

Otimização do Processo Produtivo de Corte Laser

João Pedro Martins de Freitas

Dissertação de Mestrado

Orientador: Professor José Manuel Ferreira Duarte

Coorientador: Professor Miguel Augusto Vigário de Figueiredo

Orientador na empresa: Bruno Miguel Ferreira Pereira



FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado em Engenharia Mecânica

Setembro 2022

Resumo

Corte Laser é um processo de manufatura bastante recente, tendo o primeiro laser desenvolvido para o processo produtivo sido produzido na segunda metade do século XX. Este processo trouxe bastante interesse para a indústria devido à sua grande fiabilidade de resultados, versatilidade e precisão.

Este processo baseia-se na energização dos eletrões num meio sólido, líquido ou gasoso, o que despoleta uma emissão de energia sob a forma de luz por parte do mesmo. Esta energia é então focada através de lentes de elevada qualidade num ponto de muito pequena dimensão no material. Através da concentração de uma grande quantidade de energia nesse ponto é possível cortar uma enorme variedade de materiais em qualquer forma desejada, com extrema precisão e rapidez.

Neste projeto foi utilizado um laser NUKON NF PRO 620, disponibilizado pela empresa VLB Group para o efeito. O foco deste estudo será entender melhor as capacidades do laser, estudar os seus parâmetros e a sua influência, e procurar um conjunto dos mesmos que melhore a qualidade do processo produtivo.

Esta dissertação começa com um enquadramento no estado de arte atual do corte laser, bem como nos seus princípios básicos de funcionamento, seguido de uma introdução ao método estatístico de Taguchi, proporcionando assim as bases para o estudo prático.

A parte prática deste estudo inicia-se com a definição do problema e do estudo a ser feito, seguido de um planeamento de experiências e posterior levantamento de resultados. Estes resultados foram analisados com base nos métodos estatísticos mencionados nos capítulos teóricos.

Com estes estudos conseguimos definir a potência, velocidade de corte, foco e espessura como os parâmetros mais significativos neste processo, bem como quantificar a sua influência na qualidade final, chegando a um conjunto de processos para uma determinada espessura, apresentando também o processo de determinação destes parâmetros ótimos para outras espessuras.

Palavras-chave. Laser, corte laser, metalomecânica, produção, fabrico, Taguchi, otimização, meio ativo, gás de assistência, corte metais.

Optimization of the laser cutting manufacturing process

Abstract

Laser cutting is a relatively recent manufacturing process, having the first equipment developed for production been built only in the second half of the 20th century. This process brought an extensive interest for the industry due to its great reliability, versatility, and precision.

This process is based in the energization of the electrons in a gas, liquid, or solid-state gain medium, which triggers an emission of energy in the form of light. This energy is then focused through high quality lenses in a very small point in the material. By this means we have a massive amount of energy in that very small spot, which allows us to cut a vast variety of materials in any desired form, with great precision and speed.

In this project we utilized a NUKON NF PRO 620 laser, made available by the company, VLB Group. The focus of the conducted study is to better understand the capabilities of the machine, study it's input parameters and their influence, and pursue a set of these same parameters that would improve the quality of the production process.

This dissertation starts with some considerations on the laser cutting state of the art, as well as its basic operating elements, followed by an introduction to the Taguchi statistical method, providing the fundamental bases for the practical study.

The practical portion of the essay starts with the definition of the problem that is to be addressed and of the study to be carried out, followed by the assay planning and posterior results collection. These results were analysed according with the statistical methods aforementioned in the theoretical chapters.

With these studies we were able to define power, cutting speed, focus point and thickness as the most significant parameters in this process, as well as quantifying its influence in the final quality.

Keywords. Laser, laser cutting, metalomecanic, production, manufacturing, Taguchi, optimization, active mean, assistance gas, metal cutting.

Agradecimentos

A realização desta dissertação foi um processo moroso e cansativo, porém muito enriquecedor, que não teria sido possível sem o apoio e ajuda de um grupo de pessoas que merecem um agradecimento especial por me terem permitido chegar aqui.

Aos meus orientadores por parte da universidade, o professor José Manuel Ferreira Duarte e o professor Miguel Augusto Vigário de Figueiredo, que decidiram aceitar o desafio e me guiaram através de várias dificuldades, tendo sempre tempo e disponibilidade para responder às minhas perguntas, aconselhar nas decisões a tomar e envolver-se de forma bastante ativa no desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu orientador na empresa, Bruno Miguel Ferreira Pereira, bem como a toda a equipa do departamento de corte laser, por me mostrarem e explicarem o processo e funcionamento do laser, e estarem sempre disponíveis para me ajudar com os ensaios, dando conselhos muito valiosos.

Ao gerente da empresa, Vasco Moreira Barros, que acreditou em mim e aceitou o desafio por mim proposto, e me disponibilizou todos os meios que possibilitar a realização desta dissertação.

A todos os colaboradores da empresa, que ao longo deste semestre se mostraram disponíveis para falar comigo sobre o tema, partilhar as suas ideias responder às minhas questões. Dentro destes uma especial menção ao Eng. André Ferreira, cuja paixão pela indústria, educação e empenho desde cedo me influenciaram e motivaram.

Aos meus amigos, com quem sempre pude contar e estiveram lá para mim, tanto em assuntos académicos, como para me motivar e que muito me ajudaram e terei imenso gosto em tê-los comigo ao longo da minha vida profissional, tal como tive na minha vida universitária.

Para último deixo um agradecimento especial às pessoas que desde sempre estiveram lá para mim, em momentos bons e momentos maus e fizeram de mim quem sou hoje. Aos meus pais Arlindo e Guilhermina, à minha irmã Francisca, às minhas tias Lúcia, Lucinda e Fernanda, e à minha namorada, Inês.

Índice de Conteúdos

Capítulo 1 – Motivações e objetivos	1
1.1. Descrição da empresa – VLB Group.....	1
1.2. Motivação Pessoal.....	2
1.3. Objetivos do projeto	3
1.4. Estrutura da dissertação.....	3
Capítulo 2 – Estado da arte	5
2.1. História do Laser	5
2.2. Princípios base do Laser.....	6
2.2.1. Constituição de um laser	6
2.2.2. Estrutura de Modos	10
2.2.3. Direcionalidade	11
2.2.4. Energia de Focalização.....	11
2.2.5. Regime de Funcionamento Temporal	12
2.3. Interação do Laser com a Matéria	13
2.4. Constituição de um aparelho de corte laser.....	15
2.4.1. Cabeça de corte	15
2.4.2. Mesa de corte	16
2.4.3. Sistema de movimentação	16
2.5. Principais tipos de lasers e aplicações.....	17
2.5.1. Tipos de Laser	17
2.5.2 Tipos de Matéria-Prima.....	19
2.5.3. Aplicações	21
2.6. Considerações econômicas.....	22
2.7. Vantagens.....	23
2.8. Defeitos característicos	24
2.8. Conclusões	25
Capítulo 3 – Robust Design – Método de Taguchi	28
3.1. Introdução	28
3.2. Objetivos	29
3.3. Procedimento.....	29
3.4. Seleção da matriz e parâmetros de controlo.....	31
3.5. Análise de resultados.....	32
Capítulo 4 – Caso prático	36
4.1. Planeamento	37
4.1.1. Estudo dos parâmetros da máquina.....	37

4.1.2. Testes e avaliações	41
4.1.3. Definição do provete de estudo	46
4.2. Ensaio nº 1.....	48
4.2.1. Matriz de Taguchi	49
4.2.2. Resultados	52
4.2.3. Análise de Resultados – Oxigénio.....	54
4.2.4. Conclusões – Oxigénio.....	57
4.2.5. Análise de Resultados – Azoto.....	57
4.2.6. Conclusões – Azoto.....	59
4.3. Ensaio nº 2.....	60
4.3.1. Matriz de Taguchi	60
4.3.2. Resultados	62
4.3.3. Análise de resultados.....	64
4.3.4. Conclusões	74
4.3.5. Teste de validação	76
4.4. Ensaio nº 3.....	78
4.4.1 Matriz de Taguchi	78
4.4.2 Resultados	79
4.4.3 Análise de resultados.....	80
4.4.4. Conclusões	83
4.4.5. Teste de validação	84
Capítulo 5 – Trabalhos futuros.....	87
Referências.....	88
Anexos.....	91

Índice de Figuras

Figura 1 - Linha de conformação de chapa (VLB Group, 2022)	2
Figura 2 - Inversão de população e decaimento (Huzynets, 2020)	7
Figura 3 - Espectro eletromagnético para vários tipos de laser (Dermatology Lasers, 2022).....	7
Figura 4 - Representação da focagem de um feixe laser (BOC, 2022)	9
Figura 5 – Modos Eletromagnéticos Transversos de um laser (Jarabo & Lavieja, 2011).....	10
Figura 6 - Interação do feixe laser com a matéria (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Perreira, 1993)	14
Figura 7 - Principais constituintes de um sistema laser (Dias, 2015).....	15
Figura 8 - Cabeça, mesa e sistema de movimentação do laser em estudo	16
Figura 9 - Laser Nukon NF-PRO-620 6kW (Imagem retirada do website da marca).....	36
Figura 10 - Medição do comprimento do provete.....	43
Figura 11 - Esquematização da medição de R_a numa superfície (Morais, 2006).....	44
Figura 12 - Esquematização da medição de R_z numa superfície (Morais, 2006)	45
Figura 13 - Medição da rugosidade da face de corte de um provete.....	45
Figura 14 - Representação computadorizada do provete de teste	46
Figura 15 - Exemplo de provete final.....	47
Figura 16 - Resultados do 1º ensaio. Face superior (esquerda) e face inferior (direita).....	52
Figura 17 - Resultados do 2º Ensaio. Face superior (esquerda) e face inferior (direita)	62
Figura 18 - Influência do ponto de focagem no feixe laser (Nukon, 2019)	75
Figura 19 - Provete cortado com os parâmetros da empresa (esquerda) e com os parâmetros ótimos obtidos neste ensaio (direita).....	77
Figura 20 - Resultado do teste de validação feito com os parâmetros da empresa (esquerda) e com os valores ótimos teóricos (direita).....	83
Figura 21 - Interações estudadas pela matriz L8 de Taguchi	92
Figura 22 - Micrometros de exteriores com gama de medição de 75 a 100mm (cima) e 0 a 25mm (baixo)	96
Figura 23 - Rugosímetro disponibilizado pela FEUP para esta dissertação.....	97

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores utilizados atualmente pela empresa para corte de chapas de aço ST-37 com 8 mm	48
Tabela 2 - Parâmetros de Taguchi em tabela L18 para 1º Ensaio	50
Tabela 3 - Comparação dos níveis utilizados no 1º e 2º ensaios	60
Tabela 4 - Tabela L18 de Taguchi utilizada no 2º ensaio	61
Tabela 5 - Valores medidos de rugosidade no 2º ensaio	63
Tabela 6 - Valores P para os diferentes parâmetros na medição de Ra no 2º ensaio	64
Tabela 7 – Valores P para os diferentes parâmetros na medição de Rz no 2º ensaio	65
Tabela 8 - Contribuição de cada parâmetro para o valor de Ra	66
Tabela 9 - Contribuição de cada parâmetro para o valor de Rz	66
Tabela 10 - Parâmetros modificados do valor atual para o teste de validação do 2º ensaio	76
Tabela 11 - Valores dos parâmetros utilizados no ensaio nº3	78
Tabela 12 - Valores de rugosidade do 3º ensaio	80
Tabela 13 - Valores P para os diferentes parâmetros na medição de Ra no 3º ensaio	80
Tabela 14 - Valores P para os diferentes parâmetros na medição de Rz no 4º ensaio	81
Tabela 15 - Parâmetros modificados do valor atual para o teste de validação do 3º ensaio	84
Tabela 16 - Tabela exemplo da que será utilizada para analisar e controlar os valores ótimos do corte laser	87
Tabela 17 - Matriz ortogonal L18 de Taguchi	91
Tabela 18 - Matriz ortogonal L8 de Taguchi	92
Tabela 19 - Resultados da medição de rugosidade (Ra e Rz) do 2º ensaio	93
Tabela 20 - Resultados da medição de rugosidade (Ra e Rz) do teste de validação do 2º ensaio	93
Tabela 21 - Resultados da medição de rugosidade (Ra e Rz) do 3º ensaio	94
Tabela 22 - Resposta Ra para cada nível de cada fator, através da análise de médias	95
Tabela 23 - Resposta Rz para cada nível de cada fator, através da análise de médias	95

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Ra em função da potência.....	67
Gráfico 2 - Rz em função da potência.....	68
Gráfico 3 - Ra em função da velocidade de corte	68
Gráfico 4 - Rz em função da velocidade de corte	69
Gráfico 5 - Ra em função do foco.....	70
Gráfico 6 - Rz em função do foco.....	70
Gráfico 7 - Ra em função da espessura	71
Gráfico 8 - Rz em função da espessura.....	71
Gráfico 9 - Ra em função da pressão	72
Gráfico 10 - Rz em função da pressão	73
Gráfico 11 – Ra em função de todos os parâmetros do 3º ensaio	82
Gráfico 12 - Rz em função de todos os parâmetros do 3º ensaio	82

Lista de Siglas

CAD – Computer aided design – Desenho assistido por computador

CNC – Computer numerical control – Controlo numérico por computador

HAZ – Heat affected zone – Zona afetada pelo calor

LASER - Light amplification by stimulated emission of radiation – Amplificação de luz por emissão estimulada de eletrões

TEM – Transverse eletromagnetic mode – Modo Eletromagnético Transverso

Lista de símbolos

θ_d	Ângulo de divergência
λ	Comprimento de onda
d_0	Diâmetro do plano focal
f	Distância focal da lente
D	Diâmetro
γ	Coeficiente de acoplamento
E_0	Energia incidente
E	Energia absorvida
SQ_A	Soma de quadrados do fator A
K_A	Número de níveis do fator A
n_{Ai}	Número de observações do fator A no nível i
$\overline{A_1}$	Média das observações do fator A no nível i
T	Média de todas as observações
DQM_A	Desvios quadráticos médios do fator A
gl_A	Graus de liberdade do fator A
F_i	Racio F
α	Nível de significância
P	Contribuição
R_z	<i>Rédia aritmética das alturas máximas</i>
Ra	Rugosidade média aritmética
Z	Altura do perfil de corte

Capítulo 1 - Motivações e objetivos

Neste capítulo introdutório será apresentada a origem desta dissertação, bem como as ligações pessoais – empresariais por trás do desenvolvimento do tema. É feita também uma curta descrição da estrutura seguida e dos objetivos que se pretendem alcançar.

1.1. Descrição da empresa - VLB Group

Sediada em Vila Nova de Famalicão, no distrito de Braga, a VLB Group inclui-se num grupo de empresas que tem vindo a evoluir muito nos últimos anos. O grupo engloba empresas como a MAQFORT, uma empresa que comercializa uma enorme gama de máquinas industriais, apostando num elevado volume de produtos disponíveis em armazém, o que permite prazos de entrega na ordem de dias e a LOB Motosport, que tem o seu principal foco no desporto motorizado, estando no presente ano a competir pela segunda vez no campeonato da GT3 Cup Portugal.

A VLB Group, fundada em 2015, é uma empresa especializada em máquinas ferramenta, elétricas e hidráulicas, de dobrar e conformar tubos e chapas metálicas, produzindo máquinas 100% dedicadas a obter o produto final pretendido por cada cliente.

Os principais produtos apresentados pela empresa são, para tubos, as curvadoras e conformadoras, e para chapas, linhas de perfilagem com tantas estações conforme necessário pelo cliente.

Além das máquinas a empresa produz ainda desenroladores, alimentadores, endireitadores, detetores de soldadura, mesas de furação e enroladores que são desenvolvidos em conjunto com as máquinas, de modo a tornar todo o processo de trabalho o mais automatizado possível.

Todos estes produtos são fabricados quase integralmente pela empresa, sendo que apenas é subcontratado tratamentos mais específicos de algumas ferramentas, como tempera por indução, nitruração e cementação.

Neste sentido de continuar com uma grande capacidade de produção a empresa está munida de todo o tipo de processos, como corte laser, oxicorte, tornos, centros de maquinação, impressão 3D, eletroerosão por fio e por penetração, e soldadura.

Motivada por uma enorme ambição, a empresa encontra-se quase no limite da capacidade produtiva da sua fábrica em Famalicão, estando presentemente em construção um novo pavilhão em Chaves de modo a conseguir exponenciar o seu crescimento para além do limite atual.



Figura 1 - Linha de conformação de chapa (VLB Group, 2022)

1.2. Motivação Pessoal

A minha ligação profissional ao grupo começou em 2020, tendo sido convidado a incorporar a LOB Motosport e a acompanhar a equipa. As minhas principais funções são a recolha e análise de vídeo e data sobre a performance de um dos carros participantes no troféu GT3 Cup Portugal.

Esta ligação fez com que me deslocasse até à fábrica da VLB Group frequentemente e a minha curiosidade como engenheiro sempre me despertou o interesse pelas máquinas, o que me levava a longas conversas com os operadores, querendo sempre saber mais sobre o seu funcionamento.

Foi numa destas visitas que me foi confidenciado que o laser poderia beneficiar de alguns estudos que levassem à melhoria do acabamento do corte. Sendo que se avizinhava a elaboração da minha dissertação, falei com o responsável da máquina e com o gerente da empresa, apresentando a minha proposta de dissertação, que foi aceite por ambos.

1.3. Objetivos do projeto

Este projeto tem como objetivo a otimização do corte por laser através do estudo da influência dos parâmetros no processo de corte. Assim pretende-se compreender melhor a importância de cada um dos parâmetros, analisando a sua influência nas propriedades finais, e chegar a um conjunto de parâmetros de corte que apresentem melhores resultados do que os usados atualmente.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por uma parte teórica sobre o processo de corte laser, explicando os seus princípios fundamentais de funcionamento, bem como fazendo um levantamento dos vários tipos de laser disponíveis atualmente no mercado.

De seguida é feita uma exposição teórica do método de Taguchi, utilizado para determinar os parâmetros dos ensaios a fazer e na sua análise.

A parte prática começa com uma análise do equipamento de corte utilizado e dos parâmetros que este permite que sejam alterados, bem como a seleção desses mesmos parâmetros para cada ensaio e dos métodos que serão utilizados para analisar os resultados.

Posteriormente são apresentados todos os resultados desses ensaios e a sua análise, bem como todas as conclusões a que foi possível chegar.

Por último são definidos estudos futuros de modo a desenvolver ainda mais as conclusões feitas nesta dissertação e obter um entendimento ainda mais profundo sobre o processo produtivo de corte laser.

Capítulo 2 - Estado da arte

Neste capítulo é apresentado o estado atual do processo de fabrico, bem como a sua evolução ao longo do tempo. São desenvolvidos alguns dos conceitos e características mais importantes deste processo, além das suas aplicações. Por último estuda-se teoricamente a influência de alguns parâmetros nas características finais das peças.

2.1. História do Laser

A história do Laser tem o seu início em 1916, quando Albert Einstein teorizou sobre a possibilidade de átomos emitirem um excesso de energia, sob a forma de luz visível, quando estimulados, fenómeno que foi visto em prática apenas em 1928 por Rudolf Walther Ladenburg.

No entanto, foi apenas nos anos 50 do século XX que foi produzido um aparelho capaz de gerar este efeito, na altura ainda na zona das micro-ondas, desenvolvido por Charles H. Townes, que utilizava moléculas de amônia excitada. Este dispositivo foi chamado de Maser, “microwave amplification by stimulated emission of radiation”.

O primeiro Laser utilizado para efeitos de produção remete-nos para meio da década de 60 do século XX, quando Theodore H. Maiman emitiu um laser de luz vermelha com recurso a um rubi. Em dezembro do mesmo ano, Ali Javan, William Bennet Jr., e Donald Herriott conseguiram gerar um laser contínuo de ondas infravermelhas com recurso a uma mistura de hélio e néon. (Hecht, 2006)

Este dispositivo pode ser considerado uma solução que nasceu antes do problema, visto que demorou anos até ser descoberta uma utilização comercial para o feixe laser. As primeiras utilizações remetiam apenas para a característica da visibilidade do feixe, como por exemplo linhas retas para alinhamento na construção civil.

O seu uso mais corrente começou na década de 70 do século xx, com lasers utilizados no corte de titânio para a indústria aeroespacial. Posteriormente, houve um enorme boom na utilização de lasers em todas as áreas, desde impressoras, leitores de CDs, produção de peças metálicas e muitos mais. (Belforte, 2010)

2.2. Princípios base do Laser

Laser é o termo mais corrente para “Light amplification by stimulated emission of radiation”, e representa um instrumento capaz de emitir um feixe de radiação dotado uma grande quantidade de energia.

O princípio fulcral de um equipamento laser é a excitação de um meio material, de forma que este, ao regressar desse estado excitado ao estado fundamental, emita energia sob a forma de radiação. Esta energia é então focada, utilizando um sistema ótico, no material a processar.

2.2.1. Constituição de um laser

Meio ativo

O meio material do laser que sofre a excitação, também chamado de meio ativo, é um componente basilar do equipamento, tendo de ser capaz de emitir fótons que por sua vez desencadeiem a emissão de fótons iguais.

Utilizando um meio material adequado, esta emissão estimulada de fótons é desencadeada pela passagem de eletrões de níveis inferiores, com menor quantidade de eletrões, para níveis superiores, de modo a alcançarmos um estado metaestável em que a densidade populacional de eletrões está oposta ao seu estado estável, estado esse chamado de inversão da população (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Perreira, 1993).

Nem todos os decaimentos entre níveis energéticos conduzem à emissão de um fóton com as características adequadas, sendo por vezes se provocada uma inversão de população entre vários níveis energéticos.

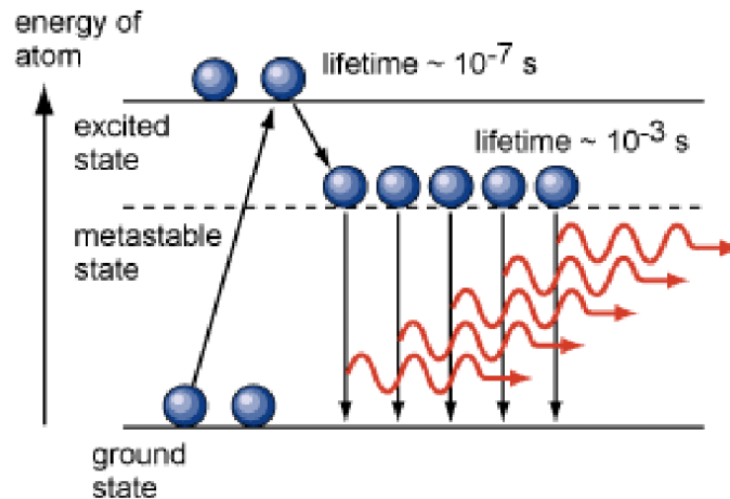


Figura 2 - Inversão de população e decaimento (Huzynets, 2020)

Este meio ativo pode ser do estado sólido, líquido ou gasoso, sendo a gama de comprimentos de onda emitida dependente da partícula responsável pela emissão dos fótons. No caso de se tratar de um laser iônico, que utiliza íons como fonte da libertação energética, este vai apresentar comprimentos de onda muito curtos, nomeadamente nas zonas ultravioleta e visível; em lasers atômicos temos comprimentos superiores, na zona do visível e infravermelho; no caso de lasers moleculares a radiação emitida vai ter grandes comprimentos de onda, puramente na zona do infravermelho. (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Perreira, 1993). A Figura 3 mostra os comprimentos de onda característicos de vários tipos de laser.

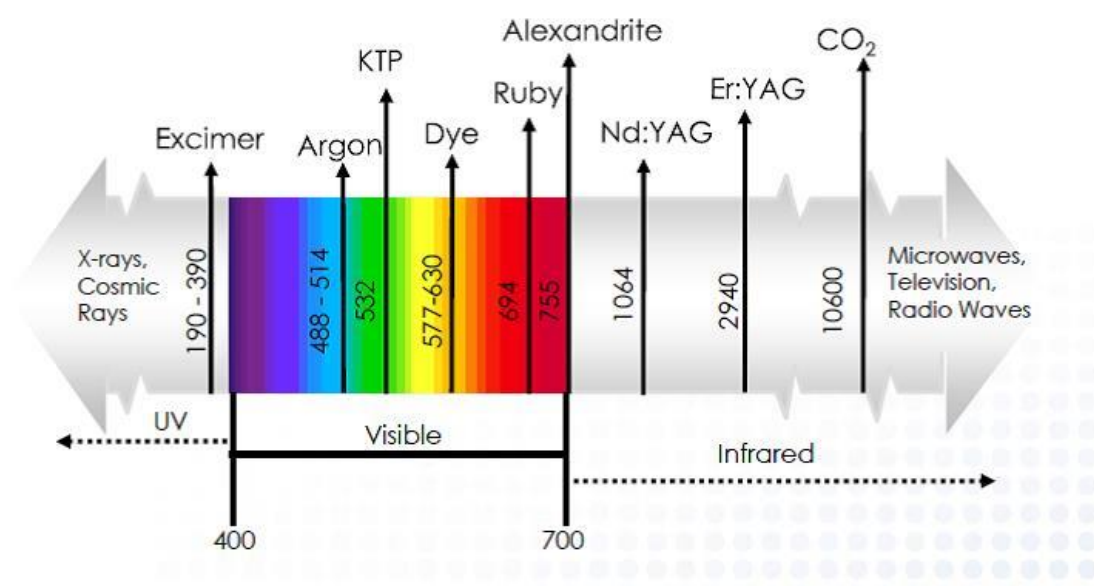


Figura 3 - Espectro eletromagnético para vários tipos de laser (Dermatology Lasers, 2022)

Bombeamento

A excitação em massa de elétrons de níveis inferiores para níveis mais energéticos é denominada de bombeamento de elétrons. Este bombeamento pode ser ótico ou elétrico.

No caso de lasers de estado sólido é normalmente utilizado o bombeamento ótico com recurso a lâmpadas estroboscópicas. Estas lâmpadas são compostas por um conjunto de tubos de vidro selados, cheios de um meio gasoso, por exemplo Xénon, que libertam energia sob a forma de fótons quando recebem uma descarga elétrica. O comprimento de onda dessa energia libertada sob a forma de fótons coincide em parte com o comprimento de onda característico do meio ativo (meio de propagação).

No caso de lasers de estado gasoso é mais comum a utilização do bombeamento elétrico, onde é passada uma corrente de alta voltagem diretamente no meio gasoso. Esta corrente confere uma elevada energia cinética aos elétrons por onde passa que, posteriormente, causam a inversão de população através de colisões com elétrons de um dos gases e, consequentemente, excita o segundo gás.

Recentemente, tem havido um foco em lasers de estado sólido que utilizam um díodo para o bombeamento de elétrons (Diodo-pumped solid state lasers). Este sistema oferece uma melhor correspondência entre os espectros de saída do laser e de absorção do meio, o que leva a uma melhor eficiência do sistema. (Hitz, Ewing, & Hecht, 2001)

Cavidade Ressonante

Para se tomar partido da emissão estimulada de fótons, esta pode ser transformada num feixe laser, complementando este meio material com um sistema ótico adequado, chamado de cavidade ressonante. Esta cavidade é caracterizada por dois espelhos colocados nas extremidades do meio material e coaxialmente com este. Sendo que um dos espelhos apresenta apenas uma reflexão parcial, a emissão da radiação do feixe laser é feita por esse mesmo espelho. Os fótons emitidos por este mecanismo apresentam todos o mesmo comprimento de onda (monocromatismo) e a mesma fase (coerência), a mesma direccionalidade e uma quantidade de energia muito elevada.

Logo a seguir ao espelho parcialmente transparente há uma lente de focagem que concentra a energia do feixe laser num ponto, como pode ser visto na Figura 4. O local onde se dá esta focagem é extremamente importante no processo de corte laser. (Svelto, 2010)

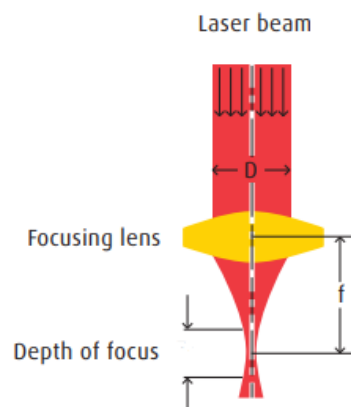


Figura 4 - Representação da focagem de um feixe laser (BOC, 2022)

2.2.2. Estrutura de Modos

A secção transversal do feixe laser, embora circular, pode apresentar diversas distribuições de energia radiante. As várias distribuições de energia designam-se por Modo Eletromagnético Transverso (TEM – Transverse Eletromagnetic Mode), designados por TEM_{ii} , em que os dois índices tomam o valor de números inteiros conforme a quantidade, como evidenciado na Figura 5.

Este atributo do feixe laser depende de características construtivas da câmara de ressonância, sendo que para o corte laser o mais interessante é o TEM_{00} , também conhecido como modo fundamental.

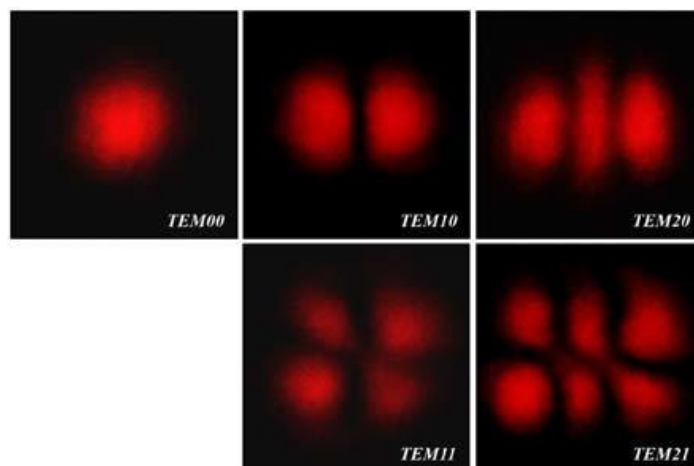


Figura 5 – Modos Eletromagnéticos Transversos de um laser (Jarabo & Lavieja, 2011)

2.2.3. Direcionalidade

A cavidade de ressonância é também a responsável pela muito alta direcionalidade apresentada pelo feixe laser, bem como o seu comprimento de onda. Esta característica é avaliada pela divergência do feixe, medida em miliradianos [mrad].

É interessante manter a divergência o mais pequena possível, pois o feixe tem muitas vezes de percorrer uma distância relativamente longa até ao material. É, por isso, normalmente utilizado o TEM₀₀ devido a apresentar a menor divergência, a qual pode ser aproximada pela Equação (2.1).

$$\theta_d = 1.22 \lambda \quad (2.1)$$

Onde:

θ_d é a divergência;
 λ é o comprimento de onda.

A direcionalidade de um feixe laser pode ser ainda melhorada recorrendo a um expensor de feixe que consegue reduzir a divergência aumentando, em proporção, o diâmetro do feixe.

2.2.4. Energia de Focalização

A focalização de um feixe luminoso por componentes óticos apenas é capaz de aumentar a sua irradiância quando se trata de um feixe coerente, como no caso dos dispositivos em estudo.

Nestes casos, a focalização do feixe resulta num estrangulamento do mesmo em que a zona de menor diâmetro, também denominada plano focal ou cintura do feixe, e corresponde ao local de irradiância máxima. Este diâmetro pode ser aproximado pela Equação (2.2).

$$d_0 = \frac{4 * \lambda * f}{\pi * D} \quad (2.2)$$

Onde:

d_0 é o diâmetro do feixe no plano focal;
 λ é o comprimento de onda;
 f é a distância focal;
 D é o diâmetro do feixe laser antes da focagem.

Novamente, o modo fundamental de funcionamento TEM00 é o que apresenta valores mais benéficos para o processo, nomeadamente uma maior energia de focalização, já que o plano focal é maior nos outros modos pois têm vários focos.

2.2.5. Regime de Funcionamento Temporal

O funcionamento temporal de um laser pode dar-se em dois tipos de regime: contínuo ou pulsado.

No regime contínuo há uma manutenção constante do feixe laser, tendo a potência radiante um valor que garanta a manutenção do regime de inversão de população, sendo essa potência diretamente proporcional à potência de bombeamento.

O regime pulsado é também comandado pela potência de bombeamento, tendo as durações do feixe valores entre os 0.1ms e 10ms, e a sua periodicidade é determinada pela capacidade do meio ativo retornar a um estado de equilíbrio térmico, resultando em frequências de recorrência entre 1Hz e 100Hz. (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Perreira, 1993)

Existe sempre a possibilidade de transformar o regime contínuo em regime pulsado, utilizando um componente à saída da câmara de ressonância que faça uma obturação intermitente do feixe. Pelo contrário, alguns lasers de funcionamento pulsado não são passíveis de funcionar no regime de onda contínua, resultante de características do meio ativo que não permitem a criação e manutenção de uma onda deste tipo, ou devido à incapacidade do equipamento de lidar com o aquecimento que é substancialmente maior na utilização de uma onda contínua.

2.3. Interação do Laser com a Matéria

Este processo de trabalhar materiais diferencia-se bastante dos processos mais correntes uma vez que não existe qualquer contacto entre as ferramentas e a matéria-prima, utilizando a radiação para o corte de material e fazendo deste um método térmico de processamento de materiais.

Neste processo um aspeto muito importante a considerar é a condutibilidade térmica do material. Sendo este valor muito elevado, aumenta a dissipação do calor ao longo do metal, dificultando o aumento de temperatura no ponto de corte e, consequentemente, dificultado o corte. Idealmente, a condutibilidade térmica é tal que possibilite o aquecimento apenas do elemento de volume que se pretende remover, fundindo este sem aquecer significativamente o material circundante.

A segunda característica do material que também é fulcral para este processo é a sua refletividade. Quando é incidido um feixe laser num material, apenas uma parte da energia é absorvida pelo mesmo, sendo exclusivamente esta a percentagem que contribui para o processo de corte. Para avaliação desta característica é utilizada a razão entre a energia efetivamente absorvida e a energia total incidente, como exposto na Equação (2.3), sendo esta característica chamada de coeficiente de acoplamento,

$$\gamma = \frac{E}{E_0} \quad (2.3)$$

Onde:

γ é o coeficiente de acoplamento;
 E é a energia absorvida pelo material;
 E_0 é a energia total incidente.

Além de variar de material para material, este valor varia também com o ângulo de incidência do feixe, o comprimento de onda, e a temperatura do material. É importante entender que este parâmetro varia também ao longo do processo, sendo que habitualmente o material no estado de fusão ou vaporizado apresenta também uma maior capacidade de absorção, fazendo aumentar o coeficiente de acoplamento. (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Perreira, 1993)

A título de exemplo, um material que apresenta dificuldades relacionadas com as características referidas é o Alumínio, material que apresenta uma alta condutividade térmica além de um baixo coeficiente de acoplamento.

O feixe laser utilizado neste processo é virtualmente sempre utilizado em conjunto com um gás de assistência coaxial, que incidem no mesmo local da peça, trabalhando em conjunto para o corte. Este feixe composto pelo laser e pelo gás promove a fusão localizada do material, levando à formação de uma pequena quantidade de plasma localizada, que refletem parte da energia do feixe laser. Quando à superfície esta reflexão dificulta ligeiramente o corte, mas assim que o material fundido se encontra no interior do material, a reflexão da energia laser dá-se de encontro às paredes laterais da fenda de corte, aumento assim consideravelmente o coeficiente de acoplamento.

Deste modo dá-se a formação de uma camada de material fundido, que conforme é expulso o material em fusão pela parte inferior da chapa, o material contíguo a essa camada é fundido, dando-se assim o corte da matéria, Figura 6 - Interação do feixe laser com a matéria. Este fenómeno é de propagação da fenda de corte é o que leva ao aparecimento de estrias, devido a flutuações da temperatura e da dimensão da camada de material fundido. (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Perreira, 1993)

A temperatura máxima alcançada neste processo situa-se por vezes na zona de ebulição do material para espessuras menores, havendo também a vaporização de uma parte do material removido. Este valor de temperatura máxima diminui com o aumento da espessura, tornando-se cada vez mais difícil e grosseiro o corte do material, sendo que atualmente as espessuras para as quais se tende a optar por outro processo de corte por volta dos 20 a 30 mm

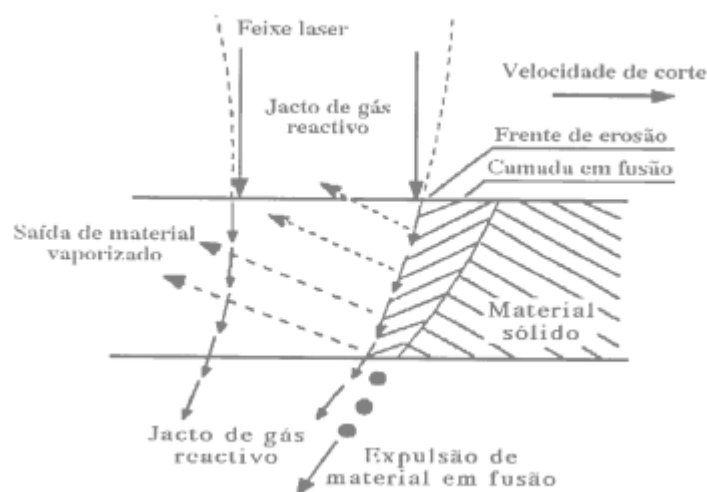


Figura 6 - Interação do feixe laser com a matéria (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Perreira, 1993)

2.4. Constituição de um aparelho de corte laser

Um aparelho de corte laser é constituído fundamentalmente por uma cabeça de corte, uma mesa de trabalho, um sistema de movimentação, um sistema de controlo e de refrigeração.

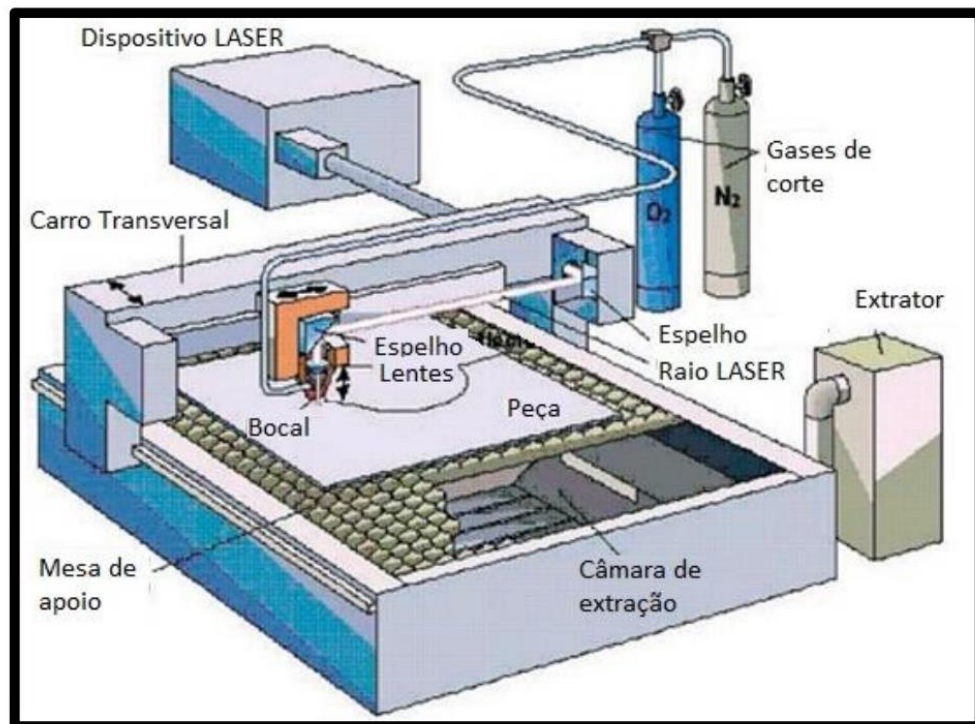


Figura 7 - Principais constituintes de um sistema laser (Dias, 2015)

2.4.1. Cabeça de corte

A cabeça de corte é constituída fundamentalmente por dois elementos: a lente ótica de focalização do laser e o sistema por onde é ejetado o gás de assistência ao corte.

O elemento de focalização tem a função de concentrar a potência do laser numa área tão reduzida quanto possível, regra geral localizada aproximadamente 1/3 da espessura, abaixo da superfície superior da chapa. (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Perreira, 1993)

O jato de gás produzido é muito importante para definir a atmosfera em que é feito o corte, podendo também assistir na remoção do material em certos casos, apresentando ainda uma proteção para os elementos mais sensíveis que constituem a cabeça do laser, dos gases e resíduos libertados na operação de corte.

2.4.2. Mesa de corte

A mesa de corte refere-se ao elemento do laser onde é colocado o material a cortar, podendo ou não haver sistemas de fixação do mesmo. Essa mesa possui normalmente o formato de grelha de modo a permitir a passagem dos gases utilizados no processo bem como a rebarba de corte produzida.

Em sistemas mais modernos é comum haver duas mesas, para que enquanto numa mesa o produto final do corte esteja a ser retirado, a outra esteja dentro do equipamento a ser cortada

2.4.3. Sistema de movimentação

Existem no mercado várias possibilidades de sistemas de movimentação para o corte laser. Desde cabeças móveis em X, Y, Z e ainda com rotação para superfícies de corte inclinadas, a mesas móveis e ainda a sistemas complexos de espelhos que permitem que a cabeça e a mesa se mantenham estacionários.

O aparelho em estudo apresenta um sistema de cabeça móvel, com possibilidade de movimentação nos eixos X e Y, como se pode ver na Figura 8.



Figura 8 - Cabeça, mesa e sistema de movimentação do laser em estudo

2.5. Principais tipos de lasers e aplicações

Atualmente, são principalmente utilizados na metalomecânica 3 tipos de laser: CO₂, Nd:YAG e fibra. Estes têm diferentes características, o que leva a que sejam utilizados para diferentes aplicações conforme seja mais adequado (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Pereira, 1993).

2.5.1. Tipos de Laser

Os tipos de laser mais utilizados atualmente são de CO₂, Nd:YAG, e fibra. Existem adicionalmente outros tipos de laser com utilizações menos comuns, como por exemplo o laser de rubi, ou lasers do domínio ultravioleta.

CO₂

Os lasers de CO₂ emitem um comprimento à volta de $\lambda=10,6 \mu\text{m}$ (infravermelho) tendo habitualmente potências até aos 5 kW.

São aparelhos muito utilizados no corte de materiais, sendo versáteis e apresentando características desejáveis ao nível do modo transversal, simetria, eficiência e qualidade de corte.

Nd: YAG

Estes lasers não costumam ultrapassar os 2 kW de potência, tendo um feixe característico de $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ (infravermelho).

Este comprimento de onda é um décimo do apresentado por laser de CO₂, resultando num diâmetro de foco menor na mesma proporção, resultando num trabalho mais preciso e delicado.

O menor comprimento de onda permite que o feixe laser não seja refletido pelo vidro, o que permite a utilização deste material para componentes óticos e resulta em alguma redução

de custos de produção. Esta transparência significa também que pode ser utilizada fibra ótica para guiamento do feixe laser, porém com uma forte degradação do modo transversal.

A potência apresentada por estes equipamentos é menor que a apresentada por laser de CO₂, sendo que a partir de cerca de 1 kW estes aparelhos apenas podem ser utilizados em regime pulsado, sendo este a sua principal desvantagem (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Perreira, 1993).

Fibra

Os Lasers de fibra ótica podem ser considerados como um tipo particular, apesar de incluído nos de estado sólido, devido a produzirem um feixe muito mais pequeno e preciso, sendo também eletricamente mais eficientes. Nestes lasers o meio ativo onde encontramos os iões é constituído por fibra ótica. (Dahotre & Harimkar, 2007)

Outros Lasers

Existem ainda lasers que funcionam no domínio ultravioleta, produzindo feixes que promovem a destruição das ligações químicas da matéria, mas tendo uma pequena penetração, resultando numa ablação muito superficial da matéria, conseguindo apenas o corte de chapas muito finas.

Outro laser em desenvolvimento é o laser de monóxido de carbono, que funciona em comprimentos de onda a volta de 5 μm e tendo um rendimento elevado, mas a natureza altamente tóxica do seu meio ativo é um obstáculo impossível de ignorar e difícil de contornar. (Edinburgh Instruments, 2022)

2.5.2 Tipos de Matéria-Prima

O processo de corte laser é capaz de cortar uma vasta gama de materiais, desde metais, a polímeros e cerâmicos. O seu funcionamento e interação com o material varia bastante em relação ao material, e essa interação deve ser sempre estudada e considerada, pois pode representar cuidados a ter, como é o caso de alguns fumos provenientes do corte de certos polímeros.

Aço macio

Estes materiais comportam a maioria do processamento utilizando corte laser, habitualmente assistido por oxigénio. É um material relativamente fácil de cortar, não apresentando refletividade nem condução de calor excessiva, reagindo ainda exotermicamente com o oxigénio, quando utilizado como gás de assistência, o que promove ainda mais o corte do material e leva a um bom acabamento de corte e bons produtos finais

Aço inox

O aço inoxidável, além de mais refletivo que os aços comuns, apresenta uma alta concentração de Crómio (10% a 20%), interagindo de forma muito diferente com o oxigénio.

A reação de oxidação do crómio é também exotérmica, como no caso do ferro, mas o produto dessa reação é uma camada muito impermeável à passagem do gás, o que dificulta a oxidação de camadas subsequentes de material. Isto resulta em maior dificuldade de fusão e expulsão do material, o que se traduz em menores velocidades de corte, maior pressão do gás de assistência, ou utilização de um gás mais nobre. A peça final tem mais propensão a apresentar um ligeiro acumular de material na face inferior.

Metais não ferrosos

Estes materiais apresentam uma dificuldade acrescida relativamente ao corte de aço, devido à muito alta refletividade, condutividade térmica do material e formação de filmes de óxido resistentes à passagem do gás de assistência.

Devido a estas características o corte destes materiais, como por exemplo no corte de alumínio, apresenta uma dificuldade muito alta na perfuração inicial, havendo o risco elevado de refletir o laser para o interior da cabeça do aparelho e danificar a máquina.

Para colmatar isto, é necessário aumentar a absorção superficial do material, aumentando a rugosidade da mesma, através de processos de tratamento (anodização), ou pintando o material, a título de exemplo. É também benéfico utilizar lasers com comprimentos de onda menores uma vez que a absorção dos materiais a estes tende a ser menor.

Existem também metais não ferrosos que não têm estes problemas, como é o caso do titânio, em que a reação exotérmica de oxidação permite o corte com velocidades ainda superiores ao aço macio, mas necessita de processos posteriores de remoção desta camada para manter as boas propriedades mecânicas pelas quais é conhecido. (Caristan, 2004)

Materiais não metálicos

Os materiais não metálicos são normalmente cortados recorrendo a um gás inerte ou ar como gás de assistência, e apresentam boas absorções do feixe laser.

Por um lado, os materiais orgânicos tendem a absorver muito facilmente a energia do feixe, podendo apresentar fusão, decomposição química, vaporização ou mesmo uma combinação destes. No corte de alguns materiais orgânicos, a precaução tida com a exaustão de fumos e produtos é de extrema maior importância, tal como acontece no corte de PVC, do qual resultam vapores de ácido clorídrico. O corte resultante da decomposição química apresenta um bordo escurecido que é resultante da carbonização parcial do material. Por exemplo, a vaporização é vista no caso do corte de acrílico (PMMA), resultando num bordo de muito alta qualidade e um acabamento transparente.

Por outro lado, no caso de materiais inorgânicos, estes apresentam uma maior resistência ao aumento de temperatura, pelo que é comum atingirem-se temperaturas tais que a sua dilatação é considerável. No caso das cerâmicas em que o coeficiente de dilatação é baixo, este não é um problema, mas no caso do vidro este parâmetro resulta muitas vezes em tensões que se manifestam em fraturas no material. Estes materiais não orgânicos são melhores cortados empregando técnicas como o corte evaporativo, utilizando uma elevada intensidade de laser, ou o corte por fratura, em que são feitos vários furos ao longo da linha de corte desejada, semelhante a um picotado, procedendo-se posteriormente a uma fratura controlada, em que a quebra do material vai seguir esta linha de menor esforço. (Dahotre & Harimkar, 2007)

2.5.3. Aplicações

Estes aparelhos têm diversas utilizações, derivado da sua capacidade de trabalho com muitos tipos de materiais e da facilidade de produção de peças complexas. As suas utilizações não se ficam porem pelo processamento de materiais.

No ramo médico a utilização de lasers para efetuar pequenas incisões é bastante interessante devido à cauterização imediata do corte. O tratamento LASIK (Laser-assisted in situ keratomileusis), processo cada vez mais comum, recorre também à utilização de feixes laser para restauração da capacidade ocular.

No ramo militar os lasers são muito utilizados para complementar armas, seja com feixes para melhorar a precisão através da sua projeção para indicar onde a arma está apontada, seja para guiar armas equipadas com detetores desses mesmos feixes.

Contudo estes aparelhos não encontram utilizações apenas em ramos sofisticados, estando presentes em diversos objetos muito comuns, como caixas de supermercados e leitores de CD, ambos recorrendo a lasers para o seu funcionamento. (Hitz, Ewing, & Hecht, 2001)

2.6. Considerações econômicas

É importante considerar que o processo de conversão energética num laser é consideravelmente pobre, sendo a sua eficiência sempre inferior a 15%, situando-se por vezes na zona dos 1% a 3%. O benefício da utilização destes mecanismos é a facilidade com que a energia é fornecida e manipulada, tornando assim o laser numa ferramenta de corte interessante. (Appelt, Duarte, Fernandes, da Rocha, & Perreira, 1993)

Os lasers para processamento de materiais são habitualmente os de CO₂, mas havendo uma grande diferença em termos de utilização, processamento e resultados, o fator preço não deve ser o principal impulsionador da escolha, mas sim os materiais e a precisão e qualidade finais necessárias. A eficiência desejada é também importante, pois resulta na necessidade de adquirir meios que permitam a utilização do laser nas suas plenas capacidades, como por exemplo, sistemas de carga e descarga de material e sistemas CNC e CAD.

Adicionalmente ao valor do laser, é importante considerar que ele carece de consumíveis, como o gás de assistência, e que pode exigir manutenção considerável, derivado da sua constituição complexa e dos vários elementos indispensáveis à manutenção da qualidade de funcionamento.

2.7. Vantagens

Este processo apresenta velocidades de corte muito elevadas, um bom acabamento, boa repetibilidade e a possibilidade de cortar materiais com formas muito complexas.

O corte laser tem como principais concorrentes os processos de maquinação, corte por plasma, corte por jato de água e oxicorte.

Relativamente à maquinação o corte laser apresenta uma redução muito significativa do tempo de set up, bem como uma maior fiabilidade, repetibilidade, e capacidade de produzir peças com maior complexidade.

Quanto aos processos de corte por plasma e oxicorte, a vantagem da utilização de um feixe laser resulta da alta concentração desse mesmo feixe, o que leva a menos deformação e menos alterações resultantes de variações térmicas.

Quando comparado com o corte por jato de água, o corte laser apresenta uma grande vantagem na possibilidade de utilização de oxigénio como gás de assistência ao corte. Este gás produz uma reação fortemente exotérmica quando em contacto com o ferro, o que fornece grande parte da energia necessária ao corte do material.

A utilização de software adequado aliada a este processo permite ainda uma eficiência e poupança de material bastante elevada relativamente a outros processos, oferecendo a possibilidade de cortar peças muito diferentes na mesma chapa base, organizando-as de forma a desperdiçar o mínimo possível de material.

Este processo não resulta de interações mecânicas do material, pelo que é possível cortar materiais com durezas muito elevadas com muito maior facilidade, e não apresenta rebarbas na superfície de corte.

Adicionalmente, recorrendo a software adequado, este processo pode ser programado de modo a ter uma grande eficiência e não necessita de uma ação ativa de um operador, a não ser para retirar os materiais finais do corte da mesa.

2.8. Defeitos característicos

Este processo produtivo, tal como muitos outros, possui características inerentes que em alguns casos se podem tornar mais ou menos desejáveis.

Dada a forma como o método visa modificar o formato da matéria-prima, esta apresenta sinais da influência de altas temperaturas nas superfícies de corte. Nomeadamente, é possível visualizar, em cortes menos perfeitos, o aparecimento de rebarba de corte e de estrias. Existe também uma zona afetada pelo calor, mas as suas visualização e análise são mais complexas.

De notar que um bom corte é caracterizado pela ausência das estrias e rebarba acima mencionadas, bem como uma zona afetada pelo calor da menor dimensão possível. A peça final deve também ser dotada de arestas vivas e a face de corte reta e o mais vertical possível.

Estrias

Este defeito é um dos mais importantes a ser controlado, já que é imprescindível despende muito tempo para atingir um nível de acabamento aceitável na peça. É caracterizado por linhas verticais com relativa periodicidade ao longo da face de corte, periodicidade esta que tem como principal influência a velocidade de corte utilizada no processo.

Rebarba de Corte

A acumulação de rebarba de corte, tal como as estrias, é de uma grande importância na qualidade final da peça. Esse material localiza-se na parte inferior da peça, apresentando formatos aleatórios e característicos de um escoamento que solidificou. Isto leva a que este material seja sempre removido por processos manuais de acabamento, conduzindo a a um grande gasto de tempo pelo operador. O controlo deste defeito requer um bom entendimento do processo de corte laser e dos parâmetros utilizados, sendo o aumento da velocidade de corte o principal fator no aparecimento de acumulação de rebarba de corte.

Zona afetada pelo calor

O corte laser, bem como todos os métodos de tratamento de materiais que envolvem a utilização de elevadas temperaturas de modo a atingir o seu ponto de fusão, criam uma zona de material que sofreu uma elevada variação de temperatura, capaz de alterar as propriedades físicas do material sem alterar as suas propriedades geométricas ou aparência. A parte da peça que sofre esta influência é chamada de “Heat Affected Zone” ou “HAZ”, e pode sofrer alterações críticas da microestrutura e consequentemente das propriedades mecânicas, sendo por vezes muito impercetível este problema sem submeter a peça a testes complexos.

A utilização de peças que tenham sido submetidas a condições críticas na HAZ pode levar a falhas inesperadas, antes do ponto crítico do material.

2.8. Conclusões

Considerando todas as características e especificidades mencionadas, o corte laser tem-se vindo a cimentar como um pilar e necessidade na indústria, oferecendo características muito desejáveis para o processamento de materiais.

Nomeadamente, o corte laser apresenta uma fiabilidade e repetibilidade muito alta, podendo produzir um grande número de peças iguais com desvios de ordem muito reduzida com extrema facilidade. Existe também uma grande versatilidade de formas que podem ser produzidas e materiais que podem ser utilizados, bem como uma grande eficiência relativamente a outros processos.

Além disso, evidencia-se a simplicidade e facilidade de manipulação deste processo numa produção que tenha de se adaptar continuamente, tanto em termos de materiais primas muito variadas como em formatos e produtos finais.

O corte laser tem-se, por isso, consolidado como um processo indispensável no processamento de metais, consideradas as suas capacidades e possibilidades, sendo cada vez maior a gama de utilizações possíveis e a sua presença em ambientes de fábrica.

Capítulo 3 - Robust Design - Método de Taguchi

Neste capítulo vai ser apresentar o método de Taguchi, nomeadamente a escolha da tabela e dos parâmetros em estudo, planeamento de ensaios, e a análise dos resultados obtidos.

3.1. Introdução

O Japão é reconhecido mundialmente pelos métodos de gestão de produção e de qualidade, sendo que esta responsabilidade é considerada como de todos os engenheiros e órgãos de gestão.

O Dr. Genichi Taguchi desenvolveu um método de controlo de qualidade conhecido como “Quality Engineering” ou “Robust Design”. Este método tem o objetivo de apresentar a melhor seleção de características para solucionar um determinado problema, tendo em conta as necessidades do consumidor e todos os custos inerentes à produção dessa solução. As soluções desenvolvidas pelos métodos de Taguchi são tendencialmente escolhidas pela indústria, devido a ser altamente eficientes e focados no aspeto monetário do processo, ao mesmo tempo que não requerem operadores excecionalmente proficientes em termos estatísticos.

Este método baseia-se num plano de experiências muito bem definido, segundo matrizes ortogonais já existentes, de modo a maximizar a quantidade de informação obtida sobre um determinado processo, ao mesmo tempo que é minimizado o número de ensaios necessários. (Yusoff, 2008)

3.2. Objetivos

Os propósitos principais deste método são:

- Identificar quais os parâmetros que apresentam uma maior importância no resultado final e que devem ser considerados e analisados com maior cuidado;
- Fazer ligações entre a variação desses parâmetros e o resultado final, definindo uma gama mais pequena de valores onde se encontra o ponto ótimo;
- Definir que parâmetros têm uma influência negligenciável no resultado final, de modo a diminuirmos o número de parâmetros, tendo assim maior margem para aumentar os valores estudados nos parâmetros com maior influência

Este método estuda apenas empiricamente a influência dos valores estudados, não sendo apresentado um estudo dos motivos físicos para estas relações. O estudo posterior do motivo das relações estudadas pode também ser interessante como complemento de modo a ter um maior entendimento do processo.

3.3. Procedimento

Segundo Genichi Taguchi há um processo recomendado e um conjunto de passos a seguir. Sendo este estudo baseado nos seus ensinamentos, os métodos utilizados seguiram o mais fielmente possível as recomendações de Taguchi. (Taguchi & Konishi, 1987)

1. Definição do problema

É importante determinar com clareza o problema.

2. Determinação do objetivo

Decidir qual característica de saída a ser analisada e o seu método de medição.

3. Agrupamento de parâmetros

Dividir os parâmetros em 2 grupos, fatores de controlo e de ruído, e definir os seus níveis.

4. Plano de experiências

Uma das partes mais fundamentais de todo o processo passa pela seleção da matriz ortogonal de Taguchi apropriada e a atribuição correta dos parâmetros às colunas da matriz ortogonal.

5. Execução do plano de experiências

6. Análise de dados

Proceder à análise dos resultados obtidos com recurso a métodos estatísticos, como por exemplo a análise de variâncias (ANOVA) e análise de médias, obtendo gráficos que representem a influência dos parâmetros em estudo.

7. Interpretação de resultados

Analisar criticamente os gráficos e valores obtidos, chegando a uma previsão de valores ótimos para cada parâmetro.

8. Teste de confirmação

É fulcral efetuar sempre um teste de confirmação. A análise estatística tem de ser sempre analisada criticamente e testes de confirmação são imprescindíveis para validar os estudos feitos.

3.4. Seleção da matriz e parâmetros de controle

“Os fatores de controle são os parâmetros que delineiam um conceito ou tecnologia que precisamos de otimizar. O estudo da otimização de parâmetros deve ser usado como uma ferramenta fundamental para encontrar o seu conjunto ótimo. (Fowlkes & Creveling, 1995)

Num grande número de problemas atuais não existe uma variável única que conduza a um resultado. Existe um grande conjunto de parâmetros, com menor e maior influência, que dão origem ao resultado final através de um grande número de interações.

Numa tentativa de melhorar a qualidade do resultado final, seja em tempo, qualidade ou custo, temos muitas vezes à nossa disponibilidade um grande número de fatores passíveis de ser mudados, cujas influências podem ser estudadas empiricamente.

Estes estudos podem, porém, ser bastante morosos e atingir custos avultados caso se testem todos as possíveis combinações para todos os parâmetros. As matrizes ortogonais utilizadas pelo Dr. Taguchi têm, por convenção, o formato $L_a(b^c)$, onde:

a – Número de ensaios

b – Número de níveis de cada fator

c – Número de fatores

Por exemplo, para um estudo de 3 fatores com 3 níveis, um caso bastante simples, seriam necessários realizar $3^3 = 27$ ensaios, para verificar todas as combinações possíveis (método do fatorial completo)

Num esforço de reduzir esse número de ensaios é muito benéfico utilizar o método aqui apresentado, fazendo uma seleção dos parâmetros e níveis que devem ser ensaiados. Após esta seleção é construída uma matriz onde todos estes valores estão inseridos e que nos dará o plano de experiências a executar.

Desta forma conseguimos reduzir drasticamente o número de ensaios a ser efetuados. Por exemplo, utilizando a matriz $L_8(2^7)$ para 7 parâmetros com 2 níveis passamos de $2^7 = 128$ ensaios (fatorial completo) para apenas 8 ensaios, utilizando uma matriz saturada com 7 fatores, assumindo um nível baixo de interações. (Fowlkes & Creveling, 1995)

3.5. Análise de resultados

No seguimento do levantamento de resultados, é necessário proceder à correta análise dos mesmos, de maneira a quantificar a influência dos fatores na resposta em estudo, fazendo uma análise de variância (ANOVA – Analysis of variance), e uma análise de médias (análise de efeitos médios principais de cada fator (parâmetro) e de interacção entre fatores.

Esta análise, apresentada aqui de forma sucinta, pode ser feita utilizando software computacional disponibilizado pela FEUP (Minitab), e vai ser aplicada de forma mais prática no capítulo da análise do caso experimental.

Explicação em seguida segundo o artigo “O Método de Taguchi no Planeamento e Análise de Operações de Soldadura” publicado pelos professores Miguel Augusto Vigário de Figueiredo e António Augusto Fernandes na revista Ingenium da ordem dos engenheiros em 1996.

Soma de quadrados

O primeiro passo é, calcular a soma dos quadrados de cada parâmetro e de cada interação analisada

$$SQ_A = \sum_{i=1}^{K_A} n_i (\bar{A}_i - T)^2 \quad (3.1)$$

Onde:

SQ_A , é a soma de quadrados do fator A;
 K_A é o número de níveis do fator A;
 n_{Ai} é o número de observações do fator A no nível i;
 $\bar{A}_i$ é a média das observações do fator A no nível i;
 T é a média de todas as observações.

De seguida, do mesmo modo, mas utilizando o resultado de todas as observações, é calculada a variação total, ou soma de quadrados total.

A diferença entre a soma de quadrados total e o somatório da soma de quadrados de cada parâmetro e interação analisados dá-nos a soma de quadrados do erro.

Teste F

Utilizando o valor da soma de quadrados e o número de graus de liberdade de um parâmetro (n° graus de liberdade = n° níveis – 1) podemos calcular os desvios quadráticos médios (estimadores da variância).

$$DQM_A = \frac{SQ_A}{gl_A} \quad (3.2)$$

Onde:

DQMA é o desvio quadrático médio do fator A;
SQA é a soma de quadrados do fator A;
glA é os graus de liberdade do fator A.

E de seguida calculamos o valor do Rácio F (exemplo para o fator: A)

$$F_A = \frac{DQM_A}{DQM_{erro}} \quad (3.3)$$

Em que:

FA é o valor do rácio F para o fator A;
DQMA é o desvio quadrático médio do fator A;
DQMerro é o desvio quadrático médio do erro.

Para o teste F, se o valor F calculado for maior do que o obtido na tabela estatística de valores F para os graus de liberdade do numerador (graus liberdade do fator A) e do denominador (graus de liberdade do erro) do rácio F e para um dado nível significância α , que é o risco (probabilidade) de aceitar que o fator ou a interação são significativos sendo eles falsos, normalmente 5%, então esse fator é significativo em termos estatísticos para um nível de confiança de 95%.

Contribuição

Por fim podemos calcular a contribuição (P) que cada parâmetro tem na variação de resultados total observada na experiência (exemplo parâmetro: A)

$$SQ''_A = SQ_A - (DQM_{erro} * gl_A) \quad (3.4)$$

$$P = \frac{SQ''_A}{SQ_T} * 100 \quad (3.5)$$

Em que:

SQ''A é a soma de quadrados do fator A corrigida;
 SQA é a soma de quadrados do fator A;
 SQT é a soma de quadrados total;
 DQMerro é o desvio quadrático médio do erro;
 glA é os graus de liberdade do fator A;
 P é o valor da contribuição.

(Figueiredo, Fernandes, & Silva, Correlation analysis of MAG robotized welding parameters by the Taguchi technique, 2010)

Capítulo 4 - Caso prático

Nesta dissertação foi utilizado um laser NUKON NF PRO 620, um laser de fibra com 6 kW de potência, e todas as referências e estudos feitos segundo o manual, versão U2019 V06.1 de novembro de 2019, como representado na Figura 9.



Figura 9 - Laser Nukon NF-PRO-620 6kW (Imagem retirada do website da marca)

Ao longo dos anos, a escolha dos parâmetros a utilizar nesta máquina foi definida através de métodos empíricos, por tentativa e erro. Tendo-se chegado a uma qualidade de corte aceitável para a empresa, estas mudanças sucessivas de parâmetros foram praticamente colocadas em segundo plano, pois poderiam refletir-se em uma perda de produtividade.

Isto levou à questão “Estamos a usar todas as capacidades da máquina?”

Se a resposta a isto for não, podemos estar a trabalhar a um nível subótimo, o que poderá estar a causar custos em maquinações subsequentes e até peças que não podem ser utilizadas, tendo de ser cortadas de novo.

4.1. Planeamento

4.1.1. Estudo dos parâmetros da máquina

Uma parte de elevada importância nesta dissertação foi a escolha dos parâmetros a variar e a sua gama, bem como o nível dos parâmetros que se consideraram constantes ao longo dos testes. Para esta escolha foi analisado o manual de operação da máquina e foram considerados conselhos dos operadores responsáveis pela operação da máquina.

Potência

Este parâmetro é umas das principais características de um laser, estando o respetivo valor muitas vezes inserido na designação comercial da máquina.

Pelos conhecimentos do operador, a utilização de uma maior potência possibilita o corte de materiais mais espessos e com uma velocidade maior, mas exagerando este valor podemos ter um corte com remoção excessiva de material e arestas boleadas. O aumento deste parâmetro leva também ao aumento da largura da fenda de corte (kerf).

Laser Mode

Tipo de onda utilizado. Esta pode ser uma onda contínua (CW), em que o laser emite um feixe contínuo, ou em pulso (Pulse), em que a energia do feixe laser é emitida em curtas rajadas. Atualmente o mercado na área do corte de materiais é muito mais abundante em equipamentos de onda contínua.

Frequência

Número de pulsos que o laser emite por segundo, medido em Hertz;

Duty

Porcentagem de tempo em que o laser se encontra ativo por pulso. De notar que um feixe contínuo corresponde a um duty de 100%;

Velocidade de Corte

Velocidade de corte do laser, medida em mm por minuto. Este parâmetro tem uma importância além da qualidade, pois dita a produtividade da máquina, sendo por vezes escolhidas velocidades maiores em detrimento da qualidade de corte.

Gás de Assistência

Gás de assistência utilizado para o corte, normalmente Oxigénio, Azoto, ou mesmo o ar atmosférico, podendo em alguns casos ser utilizado um gás mais nobre como Árgon.

Oxigénio é o mais comum para o corte de aço e a reação entre o gás e o metal liberta energia adicional que auxilia o processo de corte. No corte com este gás 60 a 70% da energia é fornecida pela reação de oxidação, contribuindo o laser com apenas 30 a 40% da energia total. (Dahotre & Harimkar, 2007)

Azoto é um gás de corte a maior pressão, muito utilizado para aço inoxidável ou alumínio. Nestes casos o material é derretido apenas pela energia do laser, sendo depois empurrado para fora da zona de corte pela energia cinética do gás;

Pressão

Pressão do gás utilizado no corte, medida em bar;

Power Level

Parâmetro apenas presente no software da máquina, sendo que não se encontra ativo neste modelo;

Altura de Corte

Distância em mm entre a ponta do bocal do laser e a face superior da chapa. A referência para este valor é tirada da chapa por um sensor capacitativo, sem ser necessário haver contacto;

Focagem

Distância entre o ponto de focagem do feixe laser e a superfície superior da chapa, medido em mm. Valores positivos encontram-se acima da chapa, enquanto valores negativos se encontram dentro ou abaixo da chapa.

Este valor é bastante importante na forma com o feixe laser ataca a chapa. Devido ao formato que o mesmo apresenta, a colocação do ponto de focagem muito alto ou muito baixo, podem levar a uma inclinação na superfície de corte.

É também um fator importante a considerar devido a ser o ponto em que existe o máximo de concentração de energia do laser.

Lead-In Feed Override

Relação entre a velocidade do laser em corte e a velocidade do laser em aproximação;

Lead-In Lenght

Distância entre a superfície superior da chapa e a ponta do bocal do laser, quando este se movimenta sem estar em corte, medida em mm;

Acceleration Override

Aceleração do laser até atingir a velocidade de corte desejada;

Lead-In Delay

Tempo que o laser espera entre a aproximação e o início do corte, em segundos;

Distance on Delay

Principalmente em espessuras muito elevadas, antes de se iniciar o corte, é necessário fazer incidir o laser num ponto exterior à peça desejada até este perfurar completamente a chapa. Este processo chama-se pierce, ou pré-pierce e resulta num furo circular, mais largo do que a largura de corte normal do laser. O pierce é o primeiro passo do corte laser, mas funciona de maneira bastante diferente do processo de corte. (Hashemzadeh, Powell, & Voissey, 2014)

Esta opção permite que, após um certo tempo, o controlo de altura seja bloqueado durante a opção de pierce, para que a distância à chapa se mantenha constante.

Kerf

Largura, em mm, de material removido da peça durante o corte;

Enable Smooth Lead-In

Opção utilizada para tornar as variações de altura do laser entre a aproximação e o corte mais suaves.

Cutting BPP

Beam Parameter Product é o produto entre o raio do feixe no foco e o meio ângulo da divergência. Este parâmetro apenas pode ser alterado pelo departamento técnico da NUKON.

4.1.2. Testes e avaliações

De modo a tirar o maior número de conclusões e com a maior fiabilidade possível, os testes e avaliações a colocar em prática foram conduzidos com muita atenção, sendo considerados os problemas mais recorrentes em peças cortadas nesta máquina.

Através de partilhas de conhecimento com os trabalhadores que contactam com as peças no processo seguinte ao corte, nomeadamente maquinaria, soldadura, e pintura, foi levantado conhecimento de alguns problemas recorrentes que os mesmos encontraram no passado, nomeadamente:

- Rugosidade na face de corte muito alta;
- Face de corte não vertical, principalmente em chapas muito espessas (>15mm);

Isto leva a que seja necessário proceder a trabalhos adicionais, como rebarbar ou fresar algumas peças, soldar entalhes ou utilizar uma grande quantidade de material adicionado, bem como cortar de novo peças que já não seja possível maquinar para medidas admissíveis para o projeto.

Desta forma foi decidido que, para obter a melhor relação de propriedades de corte, seria necessário analisar:

- As dimensões gerais;
- A rugosidade;
- A verticalidade da face de corte;

Para estes testes temos disponíveis variados calibres e micrómetros no departamento de metrologia da empresa, sendo que também foi disponibilizado um rugosímetro pelas oficinas da FEUP.

Dimensões gerais

Para a medição das dimensões gerais foi utilizado um micrómetro de exterior, como se pode ver na Figura 10, com uma gama adequada à medição. Foram medidas apenas as dimensões do plano XY, sendo que um desvio da espessura da chapa não seria influência do corte, mas sim do processo de fabrico da própria chapa.

Atualmente o departamento responsável da empresa emprega uma tolerância máxima de 0,2 mm para este processo.



Figura 10 - Medição do comprimento do provete

Verticalidade da face de corte

A verticalidade da face de corte foi apenas analisada de forma visual, visto que tende a existir uma correlação entre a verticalidade da face de corte e a rugosidade da mesma, sendo esta última mais facilmente mensurável e um melhor indicador geral de qualidade na indústria metalomecânica. Adicionalmente, este é um problema que se dá em chapas de espessura mais elevada, e este estudo focou-se em entender o comportamento do corte para uma gama de espessuras mais baixa.

Rugosidade

Dos vários valores de rugosidade que podem ser medidos, para esta dissertação vamos ter em conta a rugosidade média aritmética (R_a) e a média das alturas máximas do perfil de rugosidade (R_z).

O valor de R_a é a média aritmética dos valores absolutos da ordenada Z , como exposto na Equação (4.1), medidos num comprimento l_r . Este parâmetro é extremamente comum na indústria e é muito bom para analisar superfícies maquinadas por processos bem orientados e em que a mudança da rugosidade acontece de forma gradual em toda a superfície. Por exemplo em processos de maquinação em que existe um aumento da rugosidade devido ao desgaste das ferramentas de corte.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int |Z(x)| dx \quad (4.1)$$

Onde:

R_a é a rugosidade média aritmética;
 $Z(x)$ é a altura do perfil de rugosidades no ponto x .

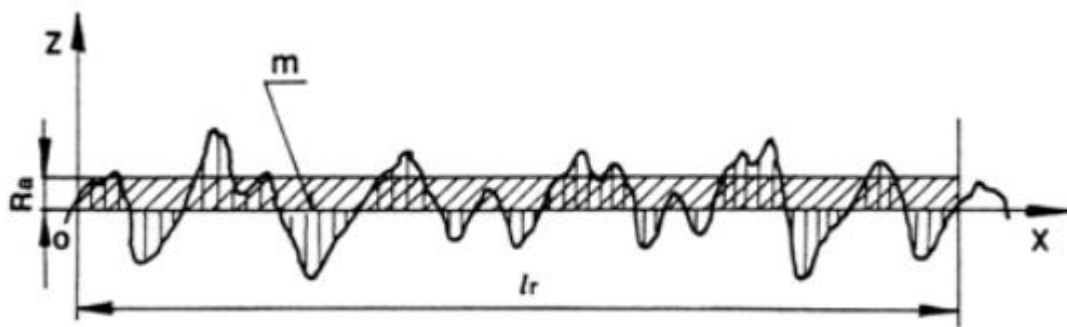


Figura 11 - Esquematização da medição de R_a numa superfície (Morais, 2006)

Enquanto o valor de R_a é muito pouco sensível a picos e vales extremos, pois estes valores atípicos na peça são diluídos pelo resto do comprimento analisado, o mesmo não acontece no valor de R_z .

R_z é a média aritmética das alturas máximas (4.2), medidas em cinco comprimentos consecutivos. Este parâmetro é mais sensível a mudanças no acabamento superficial e é muito útil no controlo de um processo produtivo.

$$R_z = \frac{(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)}{5} \quad (4.2)$$

Onde:

R_z é a média aritmética das alturas máximas;

Z_i é a diferença máxima entre alturas de dois pontos do intervalo de medição i ;

(Morais, 2006)

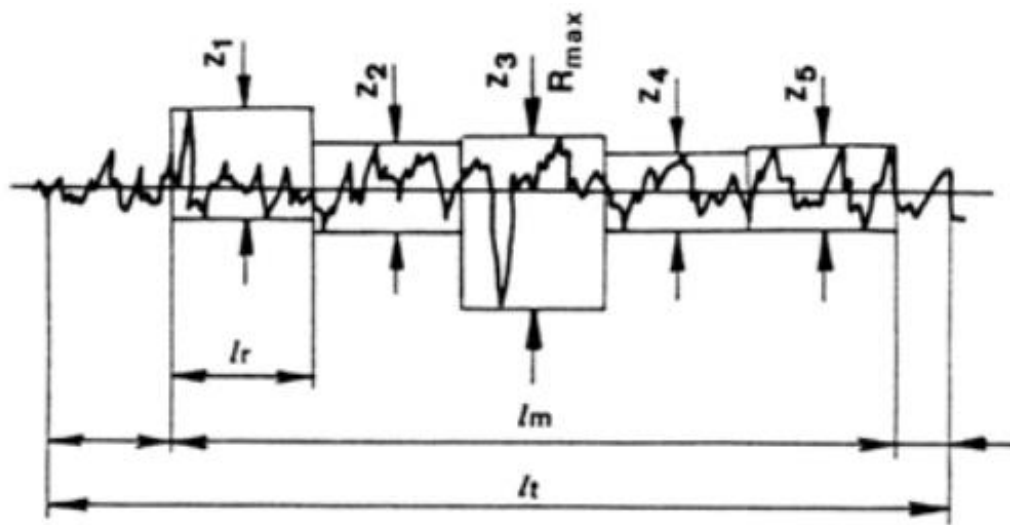


Figura 12 - Esquemática da medição de R_z numa superfície (Morais, 2006)

Estes valores são medidos com recurso de um rugosímetro, como se pode ver na Figura 13, disponibilizado pelas oficinas da FEUP.



Figura 13 - Medição da rugosidade da face de corte de um provete

4.1.3. Definição do provete de estudo

De forma a ser possível proceder a todas as avaliações e estudos apresentados no ponto anterior foi desenhado um provete adequado.

Foi decidido que seria importante o provete apresentar um corte longitudinal, mas que não atravessasse por completo a peça, para que fosse possível analisar a largura e forma do feixe laser (A), bem como a forma das faces que se formaram durante do corte.

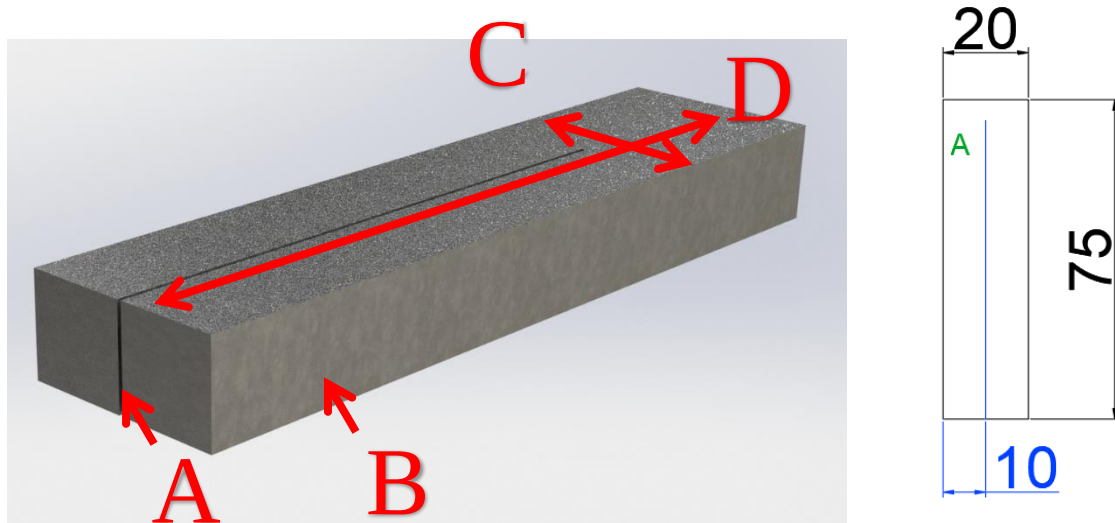


Figura 14 - Representação computadorizada do provete de teste

Com o provete representado na Figura 14 e Figura 15 será possível analisar, primeiramente, as dimensões gerais ($C + D$), que se espera que sejam cumpridas para todos os parâmetros. De seguida, conduziu-se uma análise da rugosidade da superfície (B), com recurso a um rugosímetro, sendo esta a análise mais importante da dissertação. Por último, será feita também uma análise visual da forma do corte (A).



Figura 15 - Exemplo de provete final

4.2. Ensaio nº 1

Neste primeiro ensaio foram analisados os valores correntes dos parâmetros para corte de chapa de aço ST-37, com 8mm de espessura utilizados atualmente pela empresa, para corte com oxigênio e com azoto, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores utilizados atualmente pela empresa para corte de chapas de aço ST-37 com 8 mm

Parâmetro	Corte a Oxigênio	Corte a Azoto
Potência [W]	5200	6000
Laser Mode	Continuous Wave	Continuous Wave
Frequência [Hz]	1000	1000
Duty [%]	100	100
Velocidade de Corte [mm/s]	2250	2150
Pressão [bar]	0.7	15
Altura de Corte [mm]	1	1
Foco [mm]	3.5	-4.2
Lead-In Feed Override	70	70
Lead-In Length [mm]	1	3
Acceleration Override [%]	50	60
Lead-In Delay [s]	0.02	0
Distance on Delay [mm]	10	100
Kerf [mm]	0.24	0.17
Nozzle diameter [mm]	1.2	3

4.2.1. Matriz de Taguchi

A implementação do método de Taguchi neste primeiro ensaio passou pela escolha de uma matriz, neste caso a L18 (2^1) (3^7). Esta matriz permite o estudo de 7 parâmetros com 3 níveis, e 1 parâmetro com 2 níveis.

Após leitura do manual e comunicação com o engenheiro responsável pelo laser, foram definidos quais os parâmetros a ser variados neste estudo e os seus níveis, que são apresentados de seguida:

- Potência [Watts]: 5000; 5500; 6000
- Frequência [Hertz]: 500; 1000; 2000
- Duty [%]: 80; 90; 100
- Velocidade corte [mm/s]: 2250; 2750; 3250
- Gás: Oxigénio [O₂]; Azoto [N₂]
- Pressão [bar]: 1; 8; 15
- Foco [mm]: -3.5; 0; 3.5
- Diâmetro bocal [mm]: 1.2; 2.0; 3.0

Substituindo estes parâmetros na matriz de Taguchi escolhida, apresentada no anexo A, obtemos um plano de experiências com 18 ensaios com os parâmetros que devem ser definidos em cada ensaio, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de Taguchi em tabela L18 para 1º Ensaio

Ensaio	Gás	Potência	Frequência	Duty	Velocidade corte	Pressão	Foco	Diâmetro do Bocal
1	O2	5000	500	80	2250	1	-3.5	1.2
2	O2	5000	1000	90	2750	8	0	2.0
3	O2	5000	2000	100	3250	15	3.5	3.0
4	O2	5500	500	80	2750	8	3.5	3.0
5	O2	5500	1000	90	3250	15	-3.5	1.2
6	O2	5500	2000	100	2250	1	0	2.0
7	O2	6000	500	90	2250	15	0	3.0
8	O2	6000	1000	100	2750	1	3	1.2
9	O2	6000	2000	80	3250	8	-3.5	2.0
10	N2	5000	500	100	3250	8	0	1.2
11	N2	5000	1000	80	2250	15	3.5	2.0
12	N2	5000	2000	90	2750	1	-3.5	3.0
13	N2	5500	500	90	3250	1	3.5	2.0
14	N2	5500	1000	100	2250	8	-3.5	3.0
15	N2	5500	2000	80	2750	15	0	1.2
16	N2	6000	500	100	2750	15	-3.5	2.0
17	N2	6000	1000	80	3250	1	0	3.0
18	N2	6000	2000	90	2250	8	3.5	1.2

A par destes parâmetros é necessário também definir os níveis em que serão colocados os parâmetros que não se irão variar. Alguns são standard da máquina e só podem ser alterados pela empresa que fabricou o laser, alguns foram sendo mantidos constantes, e esperamos que tenham menos influência na peça final. Estes parâmetros são:

- Laser Mode: Onda contínua [CW]
- Power Lever: 0
- Altura de Corte [mm]: 1
- Lead-In Feed Override [%]: 70
- Lead-In Length [mm]: 1
- Acceleration Override [%]: 50
- Lead-In Delay [s]: 10
- Kerf [mm]: 0.24
- Enable smooth Lead-In: Disabled
- Cutting BPP: 0
- Nozzle Type: Single

Feita toda a planificação dos ensaios, procedemos ao corte dos provetes. Para resultados mais fidedignos, todas as peças foram cortadas no mesmo retalho e pelo mesmo operador, tendo a máquina estado em utilização previamente, de modo a obter as condições mais estáveis possível.

4.2.2. Resultados

Seria expectável alguns parâmetros não terem capacidade para efetuar o corte da peça, no entanto isto sucedeu-se para grande parte dos provetes. Isto levou a uma mudança nas análises a ser efetuados, sendo que não se poderiam fazer as medições planeadas nos provetes que ainda se encontravam fortemente presos à chapa, como se pode ver na Figura 16.



Figura 16 - Resultados do 1º ensaio. Face superior (esquerda) e face inferior (direita)

Decidiu-se então analisar o efeito dos parâmetros de corte na quantidade de material acumulado nas superfícies inferior e superior da chapa, bem como penetração e a irregularidade da superfície de corte.

Dadas as grandes diferenças observadas entre os dois gases utilizados, decidiu-se analisar os resultados separadamente para o Oxigénio e para o Azoto.

Após todos os ensaios terem sido concluídos, foi efetuado o levantamento dos resultados, sendo de seguida apresentados, e posteriormente serão analisados.

Oxigénio:

Ensaio 1. Corte não completo da peça, algum material acumulado na superfície inferior

Ensaio 2. Corte completo da peça, superfície muito irregular, muito material na superfície inferior

Ensaio 3. Máquina apresentou erro

Ensaio 4. Corte quase completo, muito material derretido em baixo

Ensaio 5. Máquina apresentou erro

Ensaio 6. Corte parcialmente completo, muito material derretido na superfície inferior

Ensaio 7. Máquina apresentou erro

Ensaio 8. Corte completo, superfície ligeiramente irregular

Ensaio 9. Corte completo, superfície muito irregular, material derretido na superfície inferior

Azoto

Ensaio 1. Pouca penetração

Ensaio 2. Penetração praticamente nula, muito material na superfície superior, largura da linha de corte muito grande

Ensaio 3. Corte abortado pelo operador, risco de dano na lente pela baixa pressão

Ensaio 4. Corte abortado pelo operador, risco de dano na lente pela baixa pressão

Ensaio 5. Corte quase completo, algum material acumulado em baixo

Ensaio 6. Corte quase completo, algum material acumulado em baixo

Ensaio 7. Corte completo, algum material acumulado em baixo, superfície muito irregular na metade inferior

Ensaio 8. Corte abortado pelo operador, risco de dano na lente pela baixa pressão

Ensaio 9. Corte abortado pelo operador, risco de dano na lente pela baixa pressão em combinação com a lente.

4.2.3. Análise de Resultados - Oxigénio

Pressão

Este parâmetro é normalmente utilizado com valores muito baixos no corte laser a oxigénio, pelo que a máquina exibiu um aviso quando colocamos a pressão de corte a 15 bar. Assim sendo, não foram feitos os cortes com estes valores de pressão para Oxigénio.

Quanto à quantidade de material derretido na face inferior da chapa, esta é muito maior para pressões mais altas, sendo que a pressão do provete com melhores resultados (provete 8) é de 1 bar.

Um valor mais alto de pressão consegue também assegurar uma maior profundidade de penetração dado origem a mais cortes completos, mas com um grande custo na qualidade superficial

Potência

Para este parâmetro temos uma capacidade de penetração maior para maiores potências, sendo que o melhor provete foi obtido com 6000 W, a capacidade máxima da máquina.

Podemos também concluir que este parâmetro não é o mais importante no que diz respeito à qualidade de corte e à quantidade de material derretido acumulado na face inferior, uma vez que obtivemos resultados muito diferentes nestes aspetos para valores iguais de potência.

Frequência

Este parâmetro não parece ter uma correlação direta com a quantidade de material acumulado em baixo ou com a qualidade da face de corte.

Apenas conseguimos penetração total para testes acima de 1000 Hz de frequência, tendo sido este mesmo valor o utilizado no melhor provete.

Duty

Para o valor mais baixo estudado deste parâmetro (80%) apresentou-se uma grande dificuldade de corte, sendo que apenas o provete com o máximo de potência e frequência apresentou penetração total.

Com um valor de 90% conseguimos penetração total, mas utilizando uma pressão muito alta (8 bar), o que poderá ser o motivo.

Para o valor máximo de 100% obtivemos o melhor provete e um corte parcialmente completo, mas com muito material acumulado na superfície inferior.

Assim sendo a utilização de valores mais altos parece oferecer uma maior capacidade de penetração.

Velocidade de corte

Este parâmetro não pode ser analisado para o seu valor mais baixo, pois não teve cortes completos. O valor 2750 mm por segundo foi o que apresentou o melhor acabamento lateral, sendo que o corte a 3250 apresenta bastantes irregularidades.

Quanto à quantidade de material derretido apresentado, este não parece ter uma relação com a velocidade de corte.

Focus Point

Para todos os níveis testados foi possível obter provetes com e sem corte total, sendo que esta capacidade não parece dependente deste parâmetro.

A melhor qualidade de corte foi, porém, apresentada para valores positivos, ou seja, com o foco acima da superfície superior da peça.

Diâmetro de Bocal

Este parâmetro também não apresenta uma correlação entre o seu valor e a qualidade do corte. O melhor corte foi obtido utilizando um bocal de diâmetro 1,2.

4.2.4. Conclusões - Oxigénio

Após analisar todos os provetes individualmente e agrupados conforme todos os parâmetros de teste chegamos a algumas conclusões:

- Não é possível cortar com oxigénio a pressões muito elevadas.
- Aumento de pressão leva a um aumento do material derretido na face interior.
- Uma pressão maior facilita o corte, mas prejudica muito a qualidade da face.
- Aumento da potência aumenta a capacidade de penetração.
- Para baixos duty's apenas conseguimos cortar com potências e pressões muito altas, o que leva a baixa qualidade.
- Para focus points na superfície superior da chapa ou no seu interior apenas conseguimos cortar com pressões muito elevadas.
- O focus point acima da chapa foi o que apresentou um melhor acabamento.

4.2.5. Análise de Resultados - Azoto

Pressão

Este valor é normalmente utilizado com valores muito mais altos no corte laser a azoto, quando comparados com o corte a oxigénio.

Durante o primeiro teste com o valor de pressão de 1 bar o operador notou que o laser não apresentava penetração suficiente e corria risco de danificar a lente. Assim sendo não foram feitos os cortes com estes valores de pressão para Azoto.

A quantidade de material na face inferior foi bastante semelhante nos cortes de diferentes pressões que apresentaram penetração suficiente para o efeito.

O único corte completo foi conseguido com 15 bar de pressão.

Potência

Vemos uma relação de proporcionalidade muito evidente entre a potência e a capacidade de penetração. Para valores de 5000 W praticamente não houve penetração, para 5750 W tivemos penetração parcial, e apenas para 6000 W obtivemos um corte completo.

Frequência

Este parâmetro não parece ter uma correlação direta com a quantidade de material acumulado em baixo ou com a penetração.

O único corte completo foi obtido para 500 Hz.

Duty

Não conseguimos tirar nenhuma conclusão sobre a influência deste parâmetro na capacidade de penetração ou de na quantidade de material acumulado na face inferior da chapa.

O único corte completo foi obtido para 100%.

Velocidade de corte

Novamente, devido a apenas um provete ter apresentado o corte completo, não são possíveis tirar conclusões sobre a influência da velocidade de corte nos resultados finais.

Focus Point

O focus point apresenta melhores resultados de penetração para valores negativos (no interior da chapa). Quando colocado este ponto na face superior da chapa houve muito pouca penetração, e quando colocado acima da face a penetração foi a pior de todas, apresentando o material ainda na superfície superior, apresentando ainda problemas de segurança em um dos ensaios.

Diâmetro de Bocal

O diâmetro do bocal não aparenta ter uma relação significativa com os resultados finais, sendo que para o mesmo diâmetro tivemos o único provete com corte completo, e também provete com a menor penetração.

4.2.6. Conclusões - Azoto

Após uma análise de todos os provetes tendo em conta as propriedades que foram sendo variáveis ao longo do estudo obtivemos as seguintes conclusões.

- Não é possível cortar com Azoto a pressões muito baixas
- Um valor elevado de potência é muito importante para se conseguir o corte completo da peça
- A frequência, duty, velocidade de corte e diâmetro do bocal não apresentam uma grande influência na capacidade de penetração do laser
- O focus point deve ser colocado sempre abaixo da face superior da chapa
- Valores de focus point muito altos podem constituir um risco para a integridade da máquina

Infelizmente, apenas tendo sido conseguido cortar completamente 1 provete é impossível tirar conclusões sobre as qualidades geométricas e superficiais e da influência dos parâmetros de corte nas mesmas.

4.3. Ensaio nº 2

Após os resultados obtidos nos primeiros testes será importante optar por uma gama de parâmetros mais pequena, focando-se em torno dos valores que nos permitirão efetuar um corte total dos provetes, de modo a proceder com a análise planeada e, efetivamente, ter valores para concluir o nosso estudo.

4.3.1. Matriz de Taguchi

Este segundo ensaio será feito apenas para o Oxigénio, dado que este é o gás mais utilizado, e os parâmetros de corte para os dois gases são demasiado diferentes para se analisar ao mesmo tempo. Restringindo já este parâmetro, decidimos utilizar o espaço na tabela de Taguchi para colocar a altura de corte, que anteriormente foi mantida constante.

Decidimos também manter o diâmetro do bocal constante, pois era um fator que incorria num grande gasto de tempo durante os testes, pois a sua mudança era manual e requeria uma calibração do laser muito frequente. No seu lugar decidimos utilizar 3 espessuras de corte diferentes.

Tendo em conta as conclusões obtidas no capítulo 4.2.5. foi analisada a tabela de parâmetros variáveis e feitos ajustes pensando num possível segundo teste, com valores derivados deste estudo, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação dos níveis utilizados no 1º e 2º ensaios

Parâmetro	Níveis Teste 1	Níveis Teste 2
Potência [watts]	5000 5500 6000	5000 5500 6000
Frequência [Hertz]	500 1000 1000	500 1000 1000
Duty [%]	80 90 100	80 90 100
Cutting Speed [mm/s]	2250 2750 3250	2250 2750 3250
Pressão [bar]	1 8 15	1.0 1.5 2.0
Foco [mm]	-3.5 0.0 3.5	-3.5 0.0 3.5
Diâmetro do bocal [mm]	1.2 2.0 3.0	1.2
Espessura [mm]	8	1 3 5
Altura de Corte [mm]	1.0	1.0 2.0

Com estes parâmetros podemos construir novamente uma matriz L18 do método de Taguchi, representada na Tabela 4, e avançar para um estudo em que é expectável todos os provetes serem cortados com sucesso, procedendo a medições mais precisas dos valores que serão controlados:

Tabela 4 - Tabela L18 de Taguchi utilizada no 2º ensaio

Ensaio	Altura de corte	Potência	Frequência	Duty	Velocidade de corte	Pressão	Foco	Espessura
1	1	5000	500	80	2250	1	-3,5	1
2	1	5000	1000	90	2750	1,5	0	3
3	1	5000	2000	100	3250	2	3,5	5
4	1	5500	500	80	2750	1,5	3,5	5
5	1	5500	1000	90	3250	2	-3,5	1
6	1	5500	2000	100	2250	1	0	3
7	1	6000	500	90	2250	2	0	5
8	1	6000	1000	100	2750	1	3,5	1
9	1	6000	2000	80	3250	1,5	-3,5	3
10	2	5000	500	100	3250	1,5	0	1
11	2	5000	1000	80	2250	2	3,5	3
12	2	5000	2000	90	2750	1	-3,5	5
13	2	5500	500	90	3250	1	3,5	3
14	2	5500	1000	100	2250	1,5	-3,5	5
15	2	5500	2000	80	2750	2	0	1
16	2	6000	500	100	2750	2	-3,5	3
17	2	6000	1000	80	3250	1	0	5
18	2	6000	2000	90	2250	1,5	3,5	1

4.3.2. Resultados

Previamente a qualquer análise estatística, podemos concluir que a matriz utilizada neste ensaio foi extremamente mais bem-sucedida que a anterior, visto que todos os provetes foram cortados com sucesso, como pode ser visto na Figura 17, e podem ser analisados conforme o planeado.

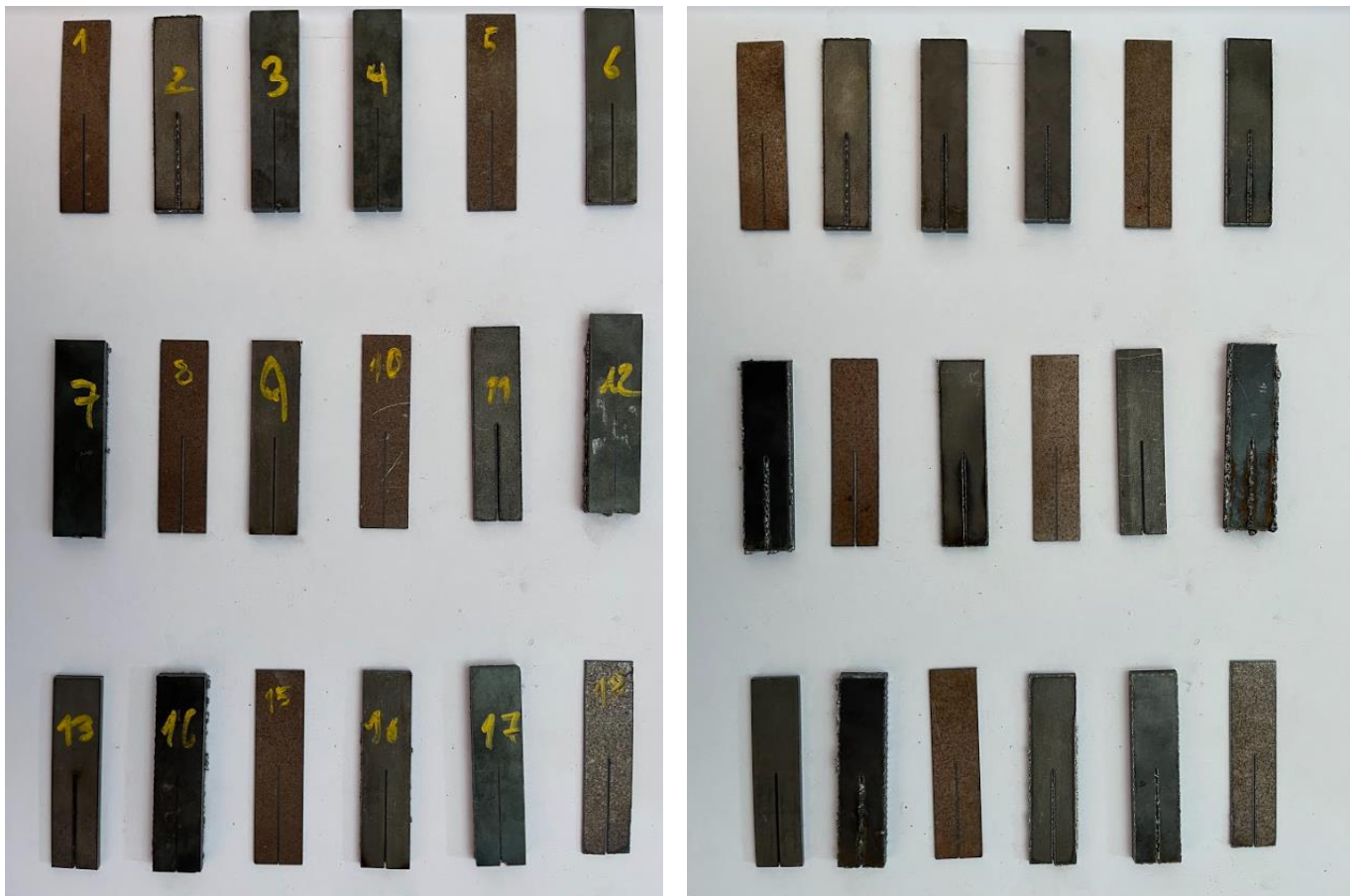


Figura 17 - Resultados do 2º Ensaio. Face superior (esquerda) e face inferior (direita)

Análise Dimensional

O primeiro passo foi analisar o comprimento e largura dos provetes, conforme descrito na figura 13, utilizando um micrómetro de exteriores.

Todos os provetes neste estudo se enquadraram na tolerância de 0.2 mm, valor em vigor como tolerância aceitável para o processo pela empresa, pelo que todos são aceitáveis e não se encontrou erros no corte quanto a este aspeto.

Rugosidade da Superfície de Corte

Para a análise da rugosidade os valores foram medidos longitudinalmente, aproximadamente a meio da espessura da chapa, em 3 pontos diferentes da mesma. Tal como explicado no capítulo 4.1.2. (Teste e avaliações), os valores medidos de rugosidade foram R_a e R_z , e encontram-se expostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores medidos de rugosidade no 2º ensaio

Ensaio	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra médio	Rz 1	Rz 2	Rz 3	Rz médio
1	6,488	7,721	13,525	9,245	27,680	33,386	75,678	45,581
2	6,328	10,433	5,159	7,307	29,013	42,071	32,893	34,659
3	6,389	10,951	10,559	9,300	25,156	49,913	48,082	41,050
4	8,290	5,678	7,378	7,115	38,544	25,208	32,515	32,089
5	1,371	0,732	1,469	1,191	8,813	5,660	8,509	7,661
6	7,870	6,143	6,193	6,735	31,150	34,563	31,146	32,286
7	8,265	6,059	8,167	7,497	36,340	26,665	34,597	32,534
8	5,462	9,973	4,446	6,627	26,461	41,336	24,631	30,809
9	5,096	7,038	9,294	7,143	23,965	30,115	37,174	30,418
10	2,136	3,985	2,194	2,772	8,915	23,421	14,219	15,518
11	11,861	5,447	11,297	9,535	52,340	24,931	47,443	41,571
12	4,986	8,317	11,403	8,235	24,551	34,328	60,376	39,752
13	4,400	7,679	3,745	5,275	21,814	33,456	16,907	24,059
14	8,973	6,992	13,468	9,811	44,555	37,309	57,711	46,525
15	2,538	1,749	0,968	1,752	14,844	10,058	5,029	9,977
16	4,500	7,495	5,037	5,677	23,219	39,432	24,279	28,977
17	9,988	6,723	6,413	7,708	51,029	35,398	34,090	40,172
18	12,917	10,167	10,653	11,246	53,944	42,979	45,159	47,361

4.3.3. Análise de resultados

De acordo com o que foi descrito no capítulo 3.4, foi utilizado o software estatístico minitab, disponibilizado pela universidade para este estudo.

Com a utilização deste software era expectável descobrir quais os parâmetros com um nível de significância (α) de 5%, ou seja, tendo em conta um nível de confiança de 95%. Posteriormente é analisada a variação dos resultados finais para cada nível desses mesmos parâmetros significativos.

Fatores significativos

Tal como foi explicado anteriormente, foi utilizada a análise de variância para se obter os valores de prova (valor P), que sendo inferiores a 0,05 indicam um nível de confiança superior a 95% nos resultados obtidos para esse mesmo parâmetro. Estes valores estão apresentados na Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 -Valores P para os diferentes parâmetros na medição de Ra no 2º ensaio

Parâmetro	Valor P
Altura de corte	0,980
Potência	0,005
Frequência	0,344
Duty	0,920
Velocidade de corte	0,000
Pressão	0,069
Foco	0,009
Espessura	0,004

Tabela 7 – Valores P para os diferentes parâmetros na medição de Rz no 2º ensaio

Parâmetro	Valor P
Altura de corte	0,807
Potência	0,012
Frequência	0,528
Duty	0,827
Velocidade de corte	0,001
Pressão	0,061
Foco	0,081
Espessura	0,008

Analisando a Tabela 6 e Tabela 7, podemos concluir quais os parâmetros que são ou não significativos, com um nível de confiança de 95%.

Sendo assim, apenas serão considerados neste estudo a potência, velocidade de corte, foco, e espessura, sendo estes os únicos que apresentaram um valor de prova menor que 0,05 no estudo de pelo menos uma das rugosidades assinaladas.

Adicionalmente, foi aberta uma exceção para a pressão, uma vez que se apresenta num nível quase dentro do intervalo de confiança considerado.

Contribuição

Além do valor P de cada parâmetro, que nos dá os parâmetros significativos para valores de $P \leq 0,05$ significativos, é ainda possível calcular a % de contribuição de cada fator na variação total, conforme já definido no ponto 3.5. A Tabela 8 e Tabela 9 apresentam as %s de contribuição dos parâmetros em estudo.

Tabela 8 - Contribuição de cada parâmetro para o valor de Ra

Parâmetro	Contribuição
Potência	11,79%
Velocidade de corte	21,42%
Pressão	5,51%
Foco	10,20%
Espessura	12,32%
Erro	38,77%

Tabela 9 - Contribuição de cada parâmetro para o valor de Rz

Parâmetro	Contribuição
Potência	11,25%
Velocidade de corte	18,61%
Pressão	6,78%
Foco	6,07%
Espessura	12,44%
Erro	44,84%

A análise da Tabela 8 e da Tabela 9 permite-nos concluir a contribuição de cada parâmetro na rugosidade final do provete.

É possível verificar que o parâmetro mais importante é a velocidade de corte, seguida da espessura e da potência. Por último, temos o foco e a pressão, que no caso da rugosidade R_z , são muito semelhantes.

Além disso, é possível também verificar que o erro representa a fração maior em ambos os casos. O erro representa todas as variáveis não controladas ou explicadas, como por exemplo, parâmetros que não são controlados, erro humano e variações não controláveis no processo (temperatura, defeitos da chapa).

Considerando o número elevado de anos de serviço da máquina utilizada e as imensas variáveis a considerar, é plausível e aceitável a presença de um valor de erro relativamente

elevado. Neste caso, o valor de erro é superior ao que idealizamos, algo na ordem dos 30%, o que levanta algum interesse sobre a testagem de mais parâmetros do que aqueles que foram analisados.

Análise de médias

Depois de conhecer todos os fatores significativos e as suas respectivas contribuições, foi feita uma análise de médias dos diferentes parâmetros em estudo, de modo a analisar a influência desses mesmos parâmetros em todos os seus níveis.

Do Gráfico 1 ao Gráfico 10 são apresentados os efeitos principais médios dos parâmetros em estudo, cada ponto do gráfico representa a média das observações nesse nível, também estão representados os intervalos de confiança a 95% das médias.

Potência

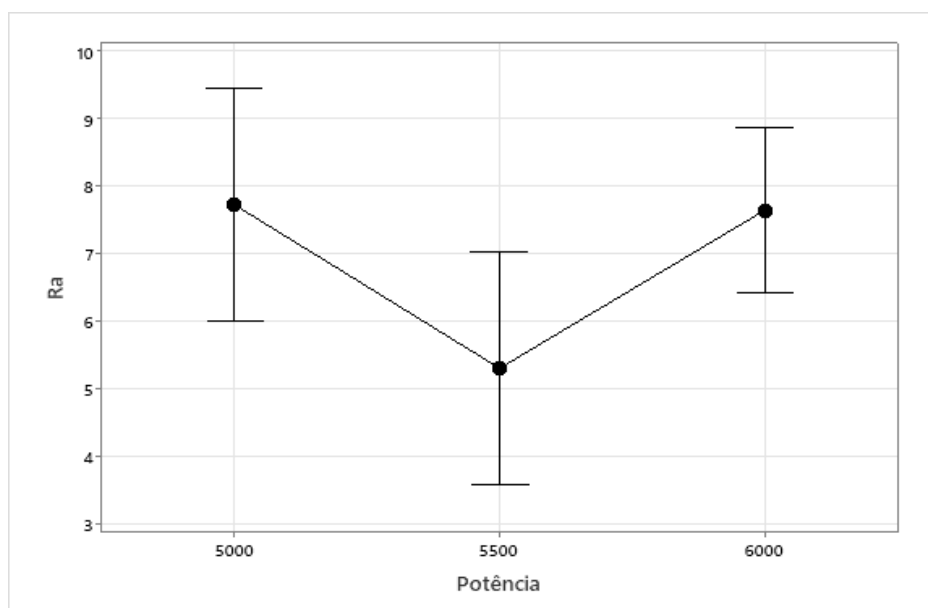


Gráfico 1 - Ra em função da potência

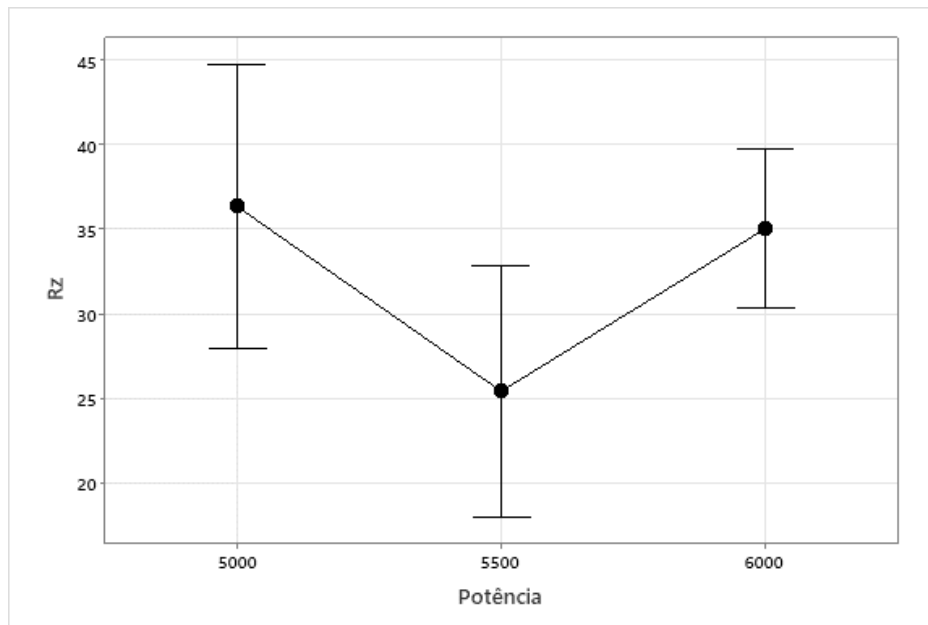


Gráfico 2 - Rz em função da potência

Para a potência conseguimos concluir, analisando o Gráfico 1 e o Gráfico 2, que os valores de ambas as rugosidades apresentam uma distribuição em “V” que sendo que a rugosidade mínima é obtida para valores de 5500 W.

Velocidade de corte

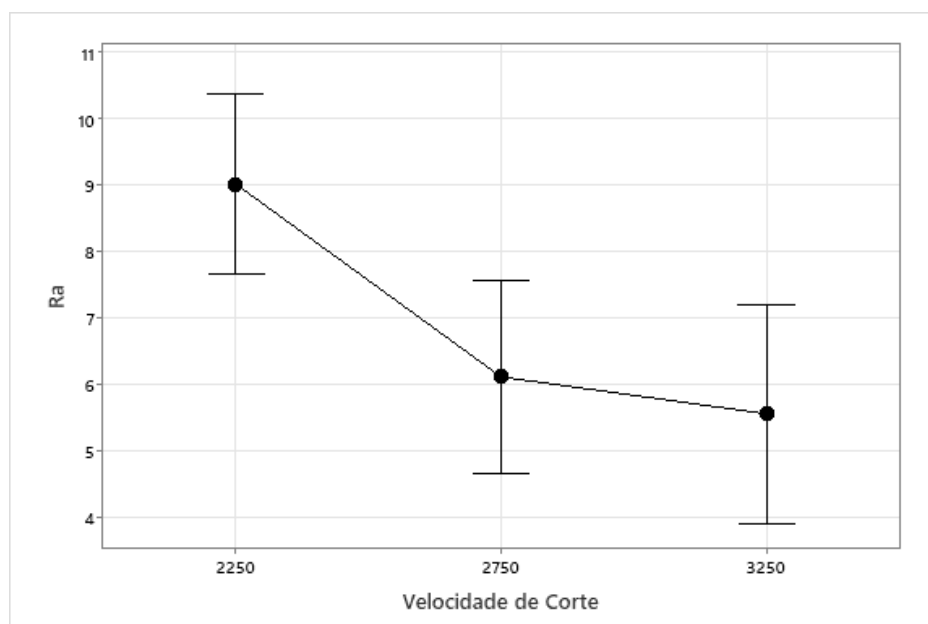


Gráfico 3 - Ra em função da velocidade de corte

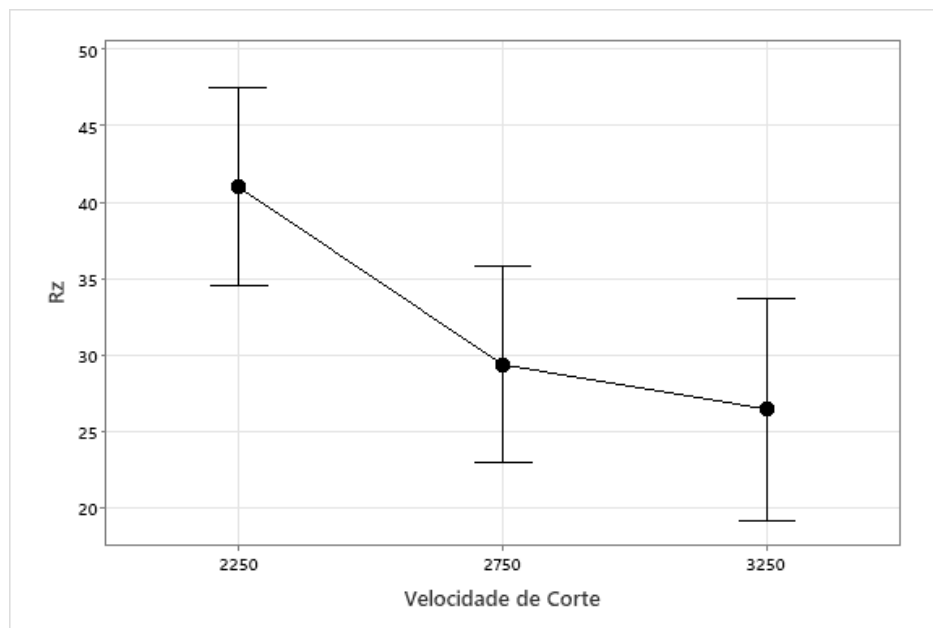


Gráfico 4 - Rz em função da velocidade de corte

A análise do comportamento da rugosidade apresentou resultados diferentes do que era inicialmente expectável. Sendo a velocidade de corte um parâmetro de extrema importância em termos de produtividade, foi-me comunicado pelos operadores e responsáveis da máquina que já teriam experimentado anteriormente com este parâmetro, tendo obtido o resultado inverso.

Neste estudo, foi concluído que o valor da rugosidade diminui com o aumento da velocidade, como pode ser visto no Gráfico 3 e no Gráfico 4, sendo esta diminuição muito mais expressiva entre 2250 e 2750 [mm/s] do que para valores superiores.

Foco

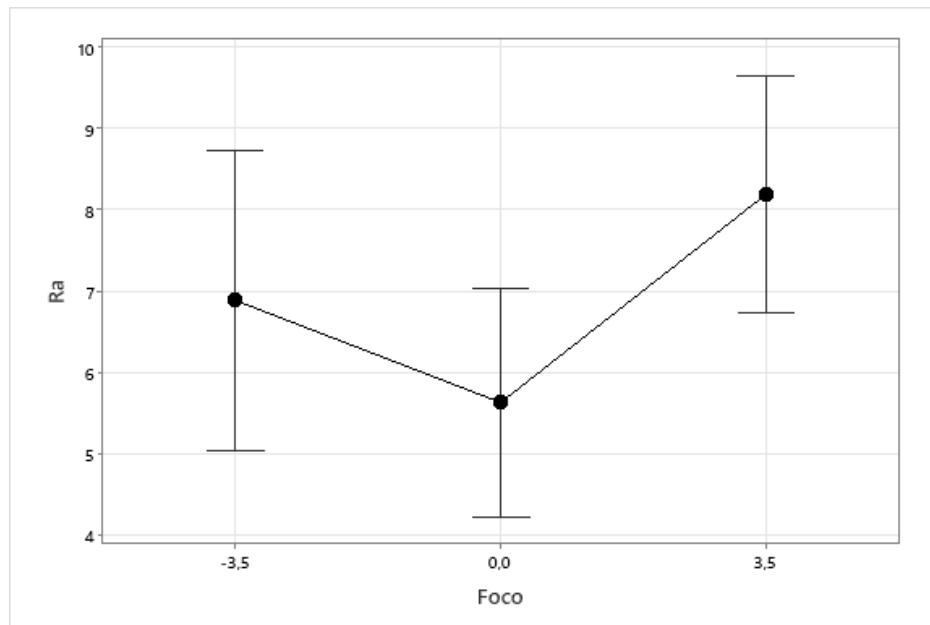


Gráfico 5 - Ra em função do foco

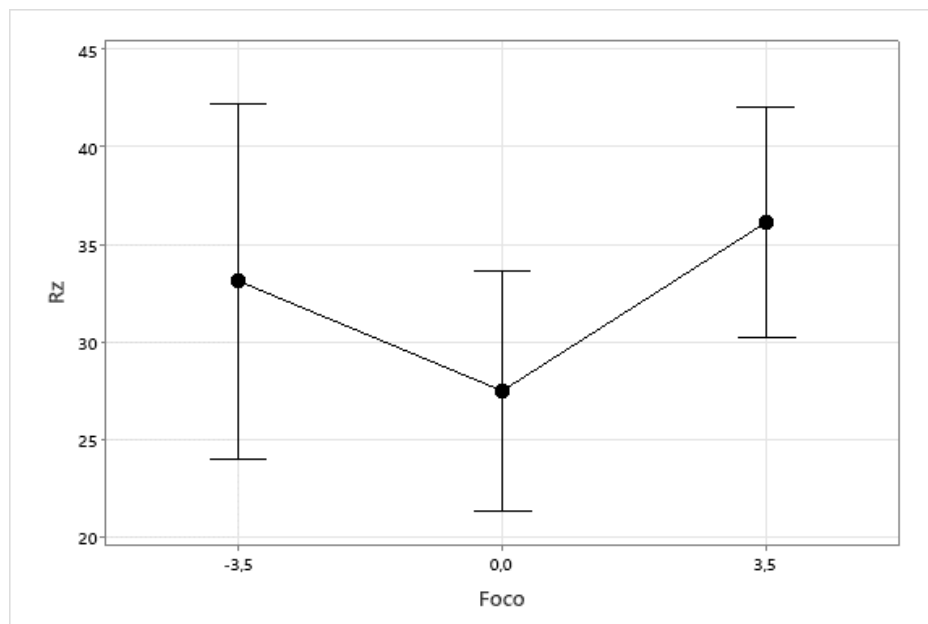


Gráfico 6 - Rz em função do foco

Relativamente à rugosidade em função do foco, esta apresenta uma distribuição semelhante à da potência, em “V”, como mostram o Gráfico 5 e o Gráfico 6, sendo que o ponto que apresenta uma menor rugosidade é o de 0 [mm], que corresponde a ter o laser focado na superfície superior da peça.

Espessura

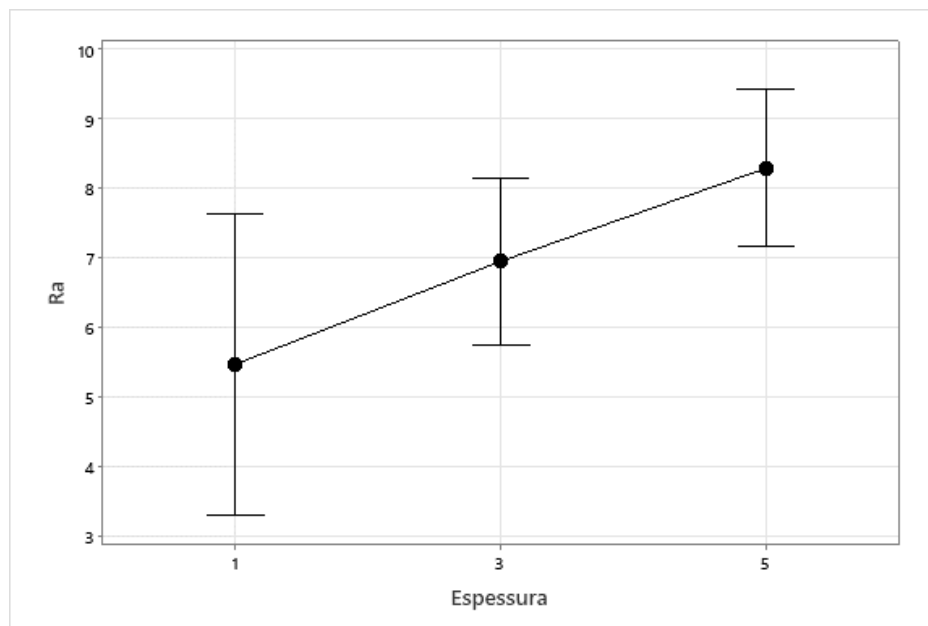


Gráfico 7 - Ra em função da espessura

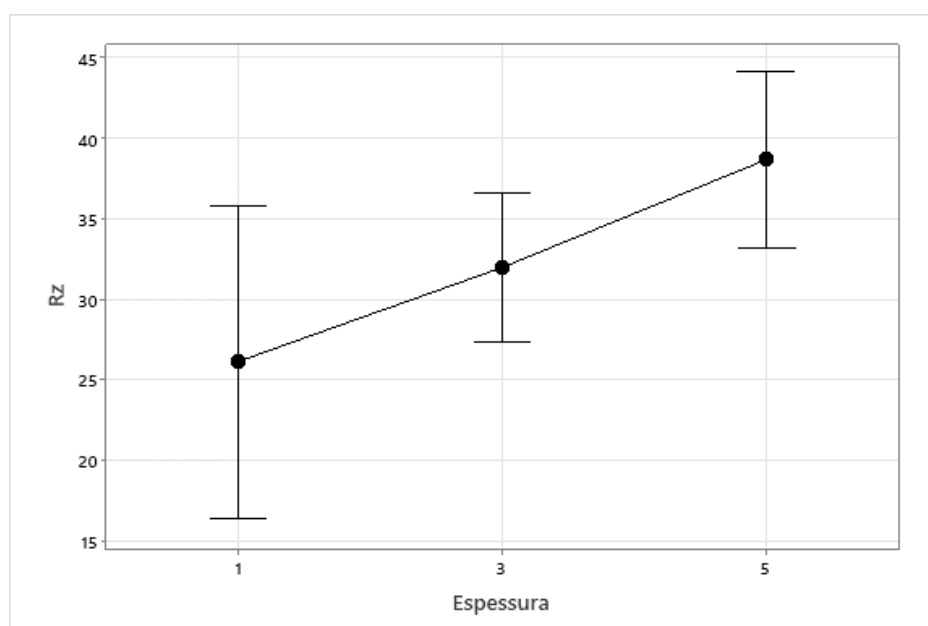


Gráfico 8 - Rz em função da espessura

Como seria expectável, a rugosidade aumenta com a espessura a ser cortada. Este fenómeno é facilmente visível e compreensível pela dificuldade que uma espessura maior causa na penetração do laser, e comprovado pelo Gráfico 7 e Gráfico 8.

Em chapas de 20 mm, as maiores cortadas neste laser) é facilmente visível uma diminuição substancial da qualidade de corte relativamente a peças mais pequenas.

Este parâmetro não pode ser definido tendo em conta a otimização dos parâmetros de corte, pois é ditado pela necessidade da peça a fabricar, mas é muito importante tentar quantificar a sua influência na qualidade final.

Pressão

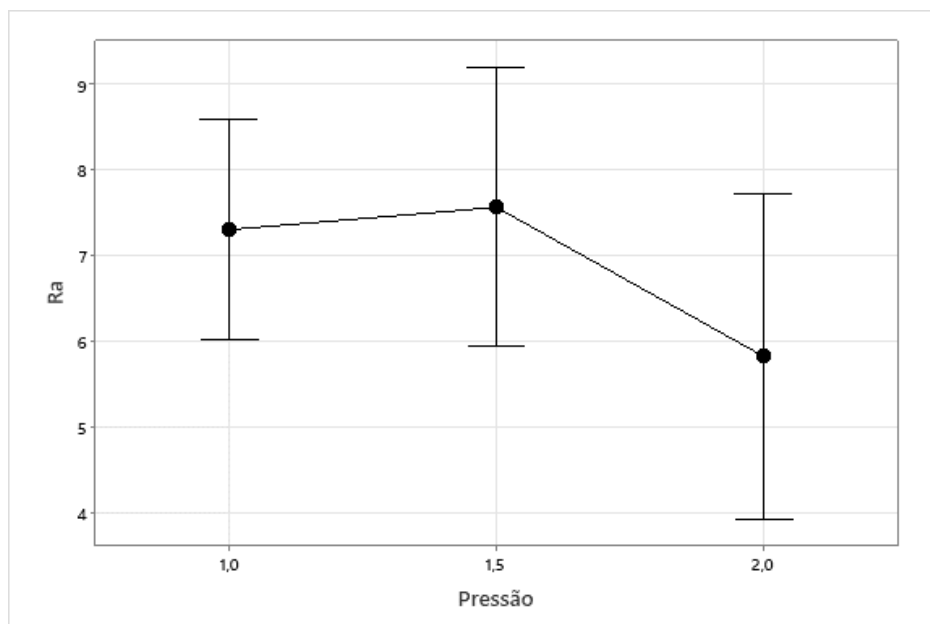


Gráfico 9 - Ra em função da pressão

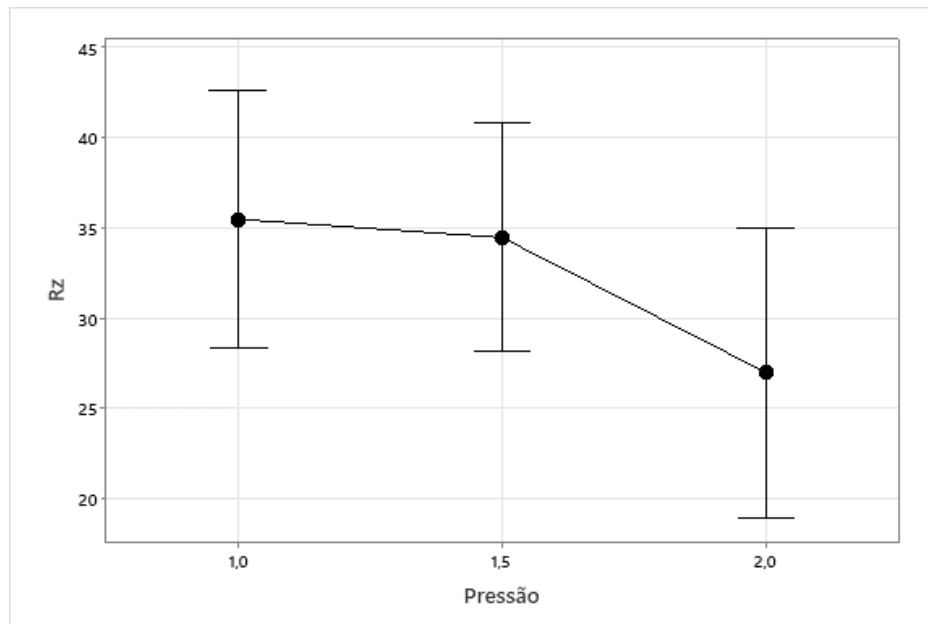


Gráfico 10 - Rz em função da pressão

A pressão, apesar de se encontrar imediatamente fora do nível de confiança de 95%, foi analisada e concluiu-se que a rugosidade diminuía com o seu aumento. Um aumento da pressão do gás de assistência representa uma maior facilidade de corte do feixe laser, o que pode explicar estes resultados, representados no Gráfico 9 e no Gráfico 10.

Regressão múltipla

Por último foi realizada uma regressão múltipla, obtendo-se a equação (4.1) e a equação (4.2), válidas para a gama de valores em estudo.

$$R_a = 16,95 - 0,000083 * potência - 0,003447 * velocidade de corte - 1,479 * pressão + 0,186 * foco + 0,701 * espessura \quad (4.1)$$

$$R_z = 82,7 - 0,00131 * potência - 0,0145 * velocidade de corte - 8,48 * pressão + 0,429 * foco + 3,13 * espessura \quad (4.2)$$

Relativamente a estas equações temos um fator R^2 que nos dá uma referência de quão ajustada está a equação em relação aos dados reais utilizados. Este fator toma um valor de 30,37% para a primeira equação, e de 28,87% para a segunda.

Este valor relativamente baixo diz-nos que o modelo não explica grande parte da variação vista durante o ensaio e dificulta previsões sobre resultados antes de análises empíricas. Por outro lado, este valor não inviabiliza os estudos feitos antes, como as contribuições e a análise de médias.

4.3.4. Conclusões

Concluindo-se os testes e análises planeados, é importante avaliar os resultados gerados pelo software estatístico. O primeiro passo foi avaliar, através dos valores P, a significância dos parâmetros no valor final de rugosidade, em que concluímos que os valores que apresentavam significância, com uma confiança de 95% são a potência, velocidade de corte, foco e espessura.

Começando pela potência, esta apresenta uma distribuição em “V”, com rugosidade mínima para 5500 W. O valor deste parâmetro tem uma relação muito direta com a energia introduzida no processo. Estes resultados indicam que há uma quantidade ótima de energia, localizada entre os valores de 5000 e 6000 W. Valores muito inferiores podem dificultar a reação de fusão do material, enquanto valores superiores levam a uma fusão excessiva, acabando as duas situações por apresentar menor qualidade final.

Em seguida analisamos a influência da velocidade no corte, o que se apresentou como tendo uma relação inversa entre a velocidade de corte e a rugosidade final da peça. Estes resultados foram, de certa forma, uma surpresa, sendo que o oposto era o esperado.

O foco foi também sujeito a análise e apresentou uma relação muito semelhante à potência, em “V”, correspondendo o foco na face superior da peça aos melhores resultados. Este comportamento resulta da maneira como a energia é distribuída ao longo da superfície de corte, sendo que ao colocar o foco acima ou abaixo da face superior faz com que o feixe apresente a energia distribuída por uma maior área, como se vê na Figura 18, logo tendo uma menor densidade de potência.

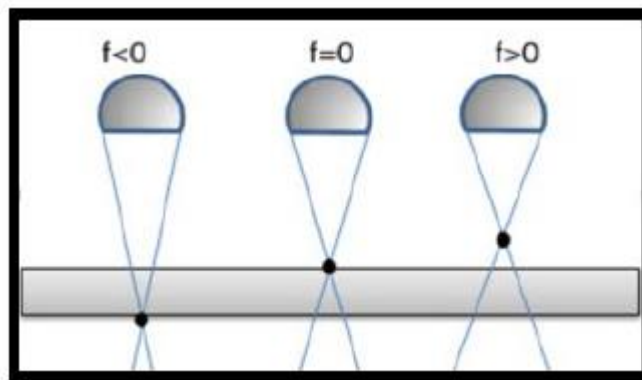


Figura 18 - Influência do ponto de focagem no feixe laser
(Nukon, 2019)

O estudo da espessura não se fez de modo a encontrar um valor ótimo para o corte, pois este valor é ditado pela necessidade, mas sim para se quantificar a sua influência na qualidade final. Tal como era expectável e muito facilmente se pode constatar à primeira vista olhando para as peças concluídas que se encontravam nas imediações da máquina, que a maior espessura é sempre acompanhada por uma maior rugosidade.

Por último, foi estudada a influência da pressão, apesar desta não se encontrar, embora que por muito pouco, nos fatores significativos. Esta apresenta valores inferiores de rugosidade para valores inferiores de pressão. A pressão do gás de assistência, no caso do oxigénio, aumenta a energia do processo através da reação de oxidação do ferro, além de facilitar a remoção do material fundido resultando numa melhor qualidade.

4.3.5. Teste de validação

Tal como foi dito no ponto 3.3 (Procedimento) sobre o método de Taguchi, o próprio reitera a importância de se efetuar sempre um ou vários, se possível, testes de validação sobre os resultados obtidos. Não se deve esquecer que todos os testes estatísticos representam apenas os eventos e as respostas mais prováveis às nossas perguntas e, mesmo utilizando um nível de confiança muito alto, as suas conclusões podem não corresponder à realidade. Por outro lado, este teste também deve ser analisado com sentido crítico, sendo que serve apenas para validar a totalidade das conclusões e que uma pequena falha em todo o estudo estatístico pode resultar numa não validação.

Para fazer este teste de validação fez-se um levantamento dos valores ótimos de cada parâmetro e cortou-se um provete nestas condições e um outro com as condições atuais utilizadas pela empresa, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros modificados do valor atual para o teste de validação do 2º ensaio

	Valores Atuais	Valores Ótimos Teóricos
Potência	5000	5500
Velocidade de Corte	3000	3250
Foco	4	0
Pressão	0.7	2.0
Espessura	1	1

Desse teste de validação resultaram os provetes expostos na Figura 19, em que o provete marcado com “V” foi cortado utilizando os parâmetros da empresa e o provete marcado com “F” foi obtido com os parâmetros ótimos teóricos. Estes ensaios resultaram numa diminuição do valor R_a de 3,199 para 0.708 e de um R_z de 15,671 para 3,718 de uma chapa de 1mm cortada a laser.



Figura 19 - Provete cortado com os parâmetros da empresa (esquerda) e com os parâmetros ótimos obtidos neste ensaio (direita).

4.4. Ensaio nº 3

Analisando todos os resultados dos dois ensaios chegamos a conclusões sobre que fatores são significativos e à quantificação da sua influência no corte.

Sendo que os parâmetros ótimos encontrados são de 1 mm, e que este parâmetro é maioritariamente ditado pelas características geométricas desejadas na peça final, é importante definir novamente os parâmetros ótimos, para cada espessura de material a cortar.

Deste modo foi definido um procedimento para se proceder a ensaios futuros com diferentes espessuras e diferentes materiais, de modo que estudos posteriores possam ser feitos consoante mudanças nas necessidades produtivas da empresa.

Para validar este procedimento, procedeu-se a sua implementação para uma espessura de 5mm.

4.4.1 Matriz de Taguchi

Foi decidido utilizar para este ensaio uma matriz apenas contendo os fatores significativos: potência, velocidade de corte, pressão e foco, excluindo a espessura, analisados em 2 níveis, numa matriz $L8\ 2^4$, como se vê na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores dos parâmetros utilizados no ensaio nº3

Ensaio		velocidade	potência	pressão	Foco
1		2250	5000	1	-3.5
2		2250	5000	2	3.5
3		2250	6000	1	3.5
4		2250	6000	2	-3.5
5		3250	5000	1	3.5
6		3250	5000	2	-3.5
7		3250	6000	1	-3.5
8		3250	6000	2	3.5

A utilização desta matriz permite-nos uma redução do número de ensaios a ser efetuados, tanto pela análise apenas de 4 parâmetros, bem como pela utilização de apenas 2 níveis de estudo.

Temos também a possibilidade de estudar interações entre a velocidade de corte e os restantes parâmetros, o que se torna interessante para compreender a melhor maneira de aumentar a velocidade e, consequentemente, aumentar a produtividade do processo.

4.4.2 Resultados

Tal como expectável foi possível obter um corte total de todos os provetes deste ensaio, que seguidamente foram submetidos ao procedimento de teste descrito no ponto 4.1.2.

Análise Dimensional

Foram novamente medidos o comprimento e largura dos provetes, com recurso a um micrómetro de exteriores, conforme o procedimento estabelecido.

Todos os provetes se encontram dentro da tolerância de 0.2 mm, valor em vigor como tolerância aceitável para o processo pela empresa, pelo que todos são aceitáveis e não se encontrou erros no corte quanto a este aspeto.

Rugosidade da Superfície de Corte

Utilizando o método já utilizado e posto em prática anteriormente para a medição de rugosidades foi possível obter os resultados da Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de rugosidade do 3º ensaio

Ensaio	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra médio	Rz 1	Rz 2	Rz 3	Rz médio
1	7,791	9,935	9,735	9,154	41,333	34,634	46,908	40,958
2	8,118	5,383	5,666	6,389	26,556	34,617	24,899	28,691
3	9,777	9,126	10,521	9,808	45,311	41,144	41,337	42,597
4	5,641	7,945	7,712	7,099	33,622	23,145	36,856	31,208
5	6,247	4,414	5,868	5,510	25,974	30,205	22,569	26,249
6	6,518	8,388	7,317	7,408	32,891	35,922	38,836	35,883
7	9,350	6,870	9,844	8,688	43,795	42,766	41,695	42,752
8	7,734	6,310	7,233	7,092	30,602	32,085	27,866	30,184

4.4.3 Análise de resultados

Fatores significativos

Recorrendo novamente ao software Minitab, fez-se um levantamento dos valores P, para os diferentes fatores, o que nos daria a conhecer quais os valores significativos neste ensaio para um nível de confiança de 95%, apresentando estes um valor $P \leq 0,05$.

Como podemos ver na Tabela 13 e na Tabela 14, nenhum dos parâmetros se enquadra nestes critérios, tendo o valor do nível de confiança de ser diminuído até quase 70% para termos um parâmetro significativo.

Tabela 13 - Valores P para os diferentes parâmetros na medição de Ra no 3º ensaio

Fator	Valor P
Velocidade de Corte	0,415
Potência	0,366
Pressão	0,284
Foco	0,438

Tabela 14 - Valores P para os diferentes parâmetros na medição de Rz no 4º ensaio

Source	P-Value
Velocidade de Corte	0,666
Potência	0,458
Pressão	0,228
Foco	0,281

Análise de médias

Apesar de, neste ensaio, nenhum parâmetro poder ser considerado significativo, dentro dos níveis impostos nesta dissertação, estando os ensaios completos e medições efetuadas fez-se a análise de médias como no ensaio anterior, porem com um nível adequado de ceticismo quanto aos resultados obtidos.

Os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico 11 e no Gráfico 12.

Podemos ver que o comportamento para R_a e R_z é semelhante em cada parâmetro, e que a rugosidade apresenta um aumento proporcional apenas relativamente à pressão, sendo inversamente proporcional a todos os outros parâmetros, ou seja diminui com o aumento da velocidade, pressão e foco.

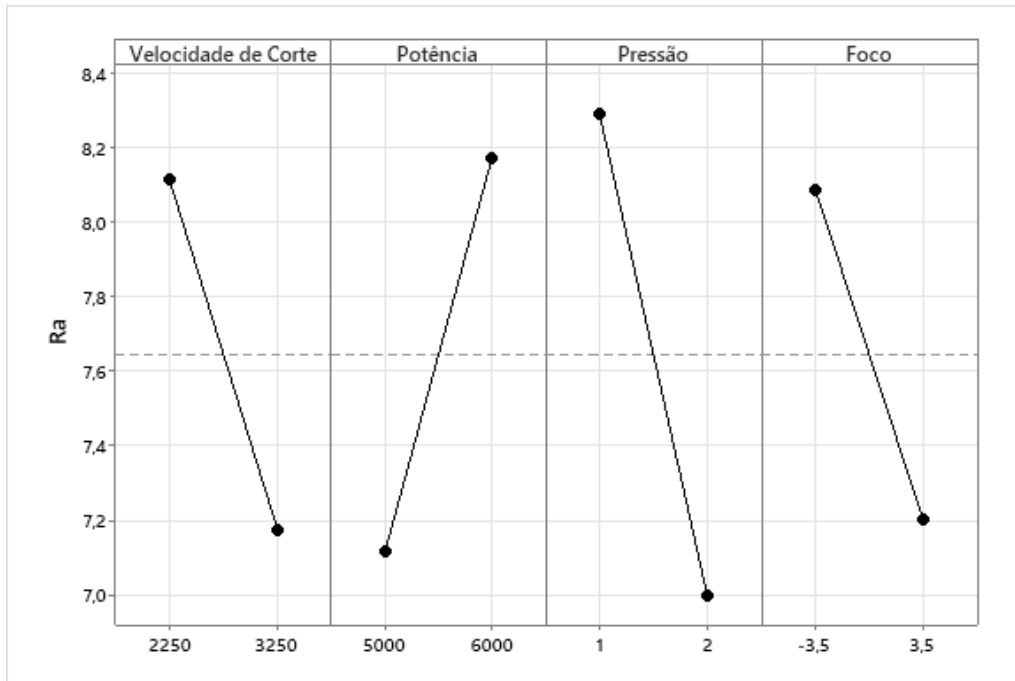


Gráfico 11 – Ra em função de todos os parâmetros do 3º ensaio

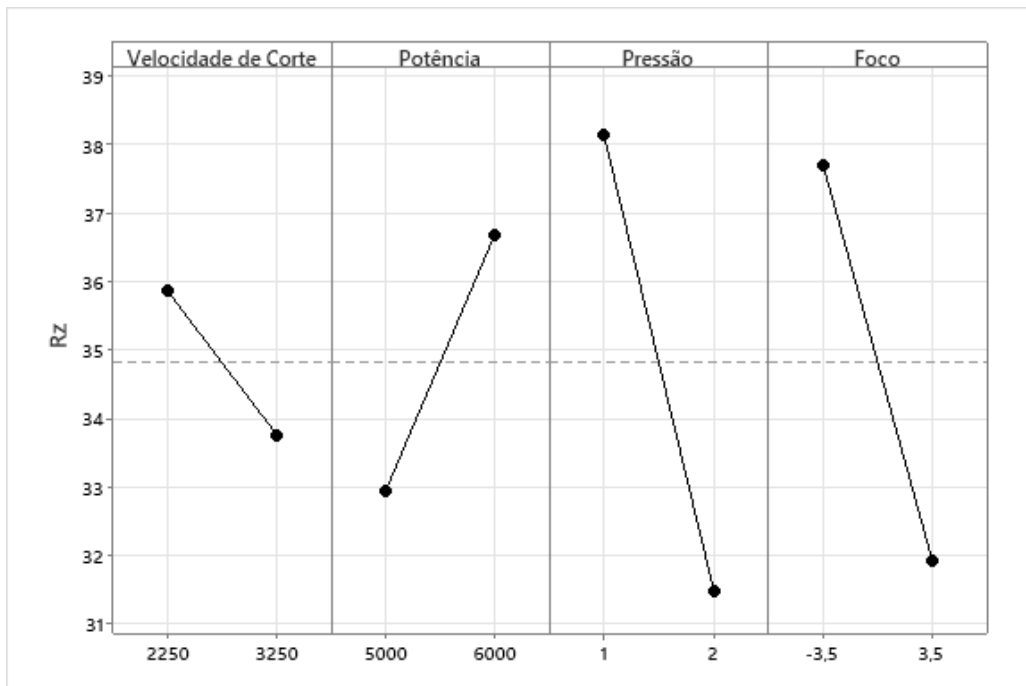


Gráfico 12 - Rz em função de todos os parâmetros do 3º ensaio

4.4.4. Conclusões

Derivado dos resultados obtidos na análise dos valores P, a conclusão deste ensaio não tem confiança estatística suficiente para a dissertação. Foi porém aproveitado o trabalho tido e a análise normal conduzida.

Este processo levou-nos a um conjunto de valores ótimos:

- Velocidade de corte: 3250 mm/s
- Potência: 5000 W
- Pressão: 2 bar
- Foco: 3.5 mm

Que diferem dos usados atualmente apenas na pressão (0.7 bar) e no foco (4.0 mm).

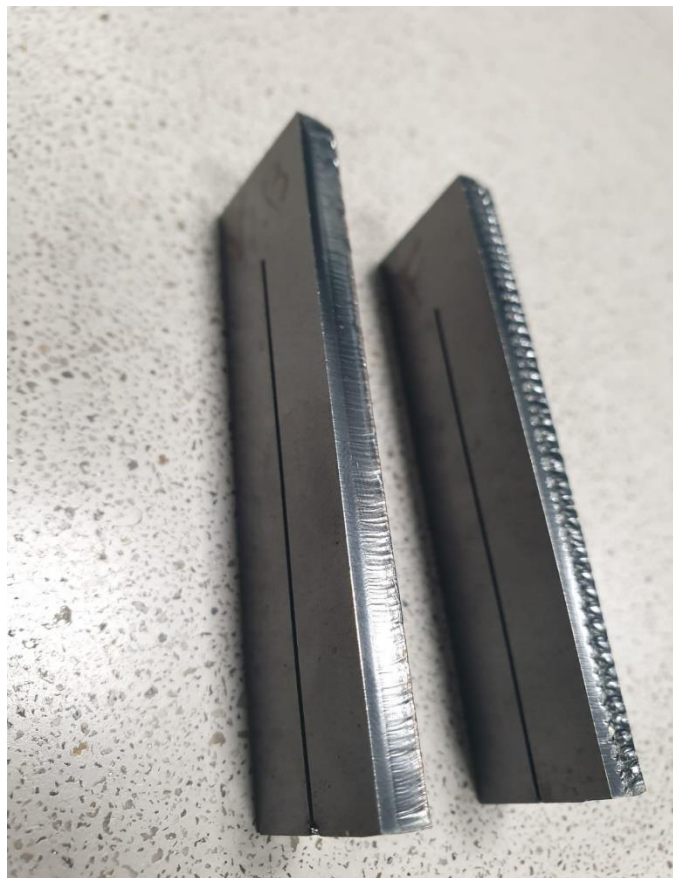


Figura 20 - Resultado do teste de validação feito com os parâmetros da empresa (esquerda) e com os valores ótimos teóricos (direita)

4.4.5. Teste de validação

De modo a tentar validar empiricamente o que estatisticamente não foi possível validar, procedeu-se ao corte de um provete com os valores ótimos teóricos e outro com os valores utilizados pela empresa, como se pode ver na Tabela 15 e posteriormente procedeu-se à medição da rugosidade dos mesmos.

Com esta medição de rugosidade viu-se um aumento de Ra de 1,270 para 4,092 e um aumento de Rz de 6,018 para 19,959.

Este teste de validação, aliado aos valores P muito altos que se refletem num nível de confiança demasiado baixo, levam-nos a concluir que este ensaio não obteve resultados satisfatórios e deveria ser repensado, por exemplo utilizando uma matriz de Taguchi com mais níveis por parâmetro.

Tabela 15 - Parâmetros modificados do valor atual para o teste de validação do 3º ensaio

	Valores Atuais	Valores Ótimos Teóricos
Potência	5000	6000
Velocidade de Corte	3200	3250
Foco	4	3.5
Pressão	0.7	2.0
Espessura	5	5

4.5. Conclusões

Olhando agora para o conjunto de todos os resultados obtidos ao longo desta dissertação podemos tirar conclusões sobre o processo, os parâmetros estudados e os ensaios efetuados.

Do primeiro ensaio, embora não tenha sido possível fazer todos os testes e análises que tinham sido inicialmente planeados, foi possível concluir que os dois gases utilizados pela empresa, devido à sua interação com a matéria explicada ao longo do documento, funcionam em regimes muito diferentes, nomeadamente no que diz respeito à pressão, sendo assim necessário analisá-los em ensaios separados.

No ensaio seguinte foi concluído que os parâmetros mais influentes no processo e a sua contribuição para o resultado são:

- Potência – 11,79 %
- Velocidade de Corte – 21,42 %
- Pressão – 5,51 %
- Distância Focal – 10,20 %
- Espessura 12,32 %

Sendo os restantes 38,76% correspondentes a fatores não considerados, fatores impossíveis de controlar, possíveis erros de operador ou da análise estatística.

Destes valores, e para uma espessura de 1mm, foi recomendado à empresa alterar a potência utilizada de 5000 W para 5000 W, o foco de 4 mm para 0 mm e a pressão de 0.7 bar para 2.0 bar, resultando numa redução do valor R_a de 3,199 para 0.708 e de R_z de 15,671 para 3,718.

Por fim, no último ensaio, concluiu-se que uma redução da dimensão da matriz utilizada conduz a uma maior dificuldade em obter resultados que se apresentem dentro do nível de confiança que foi imposto ao longo da dissertação.

Capítulo 5 - Trabalhos futuros

O processo em estudo ao longo desta dissertação é extremamente complexo, tendo diversos parâmetros que necessitam de estudo e que tornam a sua análise um processo moroso e extenso.

Devido a isto e no sentido de ser feita uma uniformização e exposição da informação analisada agora e que será analisada no futuro, no seguimento do projeto iniciado nesta dissertação, será elaborado um quadro em que se expõem os fatores principais do processo e os seus valores ótimos conhecidos, e os que se tenciona estudar e conhecer de futuro.

A análise conduzida nesta dissertação deverá ser replicada para várias espessuras e vários materiais, seguindo os procedimentos e métodos de análise já utilizados.

Para este efeito e todos os ensaios serem registados, foi feito um documento a ser utilizado para definir a matriz de cada ensaio e os resultados obtidos, apresentado no Anexo E.

Este quadro deverá ser completo, analisado e colocado junto ao aparelho de corte laser, permitindo inferir valores para materiais ou espessuras ainda não estudados, através da análise dos valores contíguos e da evolução desses parâmetros entre os valores já estudados, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Tabela exemplo da que será utilizada para analisar e controlar os valores ótimos do corte laser

Espessura [mm]	1	2	3	4	5
Potência [W]	5500				
Velocidade de Corte [mm/s]	3250				
Pressão [bar]	2				
Foco [mm]	0				

Numa fase posterior este processo poderá ainda ser empregue noutros setores da empresa, por exemplo no oxicorte ou na impressão 3D, de forma a procurar mais possibilidades de otimização.

Referências

- Appelt, D., Duarte, J., Fernandes, A., da Rocha, A., & Perreira, J. (1993). Novas Tecnologias de Corte. Associação Portuguesa das Tecnologias de Conformação Plástica.
- Belforte, D. (2010). Milestones in industrial laser materials processing.
- BOC. (20 de 09 de 2022). BOC. Obtido de BOC: Laser Basics LASERLINE Technical: https://www.boconline.ie/en/images/laser_basics_tcm674-78871.pdf
- Buj-Corral, I., Costa-Herrero, L., & Dominguez-Fernandez, A. (2021). Effect of Process Parameters on the Quality of Laser-Cut Stainless Steel thin Plates.
- Caristan, C. L. (2004). Laser Cutting Guide for Manufacturing.
- Cunha, M. B. (2020). Optimisation of a MEW prototype for mesh implants fabrication. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Dahotre, N. B., & Harimkar, S. P. (2007). Laser Fabrication and Machining of Materials. Springer.
- Dermatology Lasers. (2022). Dermatology Lasers - Laser Physics. Obtido de dermatologylasers: <https://www.dermatologylasers.com/laser-physics/>
- Dias, M. (2015). Proposta de desenvolvimento de uma máquina de corte a laser para facilitar a prototipagem. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
- Edinburgh Instruments. (2022). Edinburgh Instruments CO Laser. Obtido de Edinburgh Instruments: <https://www.edinst.com/products/co-gas-laser-5-2-%CE%BCm-6-0-%CE%BCm/>
- Ferrão, J. M. (2017). Projeto e conceção de um equipamento para gravação de chapa metálica com recurso a laser. Universidade do Minho.
- Figueiredo, M. V., & Fernandes, A. A. (1996). O Método de Taguchi no Planeamento e Análise de Operações de Soldadura. Ingenium.
- Figueiredo, M. V., Fernandes, A. A., & Silva, L. F. (2010). Correlation analysis of MAG robotized welding parameters by the Taguchi technique.
- Fowlkes, W. Y., & Creveling, M. C. (1995). Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development.

- Hashemzadeh, M., Powell, J., & Voissey, K. (2014). Fibre laser piercing of mild steel – The effects of power intensity, gas type and pressure. Elsevier.
- Hecht, J. (Outubro de 2006). Laser. Obtido de Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/technology/laser>
- Hitz, B., Ewing, J., & Hecht, J. (2001). Introduction To Laser Technology. IEEE PRESS.
- Huzynets, A. (2020). Energetic efficiency in laser cutting processes.
- Jarabo, S., & Lavieja, C. (2011). Helium-neon laser: Laboratory experiments on laser and light-matter interaction.
- Laakso, P., Ruotsalainen, S., Pantsar, H., & Penttilä, R. (2009). Relation of laser parameters in color marking of stainless steel.
- Lokesh, S., Niresh, J., Neelakrishnan, S., & Deepak Rahul, S. (2018). Optimisation Of Cutting Parameters Of Composite Material Laser Cutting Process By Taguchi Method.
- Morais, S. (2006). Desenho Técnico Básico 3.
- Mueller, S., Kruck, B., & Baudisch, P. (2013). LaserOrigami: Laser-Cutting 3D Objects.
- Naresh, P. (2021). Laser cutting technique: A literature review. Elsevier.
- Nukon. (2019). Operating Manual.
- Pradhan, A. K., Pattasani, T. P., & Hota, D. K. (2016). Examination of Surface Roughness for Laser Cutting On Acrylic.
- Riveiro, A., Quintero, F., Comesaña, R., Lusquiños, F., del Val, J., & Pou, J. (2011). The Role of the Assist Gas Nature in Laser Cutting of Aluminum Alloys. Physics Procedia.
- Svelto, O. (2010). Principles of Lasers. Springer.
- Taguchi, G., & Konishi, S. (1987). Taguchi Methods Ortogonal Arrays and Linear Graphs.
- VLB Group. (2022). VLB Group. Obtido de VLB Group: <https://www.vlb-group.com/>
- Yusoff, M. B. (2008). Application of Taguchi Method in the Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Turning.

Anexos

ANEXO A: Matrizes utilizadas para o método de Taguchi (Taguchi & Konishi, 1987)

Tabela 17 - Matriz ortogonal L18 de Taguchi

L18 ($2^1 \times 3^7$)								
	A	B	C	D	E	F	G	H
Ensaio 1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ensaio 2	1	1	2	2	2	2	2	2
Ensaio 3	1	1	3	3	3	3	3	3
Ensaio 4	1	2	1	1	2	2	3	3
Ensaio 5	1	2	2	2	3	3	1	1
Ensaio 6	1	2	3	3	1	1	2	2
Ensaio 7	1	3	1	2	1	3	2	3
Ensaio 8	1	3	2	3	2	1	3	1
Ensaio 9	1	3	3	1	3	2	1	2
Ensaio 10	2	1	1	3	3	2	2	1
Ensaio 11	2	1	2	1	1	3	3	2
Ensaio 12	2	1	3	2	2	1	1	3
Ensaio 13	2	2	1	2	3	1	3	2
Ensaio 14	2	2	2	3	1	2	1	3
Ensaio 15	2	2	3	1	2	3	2	1
Ensaio 16	2	3	1	3	2	3	1	2
Ensaio 17	2	3	2	1	3	1	2	3
Ensaio 18	2	3	3	2	1	2	3	1

Tabela 18 - Matriz ortogonal L8 de Taguchi

L8 (2)							
	A	B	C	D	E	F	G
Ensaio 1	1	1	1	1	1	1	1
Ensaio 2	1	1	1	2	2	2	2
Ensaio 3	1	2	2	1	1	2	2
Ensaio 4	1	2	2	2	2	1	1
Ensaio 5	2	1	2	1	2	1	2
Ensaio 6	2	1	2	2	1	2	1
Ensaio 7	2	2	1	1	2	2	1
Ensaio 8	2	2	1	2	1	1	2

A utilização desta matriz permiti-nos analisar algumas interações entre parâmetros, deixando algumas linhas da matriz em branco. Nomeadamente a coluna C é deixada em branco para analisar a interação entre o parâmetro A e B, a coluna E é deixada em branco para analisar a interação entre A e D, e a coluna F para a interação entre os parâmetros A e G.

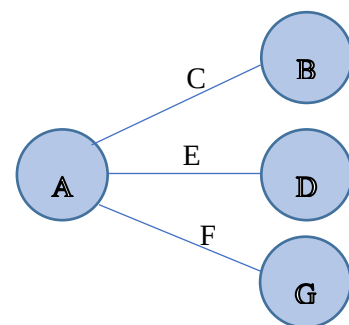


Figura 21 - Interações estudadas pela matriz L8 de Taguchi

ANEXO B: Resultados obtidos por medição de rugosidade

Tabela 19 - Resultados da medição de rugosidade (Ra e Rz) do 2º ensaio

	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Rz 1	Rz 2	Rz 3
Ensaio 1	7.791	9.735	9.935	34.634	41.333	46.908
Ensaio 2	8.118	5.666	5.383	34.617	26.556	24.899
Ensaio 3	9.777	10.521	9.126	41.144	45.311	41.337
Ensaio 4	5.641	7.712	7.945	23.145	33.622	36.856
Ensaio 5	6.247	5.868	4.414	30.205	25.974	22.569
Ensaio 6	6.518	7.317	8.388	35.922	32.891	38.836
Ensaio 7	9.350	9.844	6.870	42.766	43.795	41.695
Ensaio 8	7.734	7.233	6.310	32.085	30.602	27.866

Tabela 20 - Resultados da medição de rugosidade (Ra e Rz) do teste de validação do 2º ensaio

	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Rz 1	Rz 2	Rz 3
Parâmetros ótimos	0,647	0,767	0,711	3,087	4,5	3,568
Parâmetros empresa	1,618	4,632	3,348	7,271	21,801	17,94

Tabela 21 - Resultados da medição de rugosidade (Ra e Rz) do 3º ensaio

	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Rz 1	Rz 2	Rz 3
Ensaio 1	7.791	9.735	9.935	34.634	41.333	46.908
Ensaio 2	8.118	5.666	5.383	34.617	26.556	24.899
Ensaio 3	9.777	10.521	9.126	41.144	45.311	41.337
Ensaio 4	5.641	7.712	7.945	23.145	33.622	36.856
Ensaio 5	6.247	5.868	4.414	30.205	25.974	22.569
Ensaio 6	6.518	7.317	8.388	35.922	32.891	38.836
Ensaio 7	9.350	9.844	6.870	42.766	43.795	41.695
Ensaio 8	7.734	7.233	6.310	32.085	30.602	27.866

ANEXO C: Resultados obtidos através da análise de variância e análise de médias através do software “Minitab”

Tabela 22 - Resposta Ra para cada nível de cada fator, através da análise de médias

Nível	1	2	3
Altura de Corte	6,173	6,922	
Potência	6,365	5,574	7,705
Frequência	5,68	7,33	6,633
Duty	7,377	6,378	5,888
Velocidade de Corte	9,396	5,351	4,897
Pressão	6,532	7,29	5,821
Foco	5,236	6,188	8,22
Espessura	5,152	6,676	7,815

Tabela 23 - Resposta Rz para cada nível de cada fator, através da análise de médias

Nível	1	2	3
Altura de Corte	27,46	32,8	
Potência	27,94	26,62	35,83
Frequência	26,09	35,37	28,94
Duty	34,73	29,08	26,58
Velocidade de Corte	41	26,11	23,28
Pressão	30,45	33,16	26,79
Foco	25,46	28,55	36,38
Espessura	23,44	30,25	36,7

ANEXO D: Instrumentos de medição utilizados



Figura 22 - Micrometros de exteriores com gama de medição de 75 a 100mm (cima) e 0 a 25mm (baixo)



Figura 23 - Rugosímetro disponibilizado pela FEUP para esta dissertação

ANEXO E: Documento construído para análises futuras e continuação do estudo desenvolvido.

Otimização de processo: Corte Laser

Ensaio nº _____
 Material _____
 Espessura _____

	Parâmetros originais	Níveis para ensaio
Velocidade		
Potência		
Pressão		
Foco		

Ensaios a efetuar

	velocidade	potência	pressão	foco
Ensaio 0				
Ensaio 1				
Ensaio 2				
Ensaio 3				
Ensaio 4				
Ensaio 5				
Ensaio 6				
Ensaio 7				
Ensaio 8				

☐

Todos os testes foram concluídos com sucesso

☐

Não há material fundido acumulado excessivamente

Valores ótimos pela análise de médias e de variâncias

Velocidade _____
 Potência _____
 Foco _____
 Pressão _____

Conclusões do ensaio de validação com os valores ótimos
