-4247-7.
- Steen, W.M. e J. Mazumder. 2010. *Laser Material Processing*. 4 ed.: Springer-Verlag London. 10.1007.
- Sun, Shoujin e Milan Brandt. 2013. "Laser Beam Machining". Em *Nontraditional Machining Processes*, edição de João Paulo Davim, 232. 1 ed.: Springer-Verlag London.
- Taylor, Travis S. 2019. *Introduction to Laser Science and Engineering*. CRC Press.
- Tinoco, João. 2011. "Desenvolvimento de um sistema de troca automática do nozzle de corte para máquinas de corte por laser". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- TRUMPF. 2016. TruServices: Product Enhancements. edição de TRUMPF.
- TRUMPF. 2021. "Be a cut above the rest. Process tubes using lasers". https://www.trumpf.com/en_GB/products/machines-systems/laser-tube-cutting-machines/laser-tube-cutting-web-special/novices/.
- Tuthill, A.H. e R.E. Avery. 1999. "Heat Tints on Stainless Steels Can Cause Corrosion Problems". *Materials Performance*.
- Wandera, Catherine. 2006. "Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam". Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Lappeenranta University of Technology.
- Wandera, Catherine. 2016. "Fiber Lasers in Material Processing". Em *Fiber Laser*, edição de Mukul Paul: IntechOpen. 10.5772/62014.
- Wandera, Catherine e Veli Kujanp. 2010. "Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel". *Journal of Laser Applications* 22. 10.2351/1.3455824.
- Wandera, Catherine, Veli Kujanp e Antti Salminen. 2011. "Laser power requirement for cutting thick-section steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 225: 651-61. 10.1177/09544054JEM1971.
- Wandera, Catherine, Antti Salminen e Veli Kujanp. 2009. "Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser". *Journal of Laser Applications - J LASER APPL* 21. 10.2351/1.3184429.
- Zheng, Hong Yu. 1990. "In-process quality analysis of laser cutting.". Doctoral Thesis, Dept. of Mechanical Eng., University of London.

7. ANEXOS

ANEXO 1: Tubo aço estrutural (S275JOH), 3 mm de espessura, secção circular (Ø100mm).



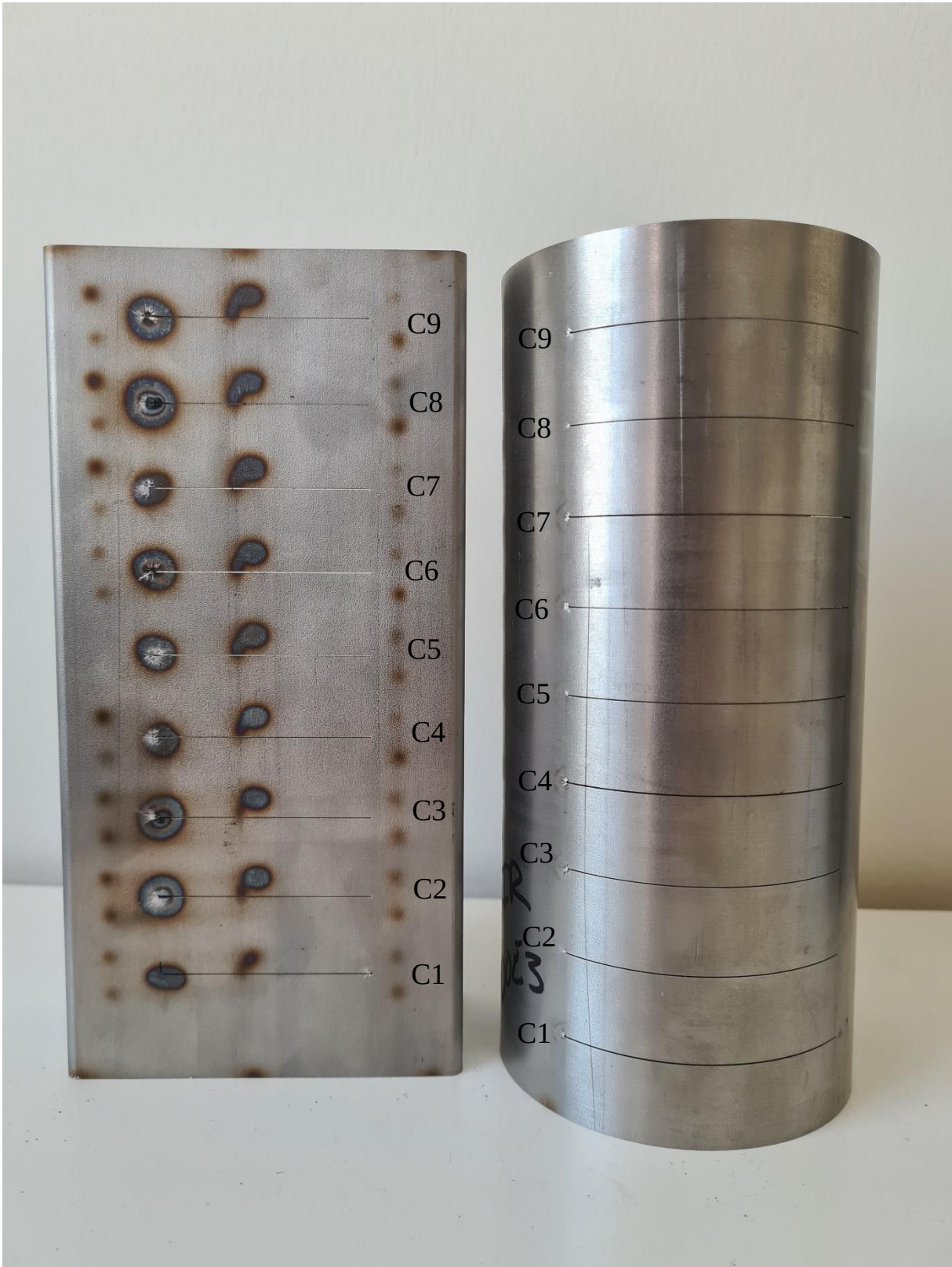
ANEXO 2: Tubos aço estrutural (S275JOH), 6 mm de espessura, secção retangular (80x40 mm) e secção circular (Ø114.3 mm).



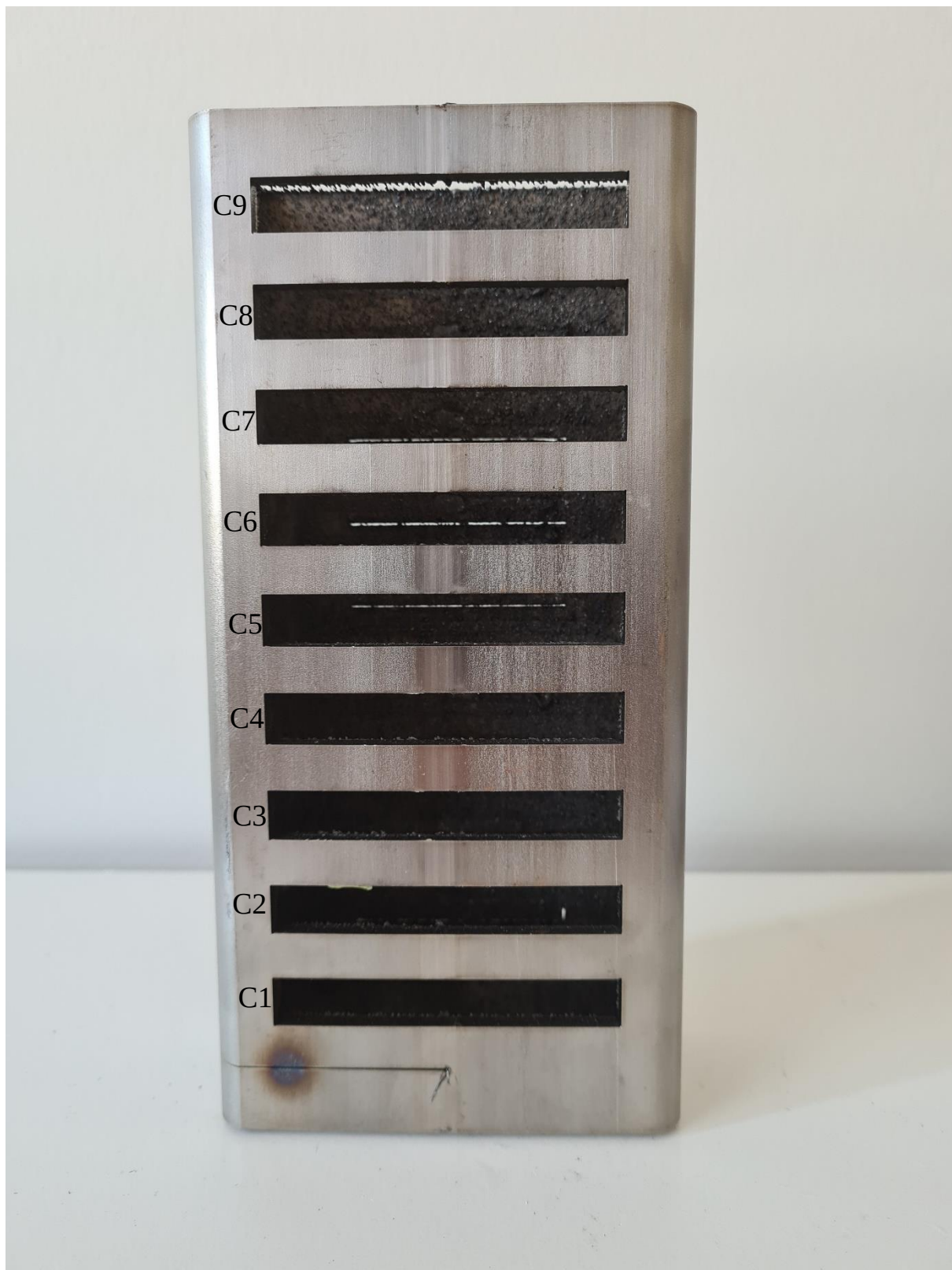


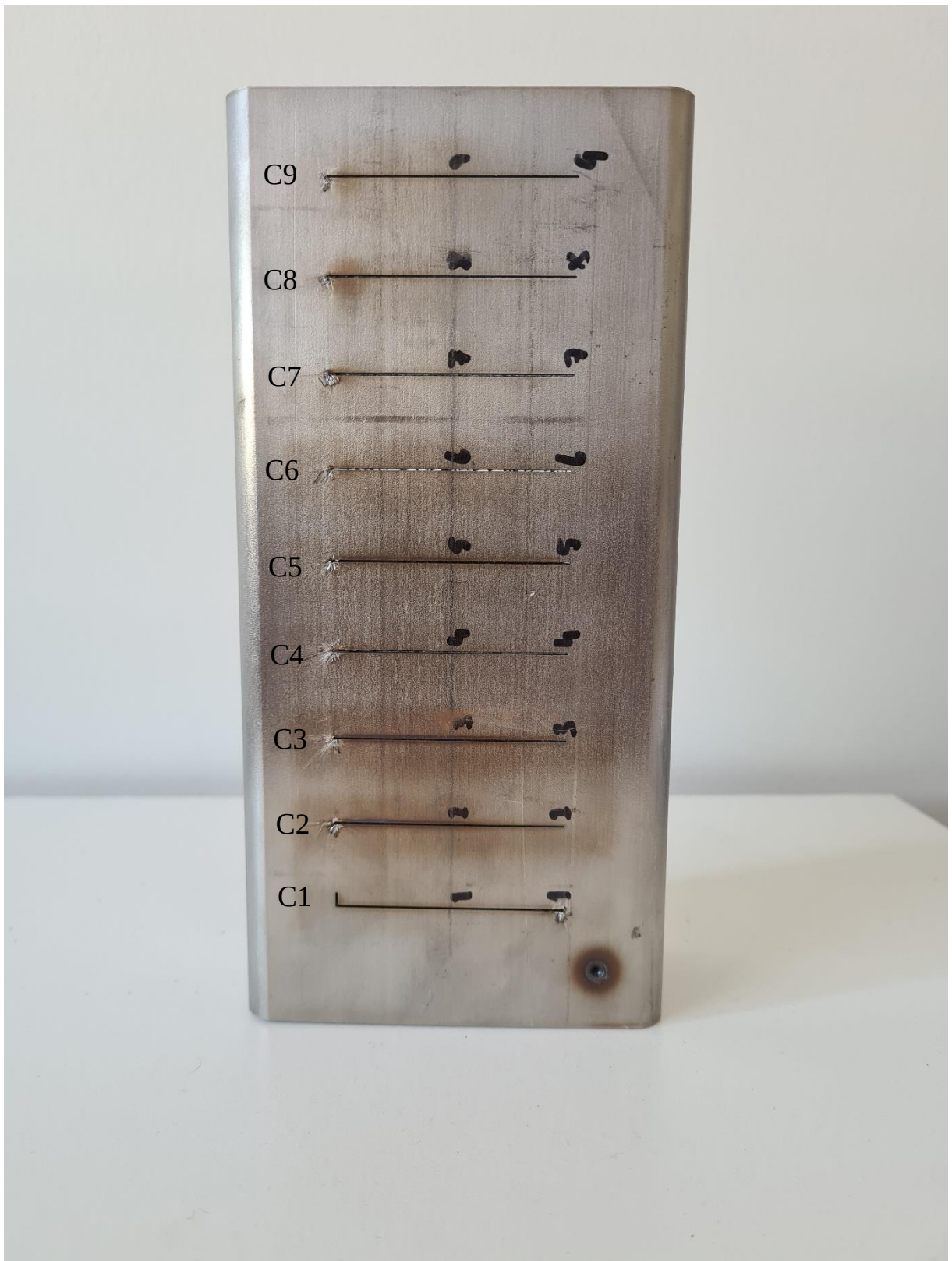
ANEXO 3: Tubos aço inoxidável (AISI 304), 2 mm de espessura, secção retangular (100x50 mm) e secção circular (Ø88.9 mm).





ANEXO 4: Tubo aço inoxidável (AISI 304), 5 mm de espessura, secção retangular (100x50 mm).





ANEXO 5: Tubos de alumínio (AW 6063), 2 mm de espessura, secção retangular (120x40 mm) e secção circular (Ø85 mm).

