



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Rui Jorge de Castro Gomes

**DEFINIÇÃO DE OFFSETS A IMPOR EM FUNÇÃO  
DA ESPESSURA, TIPO DE MATERIAL E  
PARÂMETROS DO PROCESSO POR CORTE A  
LASER**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, na área de  
Produção e Projeto, orientada pelo Professor Doutor Carlos Miguel Almeida  
Leitão e pelo Engenheiro Tiago Barbosa apresentada ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de  
Coimbra**

setembro de 2023

Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser

---

1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

**Definition of offsets to be imposed based on thickness, material type, and laser cutting process parameters.**

Autor

**Rui Jorge de Castro Gomes**

Orientadores

**Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão**

**Eng.º Tiago Barbosa**

Júri

Presidente	<b>Professor Doutor David Gomes Andrade</b> Investigador Doutoramento da Universidade de Coimbra
Orientador	<b>Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais	<b>Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal</b> Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria <b>Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão</b> Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Lisboa
--------	---

Colaboração Institucional

---



Quantal S. A

Coimbra, julho, 2023



*“You don't have to be great to start, but you have to start to be great.”*

Zig Ziglar, 1926-2012



## Agradecimentos

Para começar gostava de agradecer à empresa Quantal S.A. e a todos os colaboradores que, direta ou indiretamente, tornaram possível a realização desta dissertação e por toda a disponibilidade mostrada desde o início.

Queria, também, agradecer aos meus orientadores da Universidade de Coimbra que sempre se mostraram dispostos a ajudar. Sem a orientação deles, não teria conseguido alcançar a profundidade e qualidade de análise necessárias para concluir este trabalho. As suas sugestões e críticas construtivas foram fundamentais para o meu sucesso académico, e agradeço profundamente todo o apoio e incentivo que recebi ao longo deste processo. Também um agradecimento ao Sr. Fernando Bernardes, pela ajuda e boa vontade que demonstrou. À Universidade de Coimbra, nomeadamente ao Departamento de Engenharia Mecânica que durante estes anos me fez crescer tanto a nível académico como pessoal.

Aos meus pais e ao meu irmão que me apoiaram em todos os momentos, quero que saibam que sem a vossa ajuda nada disto era possível.

A todos os amigos que Coimbra me trouxe, quero-vos agradecer de todas as vivências e histórias que levo para a vida. Também aos meus amigos de Vila do Conde que me incentivaram e aconselharam em muitas ocasiões.

À Daniela, que esteve comigo em todos os momentos difíceis e nunca me deixou desanimar. Uma grande parte do meu crescimento e sucesso deve-se a ti e por isso estar-te-ei eternamente grato.

Por fim, à *Trap* onde passei muitos bons momentos com amigos que levo para a vida e onde aprendi que “A vida é feita para os jovens”.

Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser

---

## Resumo

O processo de corte a laser é um dos mais utilizados atualmente tendo um papel muito importante em contexto industrial. Trata-se de um processo que normalmente dá início da cadeia de fabrico de um componente sendo, por isso, seguido de outros processos de fabrico. De facto, por garantir alto rigor dimensional após o corte para a generalidade das aplicações evita etapas intermédias de ajuste dimensional, otimizando tempos de produção. Porém, noutras situações, como o corte de um material com refletividade mais elevada ou de chapas com uma espessura superior, começam-se a notar desvios dimensionais maiores relativamente ao que é inicialmente projetado, para além da deterioração superficial advinda do uso de novos parâmetros de corte.

Com o objetivo de diminuir os desvios dimensionais, como primeira metodologia, estes podem ser tratados como offsets e ser corrigidos em sede de dado de entrada do equipamento de corte, ou seja, a intervenção poderia ser feita a nível do ficheiro CAD, com dimensões corrigidas para a espessura que se pretendesse cortar. Porém, tendo em conta as especificidades do processo e os parâmetros de corte, como a distância focal, poderá indicar que o corte não é perfeitamente perpendicular à superfície e, nesse sentido, a primeira metodologia terá de ser afetada de fatores de correção.

O objetivo desta dissertação é assim aferir qualitativa e quantitativamente a severidade do desvio dimensional promovida pelo corte a laser. Neste sentido os trabalhos foram efetuados vários cortes em chapa de aço inoxidável AISI 304, para diferentes condições de corte e espessura de chapa.

Após o corte, procedeu-se a uma análise metrológica pormenorizada das superfícies de corte, aferindo o desvio dimensional entre cortes semelhantes, entre topo e base das chapas e, através de técnicas de digitalização de superfícies, da morfologia superfícies cortadas.

Tendo em conta as superfícies de corte, nomeadamente das chapas com mais espessura, concluiu-se que uma definição de offsets baseados somente nos parâmetros de corte, não será a abordagem mais adequada para a mitigação do desvio dimensional. De facto, dentro dos parâmetros estudados, não foi possível encontrar nenhum parâmetro que mitigasse totalmente o desvio dimensional ao longo da espessura, sendo pior para as chapas

de maior espessura. Por último, tendo em conta os resultados obtidos, foi tirada uma conclusão no que toca aos parâmetros do laser e espessura do material que mais interesse teriam para a empresa Quantal, S.A., onde decorreram os trabalhos da presente dissertação. Este último facto reforça que é necessário determinar um fator corretivo mais complexo, que deverá intervir não só a nível geométrico como em parâmetros de corte.

**Palavras-chave:** Perpendicularidade do corte, Qualidade de corte, Parâmetros do Laser, Chapa de Metal, Laser Fibra, Fabricação Subtrativa.

## Abstract

The laser cutting process is one of the most commonly used methods today, playing a crucial role in industrial contexts. It is a process that typically initiates the manufacturing chain of a component, followed by other manufacturing processes. In fact, by ensuring high dimensional accuracy after cutting for most applications, it avoids intermediate dimensional adjustments, thereby optimizing production times. However, in other situations, such as cutting materials with higher reflectivity or thicker sheets, larger dimensional deviations are observed compared to the initially designed dimensions, along with surface deterioration resulting from the use of new cutting parameters.

In order to reduce dimensional deviations, as a first methodology, they can be treated as offsets and corrected in the input data of the cutting equipment, meaning that the intervention could be done at the CAD file level, with corrected dimensions for the desired thickness to be cut. However, considering the specifics of the process and cutting parameters, such as focal distance, it may indicate that the cut is not perfectly perpendicular to the surface, and in this sense, the first methodology needs to be affected by correction factors.

The objective of this dissertation is to qualitatively and quantitatively assess the severity of the dimensional deviation caused by laser cutting. In this regard, several cuts were made on AISI 304 stainless steel sheets under different cutting conditions and sheet thicknesses.

After the cutting process, a detailed metrological analysis of the cutting surfaces was carried out, measuring the dimensional deviation between similar cuts, between the top and bottom of the sheets, and using surface scanning techniques to assess the morphology of the cut surfaces.

Taking into account the cutting surfaces, particularly for thicker sheets, it was concluded that defining offsets based solely on cutting parameters is not the most suitable approach for mitigating dimensional deviations. In fact, within the studied parameters, it was not possible to find any parameter that completely mitigated the dimensional deviation throughout the thickness, and the situation was worse for thicker sheets. Finally, based on the obtained results, conclusions were drawn regarding the laser parameters and material

thickness that would be of most interest to Quantal, S.A., the company where this dissertation was conducted. This further reinforces the need to determine a more complex corrective factor that should intervene not only geometrically but also in cutting parameters.

**Keywords:** Cutting perpendicularity, Cutting Quality, Laser Parameters, Sheet Metal, Fibre Laser, Subtractive Manufacturing.

---

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Siglas e Acrónimos .....	xiii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Corte a Laser .....	3
2.1.1 Laser de CO <sub>2</sub> .....	5
2.1.2 Laser de Diodos .....	6
2.1.3 Parâmetros operacionais do corte a Laser .....	7
2.1.4 Influência dos parâmetros de processo na superfície de corte .....	15
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	19
3.1 Ensaio de corte a laser .....	19
3.1.1 Geometria do componente .....	19
3.1.2 Material .....	20
3.1.1 Equipamento .....	20
3.1.2 Parâmetros de Corte .....	21
3.2 Métodos e Equipamentos de Análise .....	22
3.2.1 Metodologia .....	22
3.2.2 Amostragem .....	23
3.2.3 Métodos de Medição e Análise .....	24
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	27
4.1 Caracterização dimensional do corte .....	27
4.1.1 Parâmetros-padrão .....	27
4.1.2 Corte com variação paramétrica .....	29
4.2 Influência dos Parâmetros na superfície resultante do corte .....	32
5 CONCLUSÕES .....	41
6 TRABALHOS FUTUROS .....	43
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45

Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema do processo de corte a laser [4].	3
Figura 2.2. Representação do desvio ao longo da espessura [6].	4
Figura 2.3. Esquema do funcionamento de um laser de CO <sub>2</sub> [10].	6
Figura 2.4. Esquema do funcionamento de um laser de fibra [16].	7
Figura 2.5. Comportamento do material com a diminuição da velocidade [25].	9
Figura 2.6. Representação do conceito de ponto focal [6].	10
Figura 2.7. Exemplo de corte com foco positivo [24].	11
Figura 2.8. Exemplo de corte com foco negativo [24].	11
Figura 2.9. Exemplo de corte com foco na face superior do material [24].	12
Figura 2.10. Influência da pressão do gás no corte. (a) 20bar (b) 6bar [24].	14
Figura 2.11. Corte com estrias regulares a) e irregulares b).	15
Figura 2.12. Representação da zona afetada termicamente.	16
Figura 3.1. Modelo 3D (a), Dimensões (b) e componente obtido após corte (c).	19
Figura 3.2. Equipamento TruLaser 5030 [43].	20
Figura 3.3. Não conformidade resultante da indevida seleção de parâmetros. Dificuldade em cortar (a) e má qualidade do corte (b).	22
Figura 3.4. Esquema de amostragem.	23
Figura 3.5. Microscópio de medição utilizado.	24
Figura 3.6. Disposição das câmaras e amostra (a); utilização do sistema ARAMIS (b).	25
Figura 3.7. Lupa Zeiss STEMI 2000C.	25
Figura 3.8. Organização das dimensões realizadas.	26
Figura 4.1. Dimensões dos cortes realizados em condições padrão em chapas de 4mm (a e b) e 8mm (c e d).	28
Figura 4.2. Dimensões dos rasgos, medidas nas superfícies superiores (a e b) e inferiores (c e d) dos cortes realizados em chapas de 4mm.	29
Figura 4.3. Dimensões dos rasgos, medidas nas superfícies superiores (a e b) e inferiores (c e d) dos cortes realizados em chapas de 8mm.	30
Figura 4.4. Desvios médios nas chapas de 4mm.	32
Figura 4.5. Mapas topográficos dos cortes realizados para as várias condições em chapa de 4mm a) P4, b) P4_V15, c) P4_F1,5.	33
Figura 4.6. Comparação de perfis de corte.	33
Figura 4.7. Acabamento da superfície de corte: a) P4; b) P4_F1.5; c) P4_V15.	34

Figura 4.8. Detalhe da largura da ZAT nas chapas de 4 mm a) P4; b) P4_F1.5; c) P4_V15. .....	34
Figura 4.9. Medições da zona afetada termicamente. ....	35
Figura 4.10. Comparação de perfis de corte em chapas de 8 mm.....	36
Figura 4.11. Mapas topográficos dos cortes realizados para as várias condições em chapa de 8 mm a) P8, b) P8_F3, c) P8_V4, d) P8_Pr4, e) P8_Pr8. ....	37
Figura 4.12. Superfície de corte a) P8, b) P8_F3, c) P8_V4, d) P8_Pr4, e) P8_Pr8.....	38
Figura 4.13. Medições zonas afetadas termicamente. ....	39
Figura 4.14. Detalhe da largura da ZAT nas chapas de 8 mm a) P8; b) P8_F3; c) P8_V4; d) P8_Pr4; e) P8_Pr8.....	39

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do material AISI304 (%pond.).....	20
Tabela 2. Propriedades mecânicas do material.....	20
Tabela 3. Parâmetros de corte padrão e parâmetros variados.....	21

Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser

---

## **Siglas e Acrónimos**

CAD – *Computer-Aided Design*

CAM - *Computer Aided Manufacturing*

CNC – *Computer Numerical Controlled*

DXF – *Drawing Exchange Format*

ZAT – *Zona Afetada Termicamente*

Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser

---

# 1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação teve como motivação, o facto de se tratar de um processo de fabrico muito abrangente, muito utilizado atualmente nas maiores indústrias, e com algum potencial para ser estudado e otimizado de modo a visar os interesses para o meio de produção em questão. Por outro lado, foi também uma oportunidade para estabelecer um primeiro contacto com uma empresa reconhecida internacionalmente como a Quantal S.A. que, sendo uma empresa muito inovadora na sua área e com muito equipamento de topo, mostrou ser uma boa escolha.

Atualmente, o processo de corte a laser é um dos mais utilizados em muitos contextos industriais, devido à rapidez e precisão que dispõe. Este processo pode ser utilizado em diversos materiais com diferentes geometrias e espessuras e ajustado para a finalidade pretendida. O facto de ser, geralmente, o primeiro processo para a conceção de um componente, é vantajoso que seja o mais preciso possível. Por outro lado, dado que se trata de um processo muito utilizado para o corte de espessuras elevadas, onde o erro associado é notório, é importante estudar e implementar um procedimento para que este desvio seja aliviado, neste caso, para chapas de aço inoxidável AISI 304. Sendo um dos processos mais utilizados na empresa Quantal S.A. é do interesse da mesma que se trate de um processo estudado e otimizado para a produção onde está inserido.

Tendo isto em conta, apesar do processo de corte a laser seja muito preciso e eficaz, há vários parâmetros que podem ser ajustados de modo a otimizar o processo requerido. Os parâmetros estudados nesta dissertação foram a potência do laser, distância focal, velocidade de corte e pressão de gás. Para isto, foi fundamental proceder-se a ensaios de modo a relatar qual a influência destes parâmetros no que toca aos desvios relativamente ao ficheiro DXF (Drawing Exchange Format), ao acabamento de cada corte, criação de rebarbas, zonas afetadas termicamente, etc. Dito isto, o objetivo desta dissertação, passa por estudar a influência do *input* no equipamento, neste caso parâmetros de corte e ficheiro DXF e registar os resultados nas vertentes do corte já mencionadas.

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo o capítulo 1 uma introdução do estudo feito e a contextualização do processo estudado. Seguidamente, foi feita uma revisão sobre o processo de corte a laser, sendo maioritariamente focado nos

parâmetros intrínsecos ao mesmo. No capítulo seguinte é descrito todo o procedimento experimental, sendo identificados os equipamentos utilizados neste estudo, assim como a geometria escolhida e todo o processo para que fosse possível analisar as amostras de forma coerente. No capítulo 4 foram analisadas todas as amostras obtidas, sendo primeiramente feita uma análise visual, seguida de uma análise ao perfil de corte obtido através do DIC (Digital Image Correlation). Por fim, as conclusões desta dissertação estão inseridas no capítulo 5.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Corte a Laser

A fabricação através de CNC (*Computer Numerical Controlled*) remonta aos anos 40 quando foi introduzida por John Parsons e desde aí está em constante evolução para que vá de encontro às exigências modernas. É uma técnica que possibilitou a automatização de vários processos, a capacidade de produção de peças mais complexas [1]. É um processo muito utilizado em vários setores da indústria nomeadamente na indústria automóvel, aeroespacial, aeronáutica, etc [2].

Ao longo da última década, o processo de corte a laser, representado na Figura 2.1 veio a tornar-se um dos mais refinados disponíveis atualmente. Isto resultou também em tempos de produção mais baixos e maior precisão na conceção de peças [2]. Este processo é muito atrativo no que toca ao corte vários materiais tais como aço inoxidável, aço carbono, cerâmicos, polímeros, etc [3]. Trata-se de um processo sem contacto que engloba os fenómenos de aquecimento, fusão e vaporização do material a cortar. O material é cortado através da interação do laser gerado que, através do foco que interage no material, funde o mesmo e seguidamente é expelido através do gás auxiliar [1].

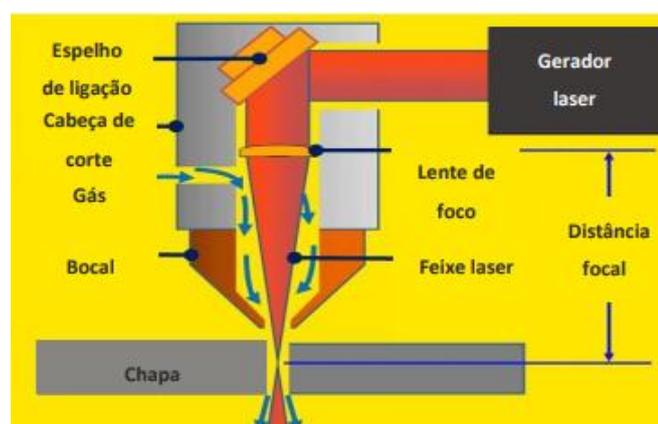


Figura 2.1. Esquema do processo de corte a laser [4].

O laser gerado consiste num feixe coerente e amplificado de radiação eletromagnética que, contrariamente à luz comum, possui fótons com a mesma frequência, comprimento de onda, estado energético e direção [5].

O desafio foi, desde cedo, melhorar o rendimento do processo através do aumento da velocidade do corte sem que fosse comprometida a qualidade do laser. Trata-se de um processo sem contacto, o que resulta numa independência total da dureza e resistência do material a cortar, isto possibilita que o corte se torne mais fácil [1].

Apesar de ser um dos processos de eleição no meio industrial, ainda existem algumas limitações associadas. Uma das maiores desvantagens associadas a este processo é o facto do corte não ser perfeitamente perpendicular [6]. Isto pode remeter-se a vários fatores tais como:

- Lente utilizada;
- Ponto focal;
- Potência do Laser;
- Velocidade de Corte;
- Gás auxiliar;
- Espessura.

No entanto, mediante os parâmetros do laser utilizados, existe margem para que este desvio ao longo da espessura, presente na Figura 2.2 seja minimizado.

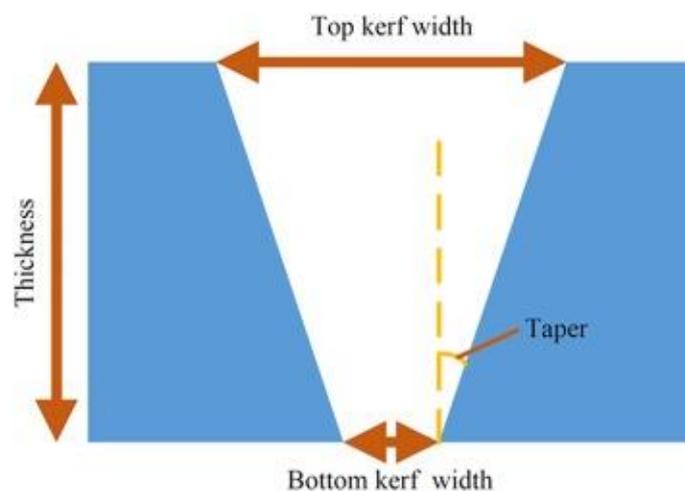


Figura 2.2. Representação do desvio ao longo da espessura [6].

Atualmente, os processos de corte mais relevantes na indústria podem ser divididos em 2 vertentes: Laser de CO<sub>2</sub> e Laser de diodos.

### **2.1.1 Laser de CO<sub>2</sub>**

O laser de CO<sub>2</sub> é, atualmente, muito utilizado na indústria e é indicado para o corte de diversos materiais, tais como o aço carbono, aço inoxidável, alguns polímeros, etc. Apesar de ser uma vertente de laser ainda muito utilizado, quando comparado com o laser de fibra apresenta algumas desvantagens, podendo-se destacar a menor velocidade de corte e o custo significativamente mais elevado.

Este tipo de laser (Figura 2.3) consiste numa mistura de dióxido de carbono, hélio, nitrogénio e hidrogénio, sendo o laser gerado num meio gasoso. O processo consiste em selar esta mistura de gás num tubo de vidro e fazer passar por ele uma corrente que reage com as partículas de CO<sub>2</sub> aumentando, assim, a sua energia, libertando fotões e originando o laser [7]. Seguidamente, o laser é refletido repetidamente nos espelhos presentes no tubo até ter energia suficiente para sair do mesmo. Após isto, para que o laser interaja com o material, é necessário um sistema de foco que guie o feixe até ao ponto de interação. A partir daqui o laser é direcionado nas direções requeridas a partir de espelhos situados na cabeça de foco do laser, até chegar à lente focal onde é concentrado [8]. Esta lente é responsável por focar o feixe até ao ponto de interação com o material, sendo um componente consumível e crucial do equipamento, é necessário haver uma manutenção e substituição cuidada do mesmo para que a qualidade do corte não seja comprometida [4].

Devido ao comprimento de onda associado a este tipo de laser, na gama [9300; 10600] nm, é um processo que, quando comparado com o laser de diodos, não é o mais indicado para o corte de materiais tais como o alumínio ou o aço inoxidável. Isto deve-se ao facto de comprimentos de onda desta gama serem demasiado elevados para que sejam absorvidos por materiais mais refletivos [9].

Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser

---

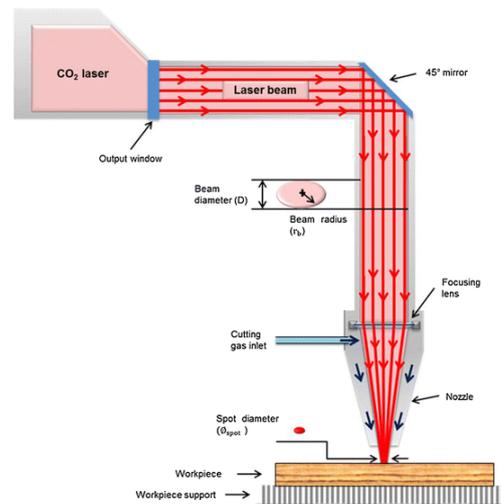


Figura 2.3. Esquema do funcionamento de um laser de CO<sub>2</sub> [10].

### 2.1.2 Laser de Diodos

Este tipo de laser é o mais recente no que toca à sua introdução na indústria, apesar de ter muitas semelhanças para com o laser de CO<sub>2</sub>, este apresenta alguns detalhes que o tornam mais ou menos vantajoso mediante a produção em que é inserido. É uma vertente de laser que apresenta um alto rendimento, excelentes velocidades de corte e qualidade do feixe [11].

O laser de diodos trata-se de um laser em que uma fibra ótica é dopada com elementos químicos raros como érbio, itérbio, etc.[8]. Resumidamente, este tipo de laser consiste na transformação de eletricidade em fotões. Para isto são utilizados díodos com semicondutores com cargas opostas que, com a reação entre eles, libertam um eletrão sob a forma de fotão repetidamente [12]. Seguidamente, para que a luz seja focada para um feixe, esta é refletida várias vezes no núcleo da fibra. Sendo este núcleo constituído por fibra, um elemento raro, quando a luz é refletida, os seus fotões interagem com as partículas de sílica e aumentam o seu nível de energia [12].

Tal como os lasers de CO<sub>2</sub>, lasers de diodos também utilizam espelhos no seu processo, no entanto, estes estão localizados nas extremidades do cabo de fibra e têm a função de aumentar a eficiência do laser e impedir perdas contrariamente aos de CO<sub>2</sub> que os utilizam para guiar o feixe [13].

Uma das vantagens mais notórias desta categoria de laser é o facto de o laser ser gerado e guiado por via de um meio inerte, o que facilita a chegada ao material a cortar. É também

uma vertente de laser muito utilizada no corte de materiais refletivos devido ao seu comprimento de onda que geralmente é de aproximadamente  $1\mu\text{m}$  que difere sempre mediante o elemento raro presente no processo [14].

O laser de diodos, Figura 2.4, é o mais indicado para o corte de materiais mais refletivos. O aço inoxidável e o alumínio são dois dos materiais que o processo de corte a laser apresenta maiores dificuldades. Isto deve-se ao facto de serem materiais com alta condutividade térmica, baixa absorção de laser e alta refletividade [3]. Devido a estas características, será um material que refletirá o feixe e que transferirá o calor da parte irradiada muito facilmente, o que leva à necessidade de haver um ajuste nos parâmetros de corte utilizados [15]. Esta será a vertente de laser utilizada no estudo desta dissertação.

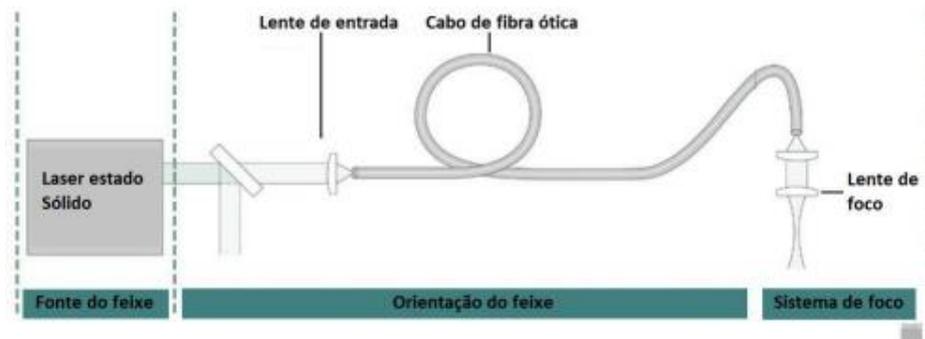


Figura 2.4. Esquema do funcionamento de um laser de diodos [16].

### 2.1.3 Parâmetros operacionais do corte a Laser

Tal como outros processos de fabrico, o processo de corte a laser dispõe de alguns parâmetros que tipicamente podem ser alterados de modo a otimizar o corte da peça em questão [17]. Estes parâmetros têm influência em vários aspetos do processo do corte, entre estes pode-se destacar os mais relevantes tais como a zona afetada termicamente, a largura do corte e a rugosidade [3].

Entre estes podem ser destacados os mais relevantes atualmente:

- Potência do laser;
- Velocidade de corte;
- Ponto focal;
- Pressão auxiliar.

### **2.1.3.1 Potência do Laser**

Nesta dissertação será tido em conta a potência associada ao equipamento. Geralmente associado à potência, no processo de corte a laser pode-se também destacar a intensidade, normalmente, expressa em Watts por milímetro quadrado [ $\text{W}/\text{mm}^2$ ] [18].

Para que o corte da peça em questão seja o mais preciso, é necessário ter em conta alguns fatores como o tipo de material e a sua espessura, os quais têm que estar em conformidade com a potência a utilizar [19].

Em estudos anteriores [20] foi estudado o comportamento do material a cortar com a variação deste parâmetro. No que toca ao desvio dimensional chegou-se à conclusão que este diminui com o aumento da potência do laser. Este comportamento deve-se ao facto de que uma maior potência do laser fornece mais energia ao material a cortar. Consequentemente, é criado uma fusão de baixa densidade que fornece uma separação mais suave do material sólido. Na interface sólido-líquido, com a presença de forças viscosas, há uma maior aderência entre o material fundido e a matriz. Isto leva à formação de uma camada fina que volta a solidificar, o que resulta numa minimização do desvio dimensional. Dado que o equipamento presente na empresa, não permite aumentar a potência do laser, serão feitos apenas testes com diminuição da mesma.

Este parâmetro tem também uma influência significativa na perpendicularidade do corte. Recorrendo a [6] pode-se retirar que, com o aumento ponderado deste parâmetro, verifica-se um aumento da perpendicularidade do corte. Isto pode remeter-se ao facto de com o aumento da potência há um aumento da capacidade de o calor penetrar toda a espessura do corte [21].

### **2.1.3.2 Velocidade de Corte**

A velocidade de corte também é um parâmetro importante no que toca a este processo. É, também, um fator influenciado pelo material e pela espessura da peça a cortar, sendo que espessuras maiores requerem uma diminuição na velocidade de corte [19].

Geralmente, materiais com alta condutividade térmica requerem uma velocidade de corte menor, o que proporciona, também, uma melhor qualidade de corte [22].

A variação da velocidade de corte tem um efeito direto no desvio dimensional, formação de rebarbas e largura da ZAT (Zona Afetada Termicamente), pode-se observar na Figura 2.5 a influência da diminuição da velocidade (esquerda para a direita) nestas vertentes. Estudos feitos anteriormente defendem que a diminuição deste parâmetro tem um efeito positivo nomeadamente na diminuição do desvio dimensional. Isto acontece devido ao facto de que, com a diminuição da velocidade de corte, o laser está em contacto com o material durante mais tempo. Este aumento no tempo de contacto provoca também um aumento do calor absorvido por unidade de área o que resulta numa boa difusão térmica. Isto leva a uma fusão estável do material o que diminui o erro associado ao corte [20].

Relativamente à perpendicularidade do corte, estudos anteriores utilizando aços de alta resistência, defendem que com o aumento deste parâmetro, há uma redução do tempo de contacto do laser com o material. Isto resulta numa redução na absorção do calor por parte do material, não havendo penetração total e consequentemente uma perda de perpendicularidade de corte [21].

No que diz respeito à formação de rebarba, estudos defendem que o aumento da velocidade de corte tem uma influência positiva neste aspeto, originando uma diminuição da mesma [23]. No que toca à qualidade de corte e ZAT, o aumento da velocidade de corte fornece vantagens notórias. Neste caso, há uma diminuição da ZAT e geralmente uma rugosidade menor [24].

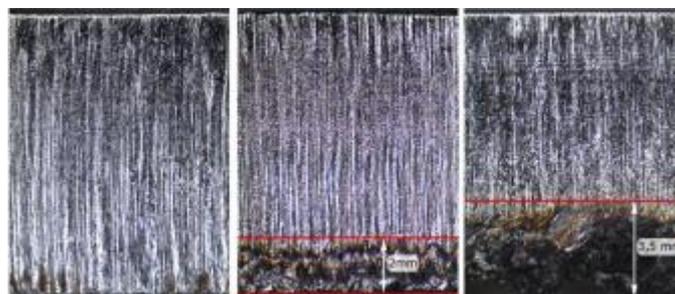


Figura 2.5. Comportamento do material com a diminuição da velocidade [25].

### 2.1.3.3 Ponto Focal

A distância focal é um parâmetro relevante no processo de corte a laser. Esta distância consiste no comprimento entre a lente e a superfície superior do material a ser cortado. No processo de corte a laser, temos ainda a posição do ponto focal, representado na Figura 2.6.

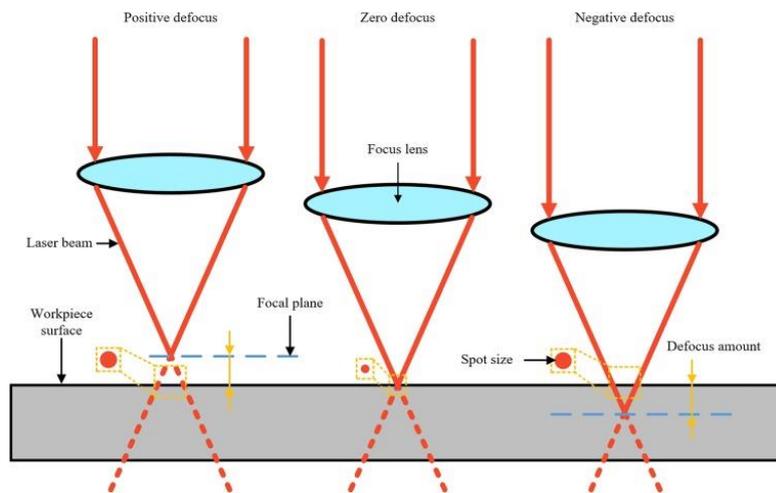
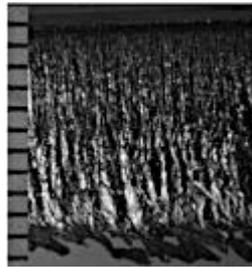


Figura 2.6. Representação do conceito de ponto focal [6].

- Foco positivo

Quando o ponto focal está posicionado acima da superfície superior do material a cortar. Isto leva a que o feixe tenha um diâmetro maior quando atinge o material, o que resulta numa dispersão de energia ao longo do corte.

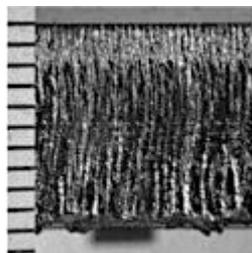
Geralmente, este tipo de foco é utilizado para o corte a laser utilizando oxigénio, no entanto, se o ponto focal estiver situado muito acima da superfície a energia que chega ao material pode não ser suficiente para o corte ser feito com qualidade [22]. Quando se trata do corte de aço inoxidável, não é recomendado utilizar o foco acima da face superior do material dado que geralmente dá origem a uma má qualidade no corte e com rugosidades superiores ao ideal (Figura 2.7) [24].



**Figura 2.7.** Exemplo de corte com foco positivo [24].

- Foco negativo

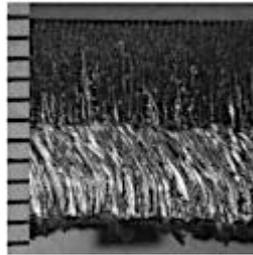
Ocorre quando o foco do feixe está situado dentro da peça a ser cortada. Isto acontece maioritariamente quando o corte é feito com azoto ou ar comprimido como gás auxiliar. Tomando a Figura 2.8 como exemplo, quando este tipo de foco é escolhido obtém-se um corte mais estreito na superfície inferior do material e há uma maior fluidez do material fundido. Esta situação é a mais utilizada para o corte de aço inoxidável, geralmente é escolhido um ponto focal a mais de meia espessura da peça [17].



**Figura 2.8.** Exemplo de corte com foco negativo [24].

- Foco na face superior do material

Nesta situação, o foco está situado na superfície superior do material e é o mais indicado para cortes com precisão de chapas finas. No entanto, quando estamos perante uma chapa de espessuras superiores, torna-se uma opção pouco viável devido ao acabamento que resulta (Figura 2.9) [24].



**Figura 2.9.** Exemplo de corte com foco na face superior do material [24].

A variação deste parâmetro consiste em alterar a distância entre o foco do laser e o material a ser cortado. A imposição de uma distância focal tem como consequência uma modificação nas características finais do corte [22].

Em estudos anteriores, verificou-se que os melhores resultados de desvio dimensional são obtidos quando o ponto focal está situado a mais de meia espessura da peça. Isto deve-se ao facto de, neste caso, a posição do ponto focal levar a uma boa distribuição de temperatura ao longo do corte o que resulta numa geometria com pouco erro dimensional [20].

Por outro lado, relativamente à precisão do corte ao longo da espessura, há uma vantagem notória quando o foco é aproximado para a face superior do material a cortar. Isto deve-se ao facto de o feixe diminuir o diâmetro de incisão no material o que permite obter mais energia por área, o que se traduz num foco de energia mais pequeno aumentando, assim, a perpendicularidade do corte associado [6].

#### **2.1.3.4 Gás auxiliar**

O gás auxiliar é um parâmetro bastante importante e que influencia significativamente o corte de uma determinada peça. Este parâmetro é crucial em algumas vertentes do processo de corte, de destacar: [26]

- Ajudar a remover a escória proveniente do processo;
- Arrefecer a superfície da peça e reduzir a zona afetada termicamente;
- Arrefecer a lente.

Pode-se distinguir algumas propriedades do gás tais como a pressão, a pureza e o tipo de gás que estamos perante.

Para o processo de corte a laser, são tipicamente utilizados dois tipos de gás:

- Oxigénio

Devido à sua reatividade, o oxigénio é considerado como um gás ativo e é muitas vezes utilizado quando se trata de aços macios e aços carbono. Maioritariamente utilizado quando se trata de uma peça de aço carbono. Tem a capacidade de aumentar a eficiência de corte. Este aumento deve-se ao facto de o oxigénio reagir com o material a cortar originando um aumento de energia [27].

Contrariamente ao que acontece com o corte utilizando gases inertes, quando o gás auxiliar é oxigénio, o processo passa a ser por corte de chama, onde a reação do material com o oxigénio gera uma elevada quantidade de energia. Neste tipo de processo, o gás utilizado passa a ter como função não só a expulsão do material, mas também por reagir com a peça a cortar [28].

- Azoto

Para o corte de aço inoxidável AISI 304, o gás mais indicado para o corte é o azoto. Quando este gás é utilizado para o corte, estamos perante um corte por fusão, onde toda a energia requerida para o corte é proveniente do laser [29].

O uso do azoto como gás auxiliar de corte é o mais utilizado quando o material a cortar se trata de aços inoxidáveis e ligas de alumínio. Ao contrário do oxigénio, o azoto é um gás inerte. Isto influencia significativamente o processo de corte na medida em que, por não haver qualquer tipo de reação entre o gás e a peça, não existe um aumento de energia [30]. Deste modo, é necessário que a potência do laser e a pressão do gás sejam superiores às praticadas no corte com oxigénio como gás auxiliar.

O corte com azoto envolve algum rigor no que toca à pureza do mesmo. Dado que, quando o azoto é utilizado, geralmente o objetivo é um bom acabamento, sendo que a presença de oxigénio pode comprometer este objetivo. Posto isto, é crucial que a pureza do gás seja, no mínimo, de 99.8% [3].

A influência deste parâmetro no processo de corte a laser, baseado em estudos anteriores, é que com a diminuição da pressão do gás haverá um menor desvio dimensional. Este fenómeno deve-se ao facto de, com o aumento da pressão do gás há um aumento da turbulência no corte, a sua influência é ainda mais notória quando estamos perante variações de geometria abrupta [20].

No que toca ao desvio ao longo da espessura do material, o aumento da pressão do gás auxiliar, quando se trata de um gás inerte, resulta num aumento deste ângulo. Isto pode-se remeter ao facto de, com o aumento da pressão, há uma diminuição do calor que interage com a superfície inferior do corte diminuindo, assim, a capacidade de o material absorver energia do feixe [21]. Relativamente à superfície de corte, o aumento da pressão de gás, até certo ponto, resulta numa qualidade superior [31] e uma melhor organização no padrão de estrias [24]. Quando a pressão é aumentada para níveis exagerados, verifica-se uma desorganização muito superior ao desejável (Figura 2.10) havendo, assim, uma necessidade de estudar a pressão ideal para o material em questão. No que diz respeito à rebarba, o aumento deste parâmetro resulta numa diminuição da mesma devido à maior capacidade de expelir o material removido [32]. Este parâmetro tem, ainda, uma influência na ZAT. Sendo a ZAT uma zona onde, apesar de não se verificar fusão do material, a sua exposição à energia fornecida pelo feixe, leva a uma alteração da sua microestrutura um aumento na pressão do gás traduz-se numa diminuição da mesma quando se trata de um gás inerte [33].

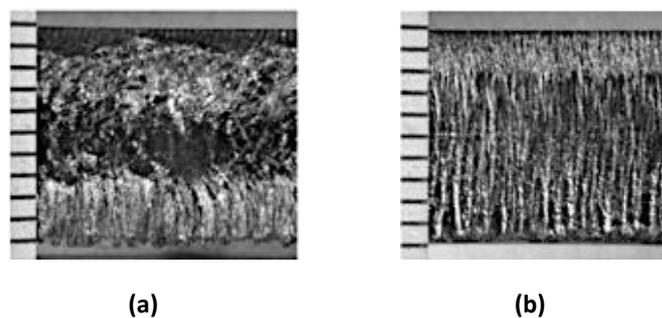


Figura 2.10. Influência da pressão do gás no corte. (a) 20bar (b) 6bar [24].

## 2.1.4 Influência dos parâmetros de processo na superfície de corte

### 2.1.4.1 Mecanismo de Formação de Estrias

A formação de estrias, representadas na Figura 2.11, refere-se às linhas presentes na frente de corte. Estas linhas são uma consequência direta da influência da duração e frequência do feixe. Este padrão de estrias está também relacionado com a rugosidade da superfície de corte [28]. A maior parte dos autores defendem que estas linhas são uma consequência da variação de material fundido ao longo do corte [34]. De notar que, com o aumento da espessura, há uma tendência para que estas estrias sejam cada vez mais notórias e irregulares [35].



Figura 2.11. Corte com estrias regulares a) e irregulares b)

### 2.1.4.2 Zona Afetada Termicamente (ZAT)

Tal como foi mencionado anteriormente, o processo de corte a laser fornece altos níveis de energia ao material a cortar, no entanto, verifica-se uma zona na qual não há qualquer tipo de fusão ou vaporização, designada por zona afetada termicamente, exemplificada na Figura 2.12. Apesar de ser um dos processos que origina uma das menores ZAT, ainda assim é importante registar a sua influência [37].

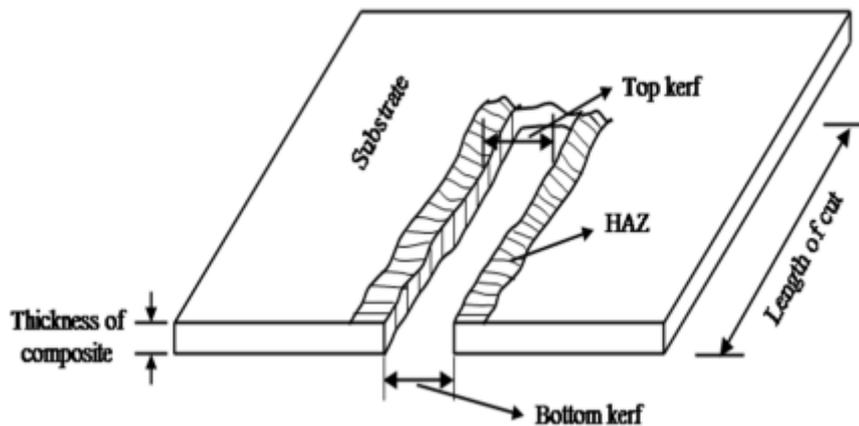


Figura 2.12. Representação da zona afetada termicamente.

O processo de corte a laser, trata-se de um processo que leva o material a temperaturas muito elevadas, sendo superiores ao seu ponto de fusão. Este ciclo de aquecimento e arrefecimento é distinto de qualquer outro processo de tratamento ao qual o material foi previamente exposto. Isto leva a que o material em questão sofra uma mudança na sua microestrutura [38]. Este fenómeno, devido a estas alterações, pode levar a alguns efeitos negativos, nomeadamente ao aparecimento de fissuras na superfície, redução da resistência à tração, etc. [39].

O tamanho da ZAT está associado à difusividade térmica, esta pode-se relacionar diretamente com a condutividade térmica, densidade e calor específico do material a utilizar e com a quantidade de energia que é transmitida para o mesmo. No que toca ao processo em si, uma exposição mais prolongada ao feixe reflete-se numa ZAT maior [40]. Relativamente aos materiais, os que apresentam uma alta difusividade têm a capacidade de arrefecer rapidamente, esta capacidade traduz-se num ZAT reduzida, contrariamente ao que se verifica em materiais com baixa difusividade [41].

No que toca aos parâmetros do laser, estudos anteriores defendem que estes têm também influência na ZAT nomeadamente a velocidade de corte que, tipicamente, quando é aumentada verifica-se uma diminuição da ZAT [42][1]. Por outro lado, no que toca à influência da potência do laser, estudos anteriores [39] revelam que um aumento na potência do processo origina uma ZAT superior o que muitas vezes é necessário para que o corte seja concretizado [40].

Pode-se ainda relacionar a posição do ponto focal com a ZAT, sendo que, a aproximação do mesmo à superfície superior, vai originar uma ZAT maior. Isto remete-se ao facto de, com o posicionamento do ponto focal a mais de meia espessura, há um aumento da fenda de corte. Consequentemente, há menos dificuldade para o gás remover o material fundido, minimizando assim a penetração de calor no material e consequentemente a ZAT. O mesmo acontece com o aumento da pressão de gás e consequente aumento da capacidade de arrefecer a superfície de corte [40].

Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser

---

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Ensaaios de corte a laser

##### 3.1.1 Geometria do componente

No âmbito do presente estudo considerou-se uma geometria incluída dos planos futuros de peças a fabricar na empresa. Foi desenhada uma peça que se esquematiza na Figura 3.1a) e, pelo desenho apresentado na Figura 3.1b) apresenta dimensões de 200x100 mm com seis rasgos de 60x10 mm distanciados de 20 mm entre cada um. Pode-se ainda observar a chapa obtida com o corte na Figura 3.1c).

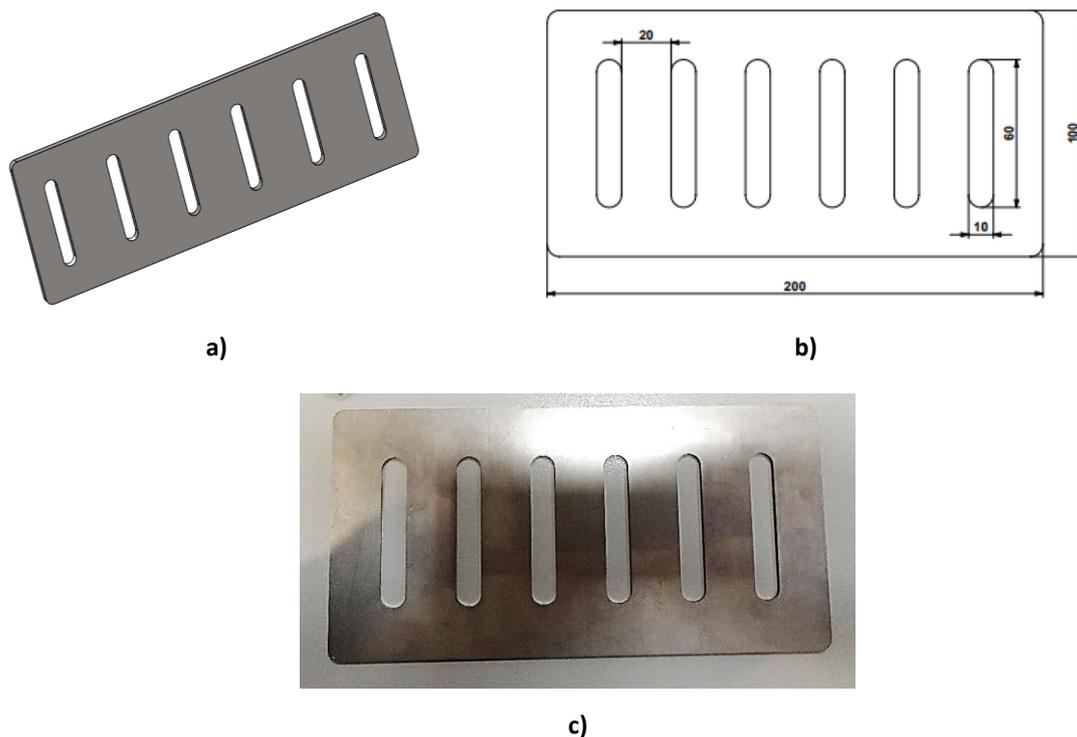


Figura 3.1. Modelo 3D (a), Dimensões (b) e componente obtido após corte (c).

### 3.1.2 Material

No que toca ao material, foram escolhidas duas chapas de aço inoxidável AISI 304 com espessuras de 4 e 8 mm, por se tratar de um dos materiais mais utilizados no contexto da empresa.

Trata-se de uma liga com cromo e níquel na sua composição, o que possibilita a sua resistência à oxidação face a outros aços. É um material muito utilizado por se tratar de uma escolha económica e prática para muitas aplicações.

C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	N
0,023	1,425	0,003	0,035	0,442	8,025	18,094	0,07

**Tabela 1.** Composição química do material AISI304 (%pond.).

Dureza [Vickers]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Resistência à tração [MPa]
129	195	505

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas do material.

### 3.1.1 Equipamento

O equipamento TruDisk 8001 (Figura 3.2), desenvolvido pela Trumpf, é responsável por gerar um laser de estado sólido com um comprimento de onda de 1030 nm. Este equipamento opera com o software TruControl, o que possibilita que o processo de corte seja feito com muita facilidade. No que toca às suas especificações, este laser consegue alcançar uma potência máxima de 8000 W e uma velocidade de corte de 280 m/min.



**Figura 3.2.** Equipamento TruLaser 5030 [43].

### 3.1.2 Parâmetros de Corte

Como ponto de partida foram estabelecidos conjuntos de parâmetros padrão para servir de base de comparação relativamente à variação de parâmetros que se pretende fazer neste estudo. Assim, foi tido como padrão o conjunto de parâmetros que têm sido usados recorrentemente pela empresa para cada uma das espessuras estudadas: 4 e 8 mm. Com base nestas condições de corte base fizeram-se variar parâmetros de modo a realizar um estudo paramétrico da sensibilidade da alteração dimensional das peças fabricadas à alteração de parâmetros de processo. Os parâmetros que se fizeram variar foram a velocidade de corte, distância focal do feixe e a pressão do gás de proteção.

Na Tabela 3 mostram-se os parâmetros no presente estudo assim como a designação adotada ao longo do texto. Como se pode ver, as condições padrão assumem a designação  $Pn$ , onde  $n$  é a espessura e, as restantes condições assumem a designação “ $Pn_Xm$ ”, onde  $Xm$  denomina a variação paramétrica desse corte. Deste modo, ao longo do texto,  $X$  poderá assumir a forma de **V**, **F** ou **Pr**, conforme se trate de um corte realizado, respetivamente, com velocidade, distancia focal ou Pressão do gás de proteção diferente daquele utilizado no *set* de parâmetros padrão. Afeto ao  $X$ , o fator  $m$  apresenta a magnitude da variação de parâmetro. Como exemplo, o corte P8\_V4, terá sido realizado numa chapa de 8 mm com uma velocidade de 4 m/min, apesar de nas condições padrão ter sido considerada uma velocidade de 5,5 m/min. Neste caso, não haver qualquer outra informação, todas as restantes condições terão sido mantidas.

Designação	Espessura (mm)	Velocidade de Corte (m/min)	Potência (W)	Distância Focal (mm)	Pressão do gás (bar)
<b>4mm</b>					
<b>P4</b>	4	18	8000	-2,5	5
<b>P4_V15</b>		15		-2,5	
<b>P4_F1.5</b>		18		-1,5	
<b>8mm</b>					
<b>P8</b>	8	5.5	8000	-4	6
<b>P8_V4</b>		4			
<b>P8_F3</b>		5.5		-3	
<b>P8_Pr4</b>				-4	4
<b>P8_Pr8</b>					8

Tabela 3. Parâmetros de corte padrão e parâmetros variados.

Ainda a salientar que a gama de parâmetros escolhida não é mais alargada tendo em conta que só os parâmetros que não apresentaram dificuldades a nível de processo ou cortes de má qualidade, como se pode verificar na Figura 3.3a) e b) respetivamente, foram selecionados.



Figura 3.3. Não conformidade resultante da indevida seleção de parâmetros. Dificuldade em cortar (a) e má qualidade do corte (b).

## 3.2 Métodos e Equipamentos de Análise

### 3.2.1 Metodologia

Após a realização dos cortes as amostras resultantes foram inspecionadas visualmente de forma a identificar a presença de defeitos severos resultantes do processo, quer nas superfícies da chapa e quer nas zonas do corte.

Numa fase posterior, foi realizado um estudo mais pormenorizado das alterações causadas pela variação paramétrica. Este estudo foi seccionado sob várias vertentes:

- a) *Medição das dimensões principais dos rasgos* – Para além da análise do desvio dimensional relativamente ao que se pretende em sede de projeto, permitiu ainda determinar o grau de repetibilidade entre cortes sucessivos;
- b) *Digitalização 3D da Superfície de Corte* – A análise da topografia da superfície de corte permitiu não só confirmar as conclusões retiradas no ponto a), como também, quantificar o acabamento superficial que se vai observar no ponto c).

De facto, a visualização da superfície através de mapas de cores permite ter a perceção de fenómenos impercetíveis aquando da visualização com macroscopia ótica;

- c) *Análise Macroscópica das superfícies cortadas* – A dimensão final da peça está diretamente relacionada com a forma como o material foi cortado durante o processo. Desta forma, uma análise comparativa e detalhada das superfícies de corte possibilita tirar algumas conclusões acerca da sensibilidade do acabamento superficial da amostra à variação paramétrica.
- d) *Análise das zonas afetadas pelo calor* – Apesar de não ter sido feito à escala microestrutural, foi determinada uma aproximação da extensão desta região através da medição da largura da zona de diferente coloração. Deste modo foi possível estabelecer algumas relações entre condições de calor e resultados do processo.

### 3.2.2 Amostragem

Para algumas das análises referidas no ponto 3.2.1 deste capítulo, nomeadamente as a) e d), foi necessário seccionar o componente produzido. O seccionamento de cada componente foi estudado e realizado de forma criteriosa de modo a minimizar o número de operações de corte necessárias. Desta forma, os componentes estudados foram cortados com recurso a um serrote alternativo seguindo o esquema que se mostra na Figura 3.4, onde também se pode observar a numeração seguida para identificar cada amostra após o corte, que associar a amostra ao rasgo e à zona do mesmo a que esta pertence. Na figura encontram-se ainda representados, pelas setas a branco, os locais de entrada do feixe de raio laser.



Figura 3.4. Esquema de amostragem.

### 3.2.3 Métodos de Medição e Análise

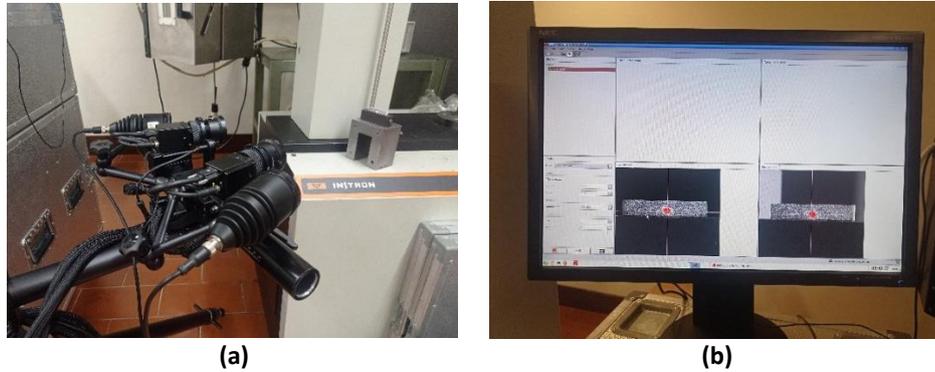
Para além das formas mais correntes de medição como paquímetros, procurou-se utilizar ainda a equipamentos alternativos. Como, o equipamento de medição ótico de precisão, presente no Departamento de Engenharia Mecânica, que se mostra na Figura 3.5. Este equipamento permitiu realizar uma análise primária dos desvios dimensionais causados pelo uso de diferentes parâmetros de corte, nomeadamente na caracterização geométrica dos componentes produzidos, através das dimensões principais dos rasgos.



Figura 3.5. Microscópio de medição utilizado.

Para além de métodos metrológicos mais convencionais, foi ainda utilizada *Digital Image Correlation* (DIC) de modo a obter o mapa da superfície resultante da operação de corte. Para aplicação deste método de medição 3D foi utilizado um sistema GOM Aramis 5M, que se mostra na Figura 3.6. Trata-se de um sistema de aquisição de imagem de alta precisão que permite realizar medições e traçar diretamente os perfis topográficos, a três dimensões. Para isso foi necessário posicionar a amostra e as câmaras utilizadas para a aquisição de imagem. Uma vez que, no sistema Aramis, a medição da topografia se baseia na DIC, antes de se proceder à aquisição da imagem das amostras foi necessário definir, na

sua superfície, um padrão de pontos de medição aleatórios. Para tal, as chapas foram pintadas com tinta branca, tendo-se posteriormente aplicado uma fina dispersão de gotas de tinta preta.



**Figura 3.6. Disposição das câmaras e amostra (a); utilização do sistema ARAMIS (b).**

Para complementar a análise, as superfícies resultantes do corte foram observadas e fotografadas através de microscopia ótica, com recurso a uma lupa Zeiss STEMI 2000C, equipada de uma câmara fotográfica Canon PowerShot G5 de 5MP, que se mostra na Figura 3.7. Através das fotografias tiradas e o software ImageJ® foi possível estimar a largura da zona afetada pelo calor em cada rasgo.



**Figura 3.7. Lupa Zeiss STEMI 2000C.**

### 3.2.3.1 Dimensões principais dos rasgos

No presente estudo, entendeu-se por dimensões principais dos rasgos os comprimentos verticais e horizontais dos mesmos, medidos nas superfícies superiores e inferiores da chapa. Na Figura 3.8a) representam-se as principais dimensões verticais e horizontais medidas ( $v_m$  e  $h_m$ ), assim como aquelas que se consideram em sede de projeto ( $v_d$  e  $h_d$ ), respetivamente.

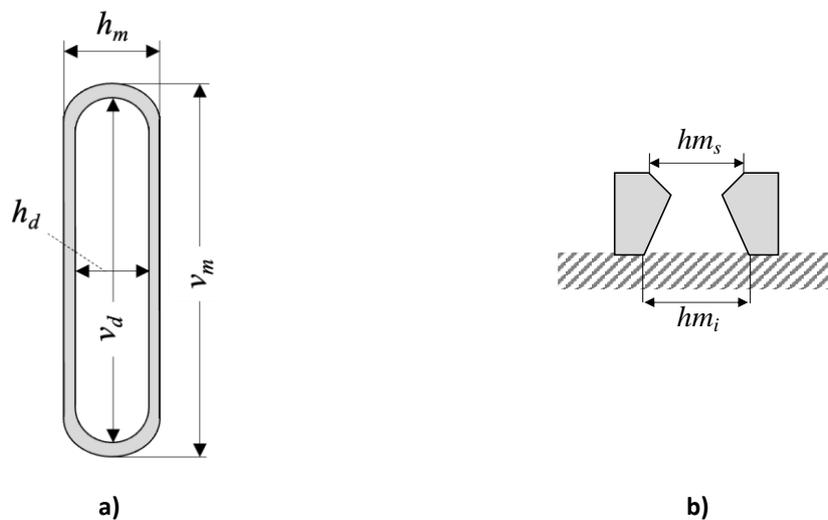


Figura 3.8. Organização das dimensões realizadas.

A acrescentar, Figura 3.8b) mostra-se esquematicamente o corte de um rasgo e onde se encontram indicadas as dimensões horizontais nas superfícies superior ( $hm_s$ ) e na inferior ( $hm_i$ ) do rasgo.

Para cálculo dos desvios dimensionais horizontal e vertical,  $\delta_h$  e  $\delta_v$ , foi usada a subtração aritmética das dimensões medidas e das pretendidas em projeto, ou seja:

$$\delta_h = h_m - h_d \quad (3.1)$$

$$\delta_v = v_m - v_d \quad (3.2)$$

De forma a melhor comparar a severidade do desvio, ao longo do texto os valores do desvio são apresentados de forma absoluta (mm) e não relativa (%).

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se dos resultados produzidos durante o presente estudo. Tendo em mente que se trata de um tema que visa a melhoria de um processo em meio industrial, de forma a simplificar a leitura e com o intuito promover a comparação relativamente ao que se pratica atualmente, a abordagem ao longo do presente capítulo, sempre que for possível, será realizada de uma forma sistemática e uniforme, i.e., numa primeira linha serão apresentados os resultados referentes às amostras cortadas em condições padrão e, de seguida, aqueles correspondentes às produzidas com variação de parâmetros.

### 4.1 Caracterização dimensional do corte

#### 4.1.1 Parâmetros-padrão

Nas Figura 4.1a) e b) descrevem-se as dimensões principais para cada contorno interior da chapa de 4 mm cortada com os parâmetros padronizados (P4), considerando as direções horizontal e vertical, respetivamente. Nestes gráficos é assinalada ainda, a tracejado, uma linha com a dimensão desejada em sede de projeto. Pode-se verificar que, após o corte, a dimensão não consegue ser mantida na face superior da chapa, quer na medição realizada segundo a vertical, quer naquela efetuada segundo a horizontal. Porém o desvio, a diferença aparenta ser coerente e na ordem dos 0,2 mm. Relativamente à face inferior, contrariamente ao que acontece na face superior, os valores medidos andaram perto dos pretendidos apesar de se verificar alguma dispersão na medição vertical ( $vm_i$ ).

Nas Figura 4.1c) e d) podem-se observar as medições efetuadas para os testes de corte com condições padrão em chapa de 8 mm (P8), nas direções horizontal e vertical, respetivamente. Pode-se observar que, à semelhança do que acontece nas chapas de menor espessura, não se consegue garantir a dimensão pretendida na face superior, apresentando um desvio de aproximadamente 0,5 mm para ambas as medições consideradas. Já na face inferior, as medidas obtidas estão muito próximas das pretendidas, tendo um desvio inferior a 0,1 mm.

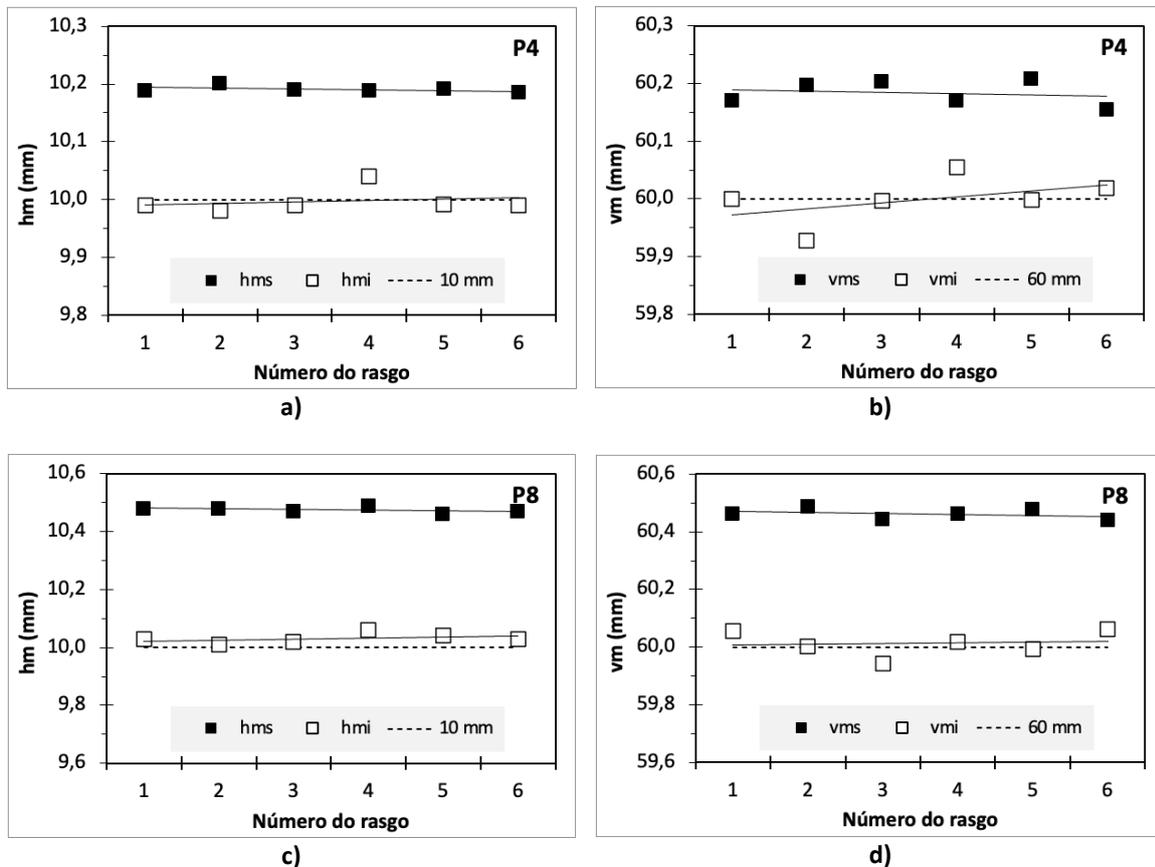


Figura 4.1. Dimensões dos cortes realizados em condições padrão em chapas de 4mm (a e b) e 8mm (c e d).

Pela análise dos resultados relativos às medições realizadas nos cortes produzidos em condições padrão, poder-se-á retirar algumas elações intercalares. Em primeiro, é possível aferir que pelo facto de a dimensão na face inferior da chapa ser a única que apresenta a dimensão pretendida em sede de projeto, independentemente da espessura, poder-se-á especular no sentido em que esta será a referência para a regulação paramétrica do processo. Como consequência, este tipo de metodologia poderá levar a incoerências dimensionais. De facto, como foi possível observar nas Figura 4.1c) e d), na chapa com 8mm, apesar de na face inferior se respeitar a dimensão desejada, devido às características próprias do processo por corte a laser, esta sofreu um aumento na superfície superior, ainda maior do que aquele que foi registado na chapa de 4mm. Assim, será de esperar que quanto maior for a espessura, maior será a diferença dimensional à superfície devido às características e geometria do feixe [4].

### 4.1.2 Corte com variação paramétrica

De forma a verificar a existência de alguma alteração dimensional relativamente à geometria obtida com as condições padrão, nas Figura 4.2a) a d) mostram-se os resultados das medições realizadas nos componentes produzidos em chapa de 4 mm, com diferentes parâmetros como, posicionamento do feixe (P4\_F1.5) e velocidade de corte (P4\_V15). De modo a permitir a comparação, as medições realizadas nos cortes produzidos com os parâmetros padrão (P4) encontram-se também representados na figura. Numa primeira observação dos valores pode-se concluir que, independentemente do parâmetro alterado, existe uma aproximação à dimensão desejada na superfície superior, mas, que também se piora a tolerância dimensional na superfície inferior da chapa.

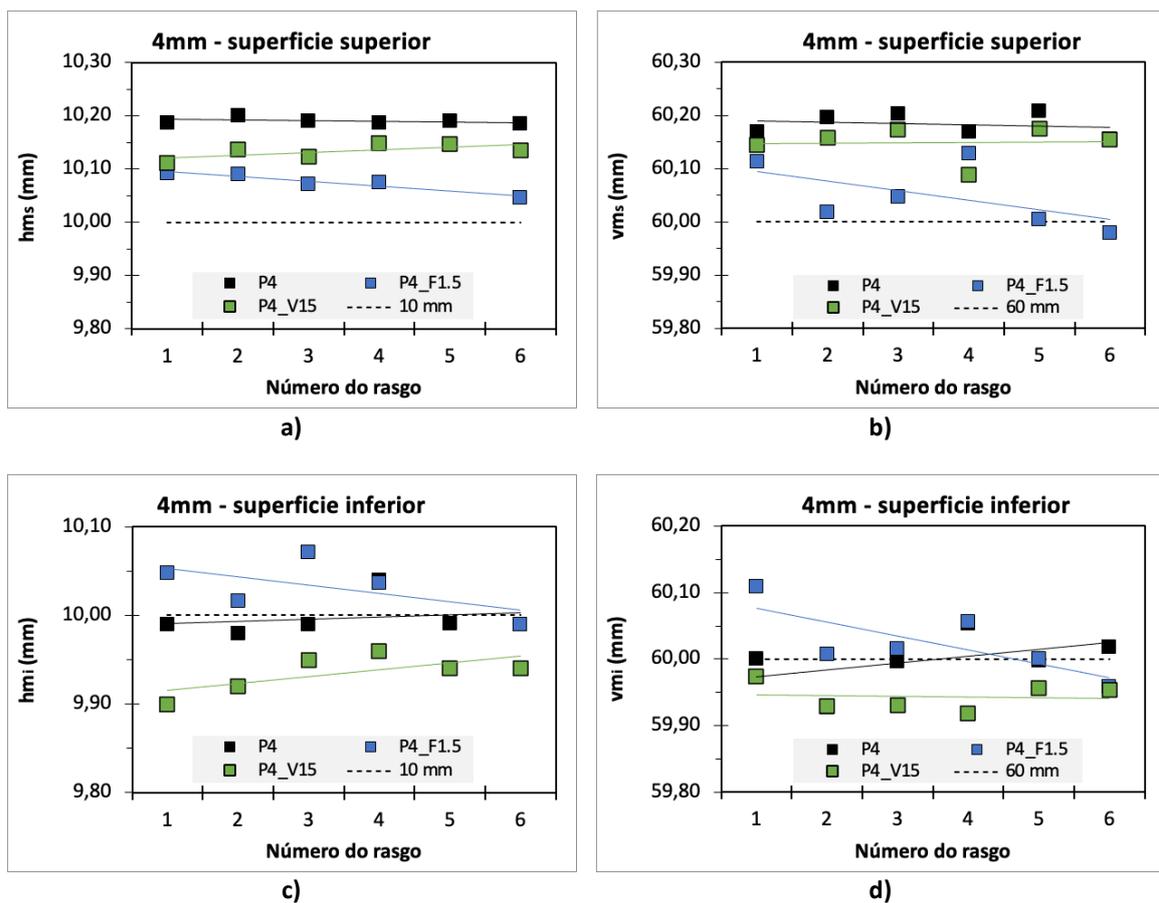


Figura 4.2. Dimensões dos rasgos, medidas nas superfícies superiores (a e b) e inferiores (c e d) dos cortes realizados em chapas de 4mm.

Os gráficos da Figura 4.2 fazem transparecer os diferentes papéis de cada parâmetro, sendo possível observar diferentes tendências de evolução da geometria do componente quando se altera um dado parâmetro. Assim, a alteração do ponto focal para 1,5 mm abaixo da superfície superior da chapa, leva à produção de um componente com uma geometria de dimensões mais próximas daquelas que são desejadas. Porém, a incoerência entre rasgos consecutivos é patente em todas as medições realizadas. Contrariamente, quando se reduz a velocidade de corte para 15 m/min, existe uma aproximação das dimensões requeridas na parte superior da chapa e um afastamento na parte inferior, comparativamente a P4, porém, há elevada coerência entre os valores das medições realizadas.

De forma a observar a tendência de comportamento no que diz respeito à sensibilidade da alteração paramétrica aquando do corte de chapas de 8 mm, foi feita uma análise análoga à anterior com base nos gráficos que se mostram nas Figura 4.3a) a d), que contêm as dimensões principais de cada rasgo dos componentes fabricados em chapas desta espessura.

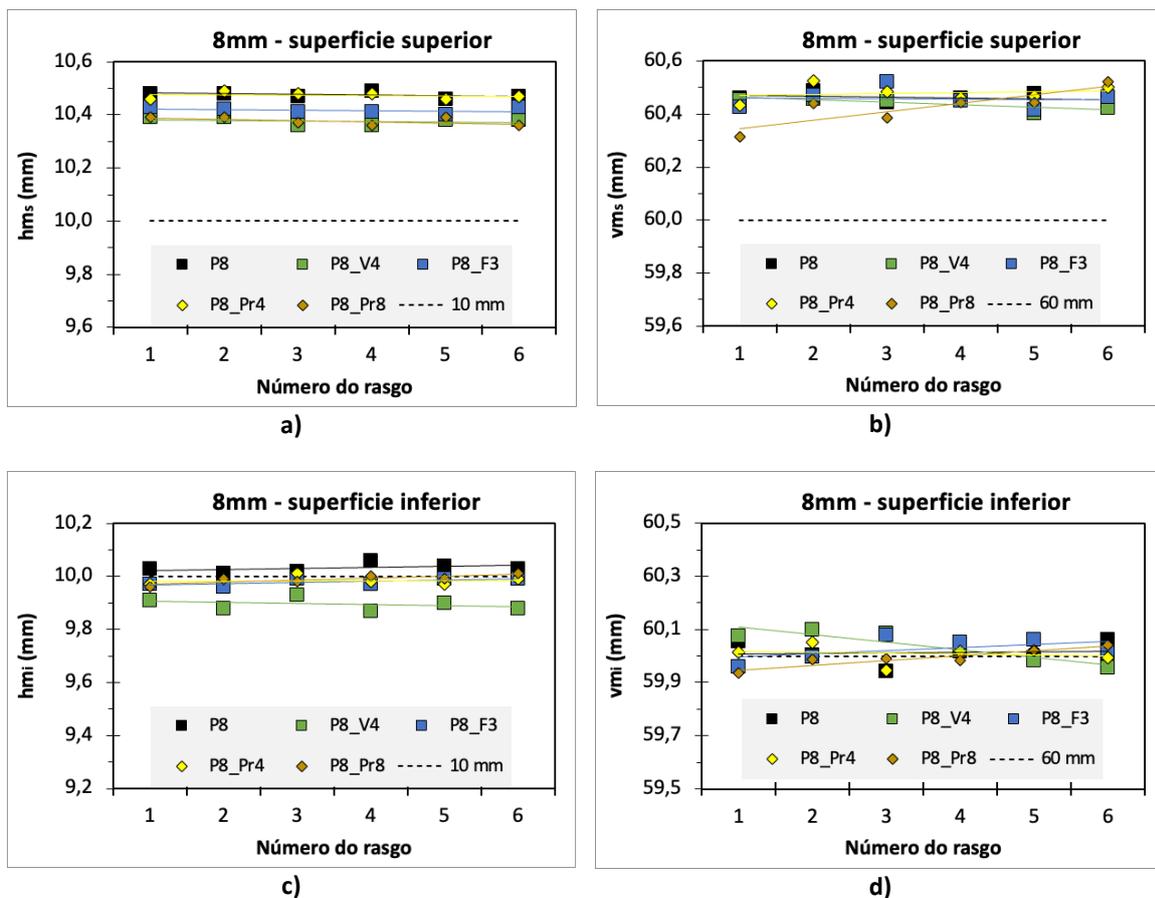
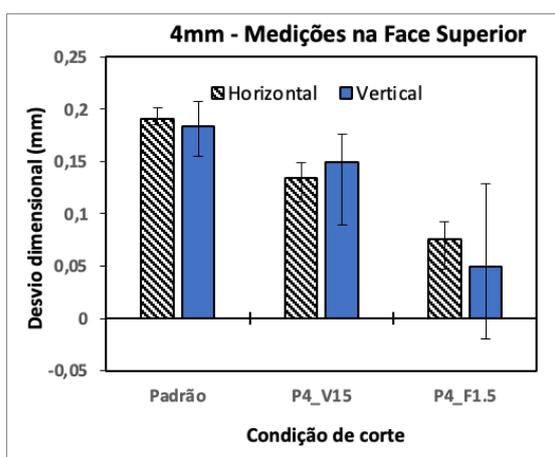


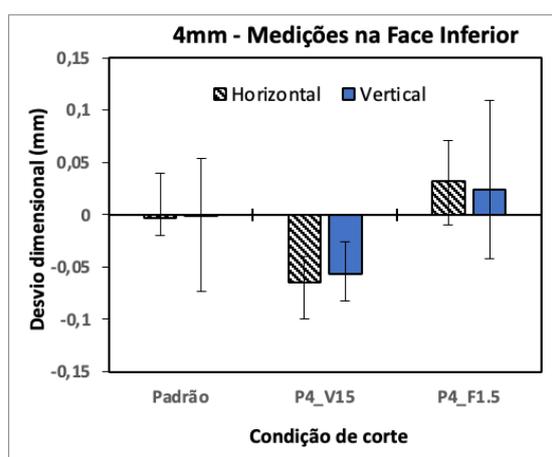
Figura 4.3. Dimensões dos rasgos, medidas nas superfícies superiores (a e b) e inferiores (c e d) dos cortes realizados em chapas de 8mm.

Observando as figuras correspondes às medições segundo a horizontal (Figura 4.3a) e c)), pode-se constatar a boa consistência dimensional existente entre cortes consecutivos, não havendo variações significativas a assinalar. No entanto, como se pode verificar pela Figura 4.3a), apesar de se manter o desvio médio relativamente à dimensão desejada das condições padrão (P8), i.e., de cerca de 0,5 mm na superfície superior do rasgo, para algumas condições de corte, é possível também identificar a existência de alguma redução deste desvio quando se utilizam outros parâmetros durante o processo.

De facto, pela observação das Figura 4.4a) a d), onde se mostram os desvios médios para cada condição de corte, por contorno (superior ou inferior) e espessura da chapa (4 ou 8 mm), é possível concluir que o ajuste da distância focal do feixe, a redução da velocidade do corte ou aumento da pressão do gás de proteção poderá levar a uma redução deste desvio até aproximadamente 0,1 mm, quer no contorno superior, quer no contorno inferior do corte. É ainda possível confirmar que a condição padrão assegura a dimensão no contorno inferior do corte em 4 mm. De facto, como se pode observar na Figura 4.4d), o corte realizado em chapa de 8 mm apenas se aproxima das dimensões de projeto quando se utiliza uma pressão de gás de proteção de 8 bar. De salientar ainda o facto de o contorno superior apresentar sempre uma sobre dimensão relativamente ao contorno inferior, podendo indicar uma forma da zona de corte com geometria trapezoidal.



a)



b)

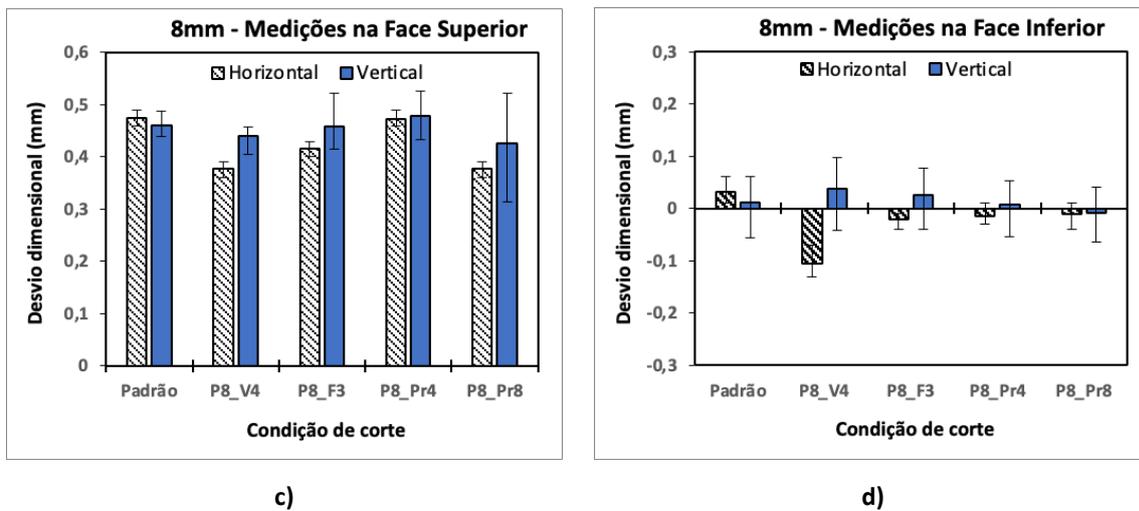


Figura 4.4. Desvios médios nas chapas de 4mm.

## 4.2 Influência dos Parâmetros na superfície resultante do corte

### • Corte em chapas de 4mm

Nas Figura 4.5a) b) e c) mostram-se as topografias de um segmento da superfície de corte para as chapas de 4 mm cortadas com a condição padrão, com aumento da velocidade de corte e com a alteração do ponto focal, respetivamente. No comprimento apresentado, pode-se verificar existem diferenças entre as superfícies obtidas com a condição padrão e as restantes que, se assemelham entre si no que diz respeito à topografia da superfície. Outra conclusão presente pela observação das figuras é o facto de a superfície apresentar aparente concavidade. No gráfico da Figura 4.6 representa-se esta concavidade através de curvas correspondentes à distância relativa (y) a um plano de referência teórico, ao longo da espessura da chapa, onde a origem (espessura = 0 mm) corresponde ao contorno superior.

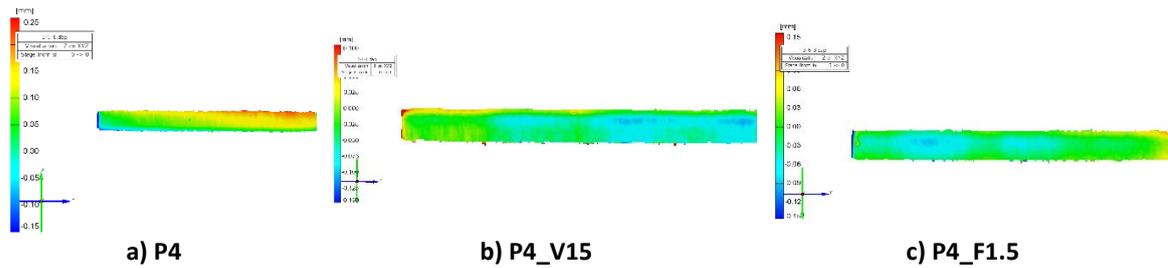


Figura 4.5. Mapas topográficos dos cortes realizados para as várias condições em chapa de 4mm a) P4, b) P4\_V15, c) P4\_F1.5.

Analisando a Figura 4.6, pode-se observar que o corte realizado com a condição padrão (P4), apresenta um desvio acentuado ao longo da espessura, sendo aferível uma tendência semelhante quando se alterou a velocidade de corte, o que mostra que, neste caso, apesar da alteração dimensional que provoca este parâmetro, a morfologia o perfil topológico mantém-se semelhante. Uma segunda observação prende-se com o facto que, com o ajuste do ponto focal (P4\_F1.5) promoveu condições de corte mais favoráveis a nível de desvio dimensional, quando comparado com as condições padrão e com o corte obtido com uma velocidade inferior.

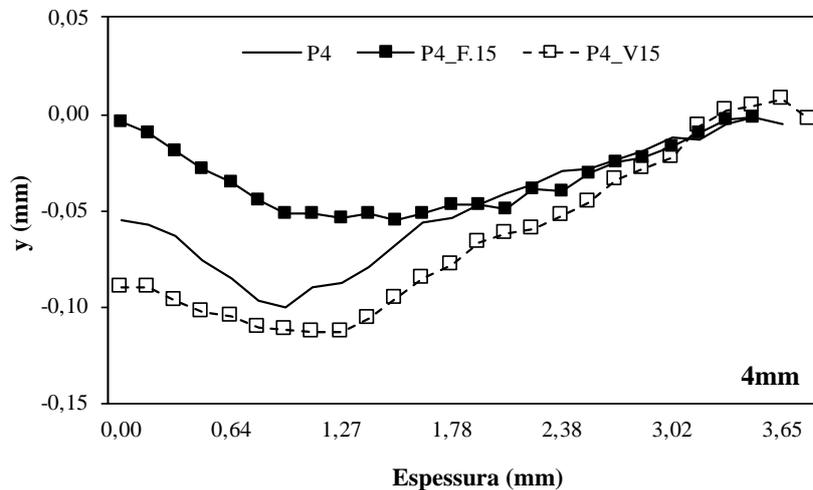


Figura 4.6. Comparação de perfis de corte.

Nas Figura 4.7a) b) e c) mostram-se detalhes das superfícies de corte para a condição padrão, com alteração da distância focal e da velocidade de corte, respetivamente, para os

cortes realizados em chapa de 4 mm. Tendo em conta a semelhança entre as figuras é plausível afirmar que, para esta espessura, a mudança de parâmetros não alterou o formato das estrias resultantes do corte e, conseqüentemente, o acabamento superficial. A ausência de vestígios de fluxo turbulento indica que o material seguiu eficientemente uma trajetória regular durante o processo, independentemente da parametrização utilizada. No entanto, estas figuras não permitem fornecer informação acerca da influência dos parâmetros na quantidade de material removido. O mesmo acontece no que respeita ao calor teoricamente registado durante processo. De facto, através da dimensão estimada das ZATs dos cortes realizados para as diferentes condições, observável através da Figura 4.8a), b) e c), é possível concluir que não terá havido diferenças significativas entre cortes. Essas diferenças ganham uma dimensão irrisória quando se observa o gráfico da Figura 4.9, no qual se quantifica esta dimensão para as três condições estudadas para o corte em chapa de 4 mm.

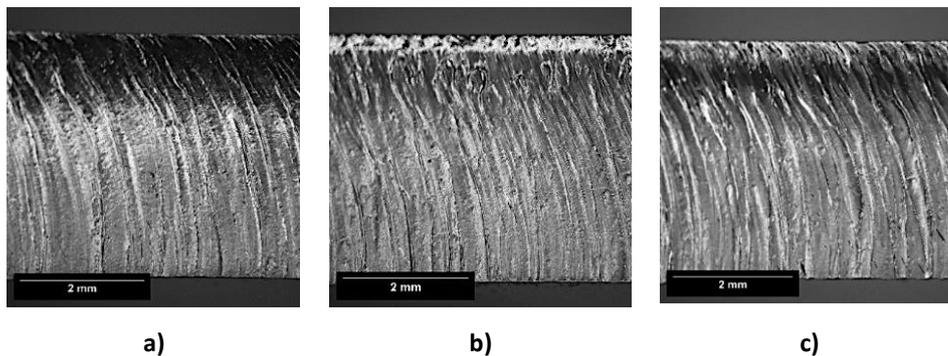


Figura 4.7. Acabamento da superfície de corte: a) P4; b) P4\_F1.5; c) P4\_V15.

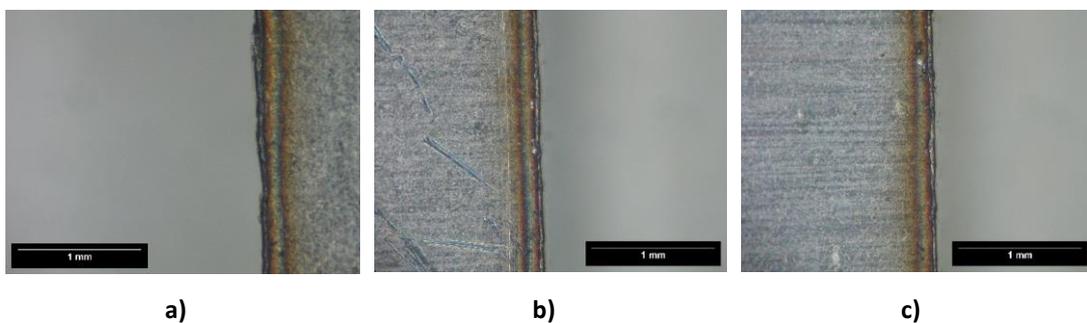


Figura 4.8. Detalhe da largura da ZAT nas chapas de 4 mm a) P4; b) P4\_F1.5; c) P4\_V15.

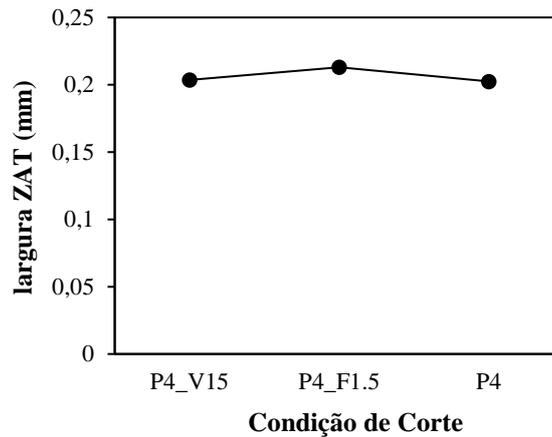


Figura 4.9. Medições da zona afetada termicamente.

Porém as diferenças de perfil são notórias e não são negligenciáveis. Nesse sentido. De acordo com o que foi dito em [6], a colocação do foco do laser mais perto da superfície tende a caminhar no sentido de uma superfície de corte perpendicular e daí, o menor desvio dimensional para esta condição. Por outro lado, a diminuição da velocidade irá aumentar o calor adicionado por área, promovendo assim uma maior remoção de material [25]. Deste modo, faz sentido que a condição P4\_V15 seja aquela que maior desvio dimensional apresenta.

- **Corte em chapas de 8mm**

Na Figura 4.10 mostram-se os perfis topográficos dos cortes realizados em chapa de 8mm para os diferentes parâmetros. Quando comparados com os resultados dos cortes realizados em chapa de 4 mm (Figura 4.6) e de acordo com os resultados apresentados no ponto 4.1 deste documento, verifica-se uma maior dimensão do desvio dimensional, o que será espektável pois não houve alteração das características do feixe. Numa primeira observação do gráfico é evidente menor regularidade das curvas, comparativamente a aquelas obtidas aquando dos ensaios de corte em chapas de 4mm. Outra observação é que as condições de corte padrão são aquelas que promovem menor rigor geométrico do corte, apresentando um desvio dimensional superior. A acrescentar que, de uma forma global, a alteração do ponto focal e o uso de níveis mais baixos de pressão de gás de proteção (P8\_F3 e P8\_Pr4) não promoveram alteração significativa da morfologia do corte relativamente às condições padrão.

Por sua vez, pode-se observar que nenhum dos ensaios apresenta uma regularidade ideal, ou seja, não existe uma evolução suave do perfil desde o topo até à base da chapa, apresentando pontos de inflexão resultando possivelmente em regiões concavas a partir de uma certa distância ao topo da chapa, afastando-se assim da cota desejada em sede de projeto. Consegue-se ainda verificar que os ensaios realizados em condições P8\_Pr4 e P8\_V4 apresentaram uma regularidade inferior àquele realizado com condição padrão (P8). Por sua vez, neste panorama, as condições de corte menos desvantajosas, sem necessidade de recorrer a operações de retrabalho, aparentam ser as P8\_Pr8, tendo em conta a proximidade do perfil à cota desejada. Por sua vez, com alteração da velocidade de corte, ou seja, na condição P8\_V4, conseguir-se-ia assegurar o total cumprimento da dimensão desejada através de uma segunda operação para remover o material, devido à subdimensão deixada após o primeiro corte.

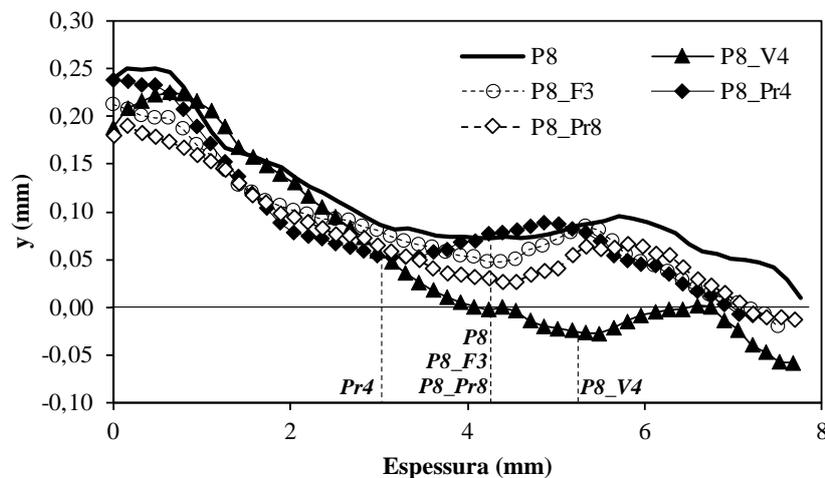
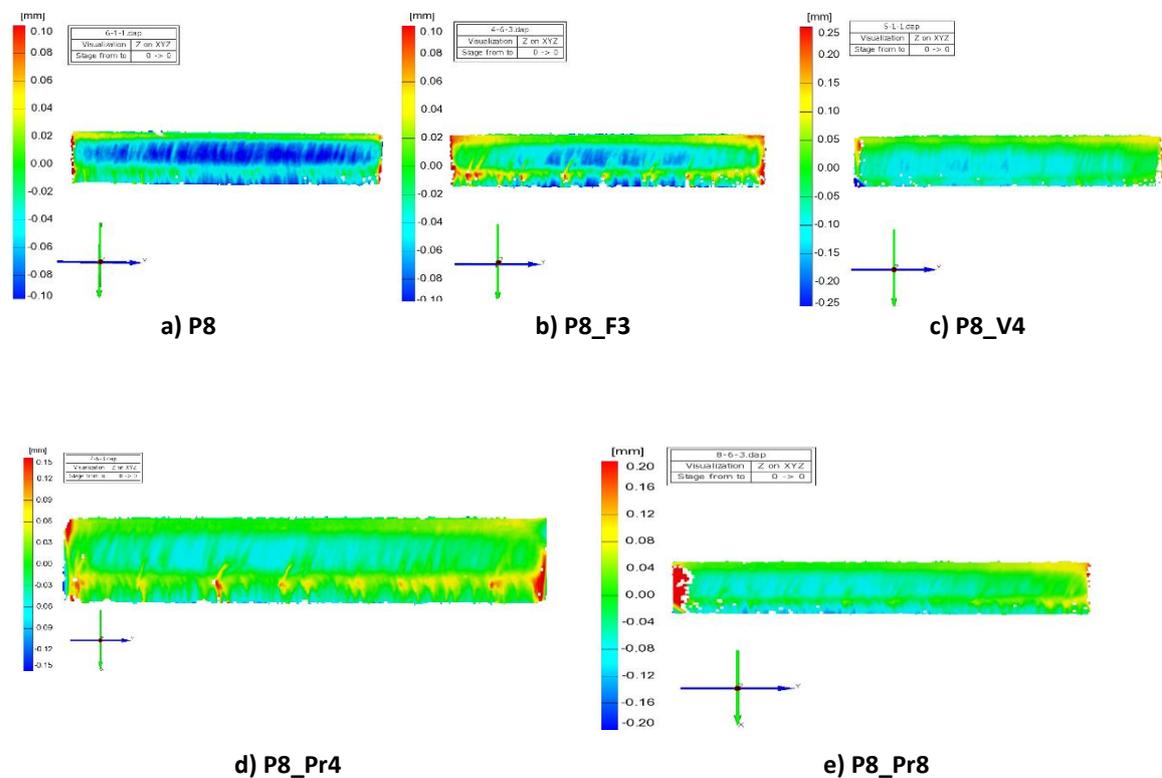


Figura 4.10. Comparação de perfis de corte em chapas de 8 mm.

Apesar das diferenças e das semelhanças apresentadas, existe sempre um desvio no contorno superior, sem variação significativa entre parâmetros, até cerca de 4 mm de espessura, qualquer que seja a condição utilizada para realizar o corte, garantindo-se, deste modo, apenas possibilidade de ajuste de processo a partir deste ponto da espessura da amostra.

Nas Figura 4.11a) a e) mostram-se os mapas da topografia, obtidos por DIC, das superfícies de longitudinais dos cortes realizados para todas as condições. Poder-se-á pelas

figuras que, de acordo com o que se observou nas curvas da Figura 4.10, existe uma zona onde aumenta a cota no centro do corte, situado a meia espessura para o corte P8\_Pr4 (Figura 4.11d), a 4 mm de superfície para os cortes, P8, P8\_F3 e P8\_Pr8 (Figura 4.11a, b) e e)) e, a aproximadamente 3 mm do fundo da chapa para o corte P8\_V4 (Figura 4.11c). Como se pode observar na Figura 4.12, onde se mostram detalhes destas regiões para todas as condições de corte estudadas, esta zona aparenta apresentar um fluxo turbulento de material, assinalado por setas, durante o processo. Por sua vez, este comportamento, que não era observado nos cortes realizados nas chapas de 4mm, será consequência dos parâmetros do processo.



**Figura 4.11.** Mapas topográficos dos cortes realizados para as várias condições em chapa de 8 mm a) P8, b) P8\_F3, c) P8\_V4, d) P8\_Pr4, e) P8\_Pr8.

Considerando o relatado em [25] a maior presença de indícios de turbulência, poderá indicar um maior gradiente de temperaturas ao longo da zona de corte o que leva a que o fluxo não seja uniforme e assim forme estas regiões. Ou seja, o afastamento do ponto focal. Deste modo, para uma dada parametrização, quanto mais homogênea for a distribuição menor será a zona de aparente turbulência ou, por outro lado, maior será a zona de estria uniforme. De facto, a condições que levam a concentrar mais calor por unidade de área e

tempo como a redução da velocidade de corte (ex.: P8\_V4) apresentaram uma zona de estria regular mais extensa (Figura 4.12c), em comparação com as restantes. Ainda a acrescentar o facto de o aumento da pressão do gás auxiliar ter levado ao aumento do fluxo turbulento, como descrito em [25] (Figura 4.12e)). Porém, para uma pressão mais baixa P8\_Pr4 (Figura 4.12d)), comparativamente à condição padrão (Figura 4.12a)), apesar do aparente baixo nível de turbulência, o uso de gás auxiliar demonstrou ser eficiente da homogeneização da temperatura levando ao aumento da região de estria regular.

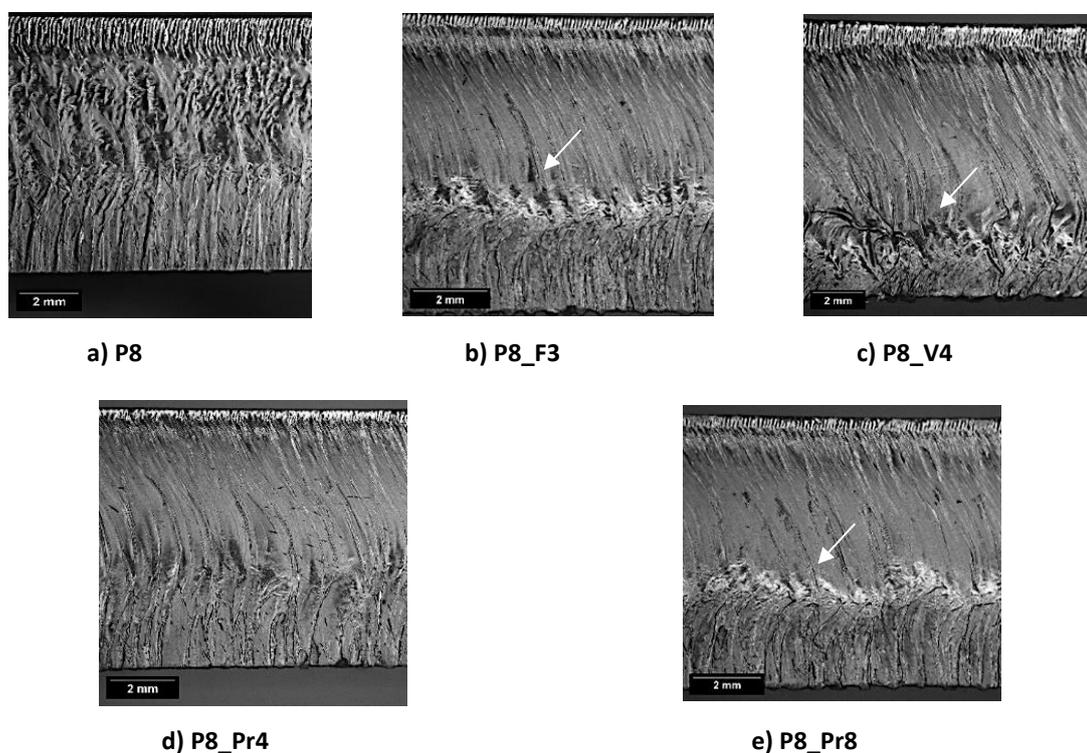


Figura 4.12. Superfície de corte a) P8, b) P8\_F3, c) P8\_V4, d) P8\_Pr4, e) P8\_Pr8.

Considerando que o calor envolvido é de extrema importância para o resultado final do corte, na Figura 4.13 mostra-se a dimensão estimada da ZAT, determinada através da medição da zona descolorada que se mostra na Figura 4.14a) a e), para as diferentes condições. Pelo gráfico podem-se observar diferenças significativas, onde, como já se suspeitava pela análise da superfície de corte (Figura 4.12), as condições sujeitas a maior e menor calor foram as P8\_V4 e P8\_Pr4, pois são aquelas que, respetivamente, apresentam ZAT de maior e menor dimensão. Por um lado, o aumento da temperatura por unidade de superfície, já mencionado, promovido pela condição P8\_V4 e, pelo outro, uma distribuição

da temperatura e arrefecimento uniforme promovida pelo uso pressão de gás auxiliar de 4 bar. Por sua vez, o uso de uma pressão maior de gás auxiliar, implica um gradiente maior de condições de calor devido ao arrefecimento abrupto e leva à formação de uma região de fluxo turbulento. Apesar deste aspeto, a dimensão da ZAT, embora acima da P8\_Pr4 é naturalmente inferior às restantes. Ainda a salientar o facto do deslocamento ascendente do ponto focal permitir aumentar a quantidade energia por área de foco, aumentando assim o calor que se adiciona ao processo. Porém, neste caso, o resultado é aparentemente semelhante ao obtido ao da condição P8\_Pr8.

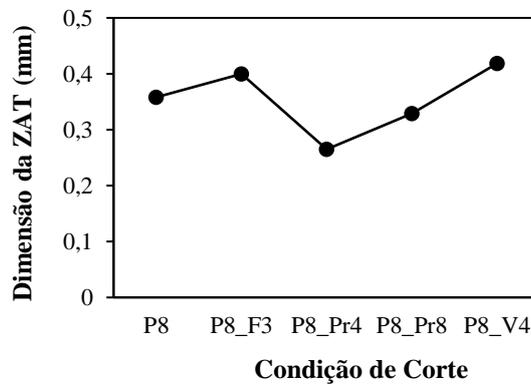


Figura 4.13. Medições zonas afetadas termicamente.

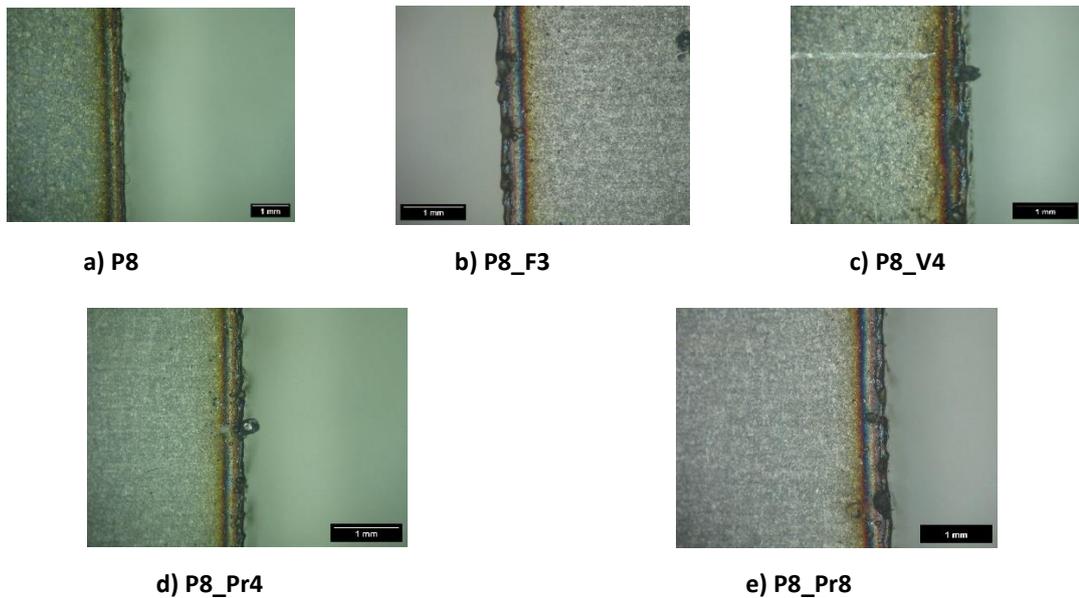


Figura 4.14. Detalhe da largura da ZAT nas chapas de 8 mm a) P8; b) P8\_F3; c) P8\_V4; d) P8\_Pr4; e) P8\_Pr8.

De acordo com os resultados analisados é possível verificar a fraca perpendicularidade da superfície obtida após o corte, independentemente do acabamento. De facto, considerando a gama de parâmetros utilizada, não se poderá alegar elegibilidade de nenhum deles para se poder partir para uma otimização como aquela que se pretendia realizar no início do presente trabalho, ou seja, considerando as limitações conhecidas do processo, a retificação sistemática das coordenadas do ficheiro CAD, mediante a espessura que se está a utilizar. Deste modo poderá abordar-se a situação de várias formas, de onde se destacam duas: 1 – simplificar o formato e assumir o corte como forma trapezoidal e 2 – Regulação dos parâmetros de processo.

Assumindo que o corte assume uma forma geométrica trapezoidal poderá simplificar o cálculo de possíveis ajustes a realizar no ficheiro CAD. Porém, devido às diferentes formas que resultaram do corte, para as diferentes espessuras (4 e 8 mm), não resultará no aumento da precisão do mesmo, como seria pretendido. A acrescentar, que o corte é realizado em ambiente CNC 2D, ou seja, o feixe não poderá ser inclinado, e, conseqüentemente a forma trapezoidal não ser a mais adequada para realizar o ajuste pretendido quando se fala de aumento de precisão. Ou seja, para a peça em questão, com os parâmetros de corte testados, a opção de alterar o ficheiro CAD de forma a compensar os *offsets*, derivados da alteração da espessura, não se irá traduzir numa melhoria a nível de produto.

Por outro lado, a regulação dos parâmetros do processo, apesar de não mitigar o desvio dimensional e de não promover a perpendicularidade, mostrou que poderá minimizá-los relativamente ao que foi inicialmente projetado

## 5 CONCLUSÕES

Na presente dissertação estudou-se o comportamento de uma chapa de aço inoxidável quando submetida a um processo de corte de laser. Seguem algumas das conclusões retiradas:

- A utilização de aço inoxidável provou ser uma dificuldade para o processo por se tratar de um material muito refletivo o que impossibilitou o estudo de ensaios diminuindo a potência do laser.
- O processo de corte de laser, apresenta uma precisão bastante elevada para espessuras até 4 mm, sendo que, para espessuras superiores, o erro associado ao longo da espessura, torna-se uma desvantagem notória para projetos com tolerâncias dimensionais mais reduzidas.
- Relativamente aos parâmetros alterados, a pressão do gás revelou ser um parâmetro relevante no processo, sendo que o seu aumento permite expelir uma maior quantidade de material fundido, aumentando a regularidade e qualidade do corte.
- A velocidade de corte mostrou ser um parâmetro com bastante influência no corte, sendo que o seu aumento traz vantagens notórias e com a sua diminuição há uma clara perda de qualidade e evidentemente quebra de produção
- Quanto ao ponto focal do processo, pode-se concluir que a variação do mesmo reflete-se diretamente em várias vertentes do corte, no entanto, é necessário ter em conta a condição das lentes de focagem para se registar o seu impacto real no material
- A diminuição do desvio ao longo da espessura, associado ao corte, não pode ser eliminado ajustando, somente, as dimensões no ficheiro DXF.
- A definição de offsets para diminuir o desvio dimensional só é possível se for conseguida a garantia de uma perpendicularidade do corte o que, apenas alterando os um dos parâmetros do laser, torna-se uma tarefa complicada

Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser

---

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Para complementar o estudo desta dissertação, tem-se como objetivo a realização de alguns trabalhos no futuro;

- Estudar mais profundamente o comportamento dos cortes quando forem variados mais que um parâmetro por ensaio;
- Utilização de um método mais preciso para retirar os valores associados às concavidades dos perfis de corte;
- Estudar a origem da falta de repetibilidade verificada em alguns dos ensaios efetuados;
- Comparar a influência dos parâmetros do corte quando utilizado outro tipo de material.

Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser

---

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Senthilkumar, “Laser cutting process-A Review,” 2014. [Online]. Available: [www.darshan.ac.in](http://www.darshan.ac.in)
- [2] O. Anicic, S. Jović, H. Skrijelj, and B. Nedić, “Prediction of laser cutting heat affected zone by extreme learning machine,” *Opt Lasers Eng*, vol. 88, pp. 1–4, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.07.005.
- [3] C. Wandera, “Laser Cutting of Austenitic Stainless Steel with a High Quality Laser Beam,” 2006.
- [4] I. A. Amaral, “Influência dos parâmetros de corte a laser na qualidade da superfície cortada,” 2018.
- [5] J. Pocorni, J. Powell, J. Frostevarg, and A. F. H. Kaplan, “The geometry of the cutting front created by Fibre and CO2 lasers when profiling stainless steel under standard commercial conditions,” *Opt Laser Technol*, vol. 103, pp. 318–326, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.optlastec.2018.01.055.
- [6] Y. Liu, S. Zhang, Y. Zhao, and Z. Ren, “Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a high-power fiber laser,” *Opt Laser Technol*, vol. 154, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.optlastec.2022.108332.
- [7] P. Badoniya, “CO2 Laser Cutting of Different Materials-A Review CO 2 Laser Cutting of Different Materials-A Review,” *Article in International Journal of Engineering and Technical Research*, vol. 12, 2018, [Online]. Available: [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- [8] M. Mayer, “The introduction of a CO2 laser cutting and engraving device into engineering education,” 2021.
- [9] A. Lamikiz, L. N. L. de Lacalle, J. A. Sánchez, D. del Pozo, J. M. Etayo, and J. M. López, “CO2 laser cutting of advanced high strength steels (AHSS),” *Appl Surf Sci*, vol. 242, no. 3–4, pp. 362–368, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.039.
- [10] A. Martínez-Conde, T. Krenke, S. Frybort, and U. Müller, “Review: Comparative analysis of CO2 laser and conventional sawing for cutting of lumber and wood-based materials,” *Wood Sci Technol*, vol. 51, no. 4, pp. 943–966, Jul. 2017, doi: 10.1007/s00226-017-0914-9.
- [11] A. Mahrle and E. Beyer, “Theoretical aspects of fibre laser cutting,” *J Phys D Appl Phys*, vol. 42, no. 17, 2009, doi: 10.1088/0022-3727/42/17/175507.
- [12] I. Amaral, F. J. G. Silva, G. F. L. Pinto, R. D. S. G. Campilho, and R. M. Gouveia, “Improving the cut surface quality by optimizing parameters in the fibre laser cutting process,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2019, pp. 1111–1120. doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.199.
- [13] I. Amaral, F. J. G. Silva, G. F. L. Pinto, R. D. S. G. Campilho, and R. M. Gouveia, “Improving the Cut Surface Quality by Optimizing Parameters in the Fibre Laser Cutting Process,” *Procedia Manuf*, vol. 38, pp. 1111–1120, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.199.
- [14] G. C. Rodrigues, V. Vorkov, and J. R. Dufloy, “Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2018, pp. 714–718. doi: 10.1016/j.procir.2018.08.026.
- [15] S. Genna, E. Menna, G. Rubino, and V. Tagliaferri, “Experimental investigation of industrial laser cutting: The effect of the material selection and the process parameters on

- the kerf quality,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 14, Jul. 2020, doi: 10.3390/app10144956.
- [16] Bill Weston, “Technology considerations for laser welding tubes and pipes,” 2014.
- [17] C. Wandera and V. Kujanpää, “Optimization of parameters for fibre laser cutting of a 10 mm stainless steel plate,” *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 225, no. 5, pp. 641–649, May 2011, doi: 10.1177/2041297510394078.
- [18] R. Conrado, “Efeitos do corte por laser sobre a integridade superficial de um aço médio carbono,” 2014.
- [19] C. Wandera, A. Salminen, F. O. Olsen, and V. Kujanpää, “Cutting of stainless steel with fiber and disk laser,” in *ICALEO 2006 - 25th International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, Congress Proceedings*, Laser Institute of America, 2006. doi: 10.2351/1.5060827.
- [20] C. Anghel, K. Gupta, and T. C. Jen, “Effect of laser beam cutting parameters on productivity and dimensional accuracy of miniature spur gears of stainless steel,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Nov. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/971/2/022081.
- [21] A. F. M. Tahir and E. A. Rahim, “A study on the laser cutting quality of ultra-high strength steel,” *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 2145–2158, 2016, doi: 10.15282/jmes.10.2.2016.18.0202.
- [22] M. Hashemzadeh *et al.*, “Investigations into fibre laser cutting,” 2014.
- [23] H. Ozaki, Y. Koike, H. Kawakami, and J. Suzuki, “Cutting Properties of Austenitic Stainless Steel by Using Laser Cutting Process without Assist Gas,” *Advances in Optical Technologies*, vol. 2012, pp. 1–8, Oct. 2012, doi: 10.1155/2012/234321.
- [24] C. Wandera, A. Salminen, and V. Kujanpää, “Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser,” *J Laser Appl*, vol. 21, no. 3, pp. 154–161, Aug. 2009, doi: 10.2351/1.3184429.
- [25] K. Jarosz, P. Löschner, and P. Niesłony, “Effect of cutting speed on surface quality and heat-affected zone in laser cutting of 316L stainless steel,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 155–162. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.650.
- [26] S.-L. Chen, “The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO<sub>2</sub> laser cutting,” 1999.
- [27] A. Riveiro *et al.*, “Laser cutting: A review on the influence of assist gas,” *Materials*, vol. 12, no. 1. 2019. doi: 10.3390/ma12010157.
- [28] D. Teixidor, J. Ciurana, and C. A. Rodriguez, “Dross formation and process parameters analysis of fibre laser cutting of stainless steel thin sheets,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 71, no. 9–12, pp. 1611–1621, 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5599-0.
- [29] H. A. Eltawahni, M. Hagino, K. Y. Benyounis, T. Inoue, and A. G. Olabi, “Effect of CO<sub>2</sub> laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L,” *Opt Laser Technol*, vol. 44, no. 4, pp. 1068–1082, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.optlastec.2011.10.008.
- [30] B. S. Yilbas, “A study into CO<sub>2</sub> laser cutting process,” Springer-Verlag, 1997.
- [31] T. Faro, R. Miranda, and A. Fernandes, “Estudo e otimização do corte laser de alta velocidade em chapa metálica fina,” 2006.
- [32] B. S. Yilbas, “Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis,” *J Mater Process Technol*, vol. 155–156, pp. 2106–2115, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.194.

- 
- [33] I. Miraoui, M. Boujelbene, and M. Zaied, “High-power laser cutting of steel plates: Heat affected zone analysis,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/1242565.
- [34] K. Chen and Y. L. Yao, “Striation Formation and Melt Removal in the Laser Cutting Process,” 1999.
- [35] D. Schu6cker, “Dynamic Phenomena in Laser Cutting and Cut Quality,” 1986.
- [36] J. Mário and A. Lima, “Controlo e Gestão da Produção no Setor de Corte Térmico Universidade do Minho Escola de Engenharia.”
- [37] M. Zhan *et al.*, “A method for establishing the plastic constitutive relationship of the weld bead and heat-affected zone of welded tubes based on the rule of mixtures and a microhardness test,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, no. 12, pp. 2864–2874, May 2010, doi: 10.1016/j.msea.2010.01.009.
- [38] R. Hess, L. Heidemanns, T. Herrig, A. Klink, and T. Bergs, “Model Based Prediction of the Heat Affected Zone in a Steel Workpiece Induced by an EDM Single Discharge,” *Procedia CIRP*, vol. 117, pp. 263–268, 2023, doi: 10.1016/j.procir.2023.03.045.
- [39] I. Miraoui, M. Boujelbene, and M. Zaied, “High-power laser cutting of steel plates: Heat affected zone analysis,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/1242565.
- [40] M. J. Madić and M. R. Radovanović, “Analysis of the heat affected zone in CO2 laser cutting of stainless steel,” *Thermal Science*, vol. 16, no. SUPPL.2, 2013, doi: 10.2298/TSCI120424175M.
- [41] The Welding Institute, “What is the Heat Affected Zone (HAZ)? - TWI.” <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-the-heat-affected-zone> (accessed May 30, 2023).
- [42] H. Maurício, “Análise do Processo de Corte a Laser numa Pequena Empresa Metalomecânica,” 2014.
- [43] “TruLaser 5030 fiber / 5040 fiber / 5060 fiber | TRUMPF.” [https://www.trumpf.com/pt\\_BR/produtos/maquinas-sistemas/maquinas-de-corte-laser-2d/trulaser-5030-fiber-5040-fiber-5060-fiber/](https://www.trumpf.com/pt_BR/produtos/maquinas-sistemas/maquinas-de-corte-laser-2d/trulaser-5030-fiber-5040-fiber-5060-fiber/) (accessed Jul. 09, 2023).

Definição de offsets a impor em função da espessura, tipo de material e parâmetros do processo por corte a laser

---