

INSTALAÇÃO, TESTE E LANÇAMENTO EM EXPLORAÇÃO DE EQUIPAMENTO DE CORTE POR LASER

Fernando Jesus Mourão & C^a. Lda.

Maria Ermelinda Ribeiro Da Silva

Relatório do Projecto Final

Orientador na empresa *Fernando Jesus Mourão & C^a. Lda.*: Engenheiro Carlos Mourão

Orientador na FEUP: Professor Catedrático António Augusto Fernandes



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho 2008

Resumo

Este trabalho visa otimizar o processo de corte por laser, nomeadamente no que diz respeito aos tempos e métodos requeridos, como também a qualidade da superfície de corte.

O objectivo do estudo de métodos e tempos consiste na aplicação de uma metodologia para este estudo na obtenção de peças cortadas a laser. A ideia principal deste estudo consiste em obter um diagnóstico preciso do processo em questão, bem como encontrar oportunidades para a melhoria do processo. Inicialmente, dividiu-se o processo em estudo em elementos (tarefas), retirando o tempo requerido e o número de operários necessários para a sua execução. Ao longo do trabalho, surgiram ideias a fim de melhorar o método e seus tempos. Constatou-se que o método aplicado pela empresa está correcto. Apenas de notar, que para a execução dos elementos e optimização do tempo padrão destes são necessários dois operadores para executar cada tarefa.

Relativamente à qualidade da superfície de corte, procurou-se correlacionar alguns parâmetros com a manutenção do laser. Os parâmetros em estudo estão relacionados com a norma DIN 2310. Foram efectuados dois estudos, no primeiro retiraram-se algumas peças no intervalo de manutenção do laser empregue pela empresa (de 3 em 3 dias) e analisaram-se as peças segundo os parâmetros da norma DIN 2310. Verificou-se que o intervalo de manutenção do laser utilizado pela empresa é correcto, mas é de notar que para a obtenção de uma melhor qualidade de corte seria necessário diminuir este intervalo. Deste modo, foi efectuado um segundo estudo no intuito de se encontrar um intervalo de manutenção do laser óptimo para a obtenção de boas qualidades das superfícies de corte. Para a execução deste estudo, foram retiradas amostras em diversas chapas desde do dia de manutenção do laser até a próxima manutenção. A partir deste foi possível definir qual seria o intervalo de manutenção para a obtenção de uma óptima qualidade de corte que a empresa deveria utilizar. Constatou-se que o intervalo de manutenção do laser deverá ser efectuado todos os 2 dias de trabalho.

Por fim, decidiu-se estudar a possibilidade de se implementar o sistema *Activity Based Costing* na empresa, uma vez que as empresas procuram, cada vez mais, uma maneira de reduzir os custos dos seus produtos, eliminar os desperdícios e os custos que não agregam valor, afim que possam competir no preço. Os sistemas tradicionais não permitem identificar e eliminar as actividades que não agregam valor. Deste modo, esta parte do trabalho tem por objectivo principal analisar os custos para uma possível implementação do sistema na empresa. Para a elaboração desta parte do trabalho, observou-se e registou-se todas as actividades envolvidas na execução de um produto obtido por laser. Após a identificação das actividades, procedeu-se a escolha de quais serão os direccionadores de custo para cada actividade. A partir destes direccionadores, calculou-se o custo aproximado de cada actividade tendo o cuidado de averiguar quais são os recursos requeridos por estas. Por fim, calculou-se o custo de um produto efectuado por laser e comparou-se o resultado obtido com o processo utilizado pela empresa.

Installation, Test and Launching of a laser cutting equipment

Abstract

The purpose of this work is to optimize the laser cut process, particularly in what concerns to times and methods required, as also to the cut surface quality.

The objective of the study of methods and times consists in the application of a methodology for this study in the obtaining of cut laser pieces. The main idea of this study consist to obtain a precise diagnose of the process in question, as also to find opportunities to improve it. Initially, the process was divided in study of elements (task), taking the required time and number of employees necessary for its execution. Throughout the work, ideas came up in order to improve the method and its times. It was confirmed that the method applied in the company was correct. Only to notice, those for the execution of the elements and optimization of its standard time are necessary two employees to execute each task.

In what concerns to the cut surface quality, I tried to correlate some parameters with the laser maintenance. The parameters in study are related with the DIN 2310 norm. Two studies were executed, in the first some pieces were picked out during the laser maintenance stop performed by the company (every 3 days) and analyzed according to the DIN 2310 norm parameters. I noticed that the laser maintenance stop used by the company is correct, but is to notice that to obtain a best quality cut it would be necessary to decrease that maintenance stop. Concerning this fact, it was done a second study with the purpose of finding a good laser maintenance stop for the obtaining of good quality in the surfaces cut. For the execution of this study, there were picked up samples form a few metal sheets from the day of the first maintenance stop to the next. After doing this it was possible to define what would be the maintenance stop to obtain an excellent quality cut that the company should use. I realized that the laser maintenance stop should be done every 2 days work.

At last, I decide to study the possibility of implementing the *Activity Based Costing* system in the company, since the companies search, each day even more, a way to reduce their products cost, eliminating the wastes and cost that don't add value, in order to compete in the market prices. The traditional systems don't allow identifying and eliminating the activities that don't add value. Concerning this fact, the primal objective of this part of the work is to analyze the cost of a possible implementation of the system in the company. To execute this part of the work, I observed e registered all the activities involved in the execution of a product obtained by laser. After the identification of the activities, I proceeded to the choice of the indicators cost for each activity. Following this indicators, I calculated the approximated cost of each activity having the careful to investigate which are the resources required by its. At last, I calculated the cost of a product executed by laser and compared the result with one obtained by the process used by the company.

Agradecimentos

Queria deixar bem expresso os meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Também gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Catedrático António Augusto Fernandes, pela sua disponibilidade e inestimável ajuda prestada ao longo da elaboração deste projecto. Como também ao Professor Rui Padrão que me prestou auxílio num dos temas abordados no projecto – “*Método Activity Based Costing*”.

Um especial agradecimento ao Engenheiro Carlos Mourão e aos operadores da empresa *Fernando Jesus Mourão & C^a. Lda*, que contribuíram e disponibilizaram-se para me fornecer todos os dados necessários para a evolução deste projecto.

Agradeço ainda a Emília Soares que se disponibilizou a ajudar-me a efectuar a limpeza das peças, ou seja a remoção dos óxidos, e a visualizar a superfície de corte das peças e amostras em estudo. Como também ao Engenheiro Ramiro Martins do CETRIB pela sua grande ajuda na medição da rugosidade das peças e amostras que foram alvo de estudo.

Índice

	<i>Página</i>
Resumo	ii
Abstract	iii
Agradecimentos	iv
Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xi
Nomenclatura	xiii
 <i>Capítulo I – Introdução ao estudo do processo de corte por laser e equipamento utilizado</i>	
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação da empresa <i>Fernando Jesus Mourão & C^a. Lda.</i>	1
1.2. O projecto na empresa <i>Fernando Jesus Mourão & C^a. Lda.</i>	1
1.3. Temas abordados	2
2. INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE CORTE POR LASER	3
2.1. Introdução histórica	3
2.2. Conceito de laser e suas características	4
2.2.1. LASER	4
2.2.2. Características da radiação laser	5
2.2.3. Estrutura de modos	6
2.2.4. Tipos de laser	6
2.3. Princípio de funcionamento do corte por laser	8
2.4. Características principais do corte	9
2.5. Aplicação de corte: corte de materiais metálicos	9
2.6. Gás de assistência	10
2.7. Sistema Laser	10
2.8. Vantagens e desvantagens da utilização do laser	11
3. O PROCESSO DE CORTE POR LASER	12
3.1. Interação feixe/matéria	12
3.2. Formação da superfície de corte	12
4. PARÂMETROS DE CORTE	14
4.1. Principais parâmetros	14
4.2. Factores que influenciam a qualidade de corte	14
5. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE CORTE POR LASER EM ESTUDO	15
5.1. Conceito geral	16
5.2. Principais componentes e sistemas	16

Capítulo II – Experimentação

6. MATERIAIS UTILIZADOS	18
7. EQUIPAMENTO UTILIZADO	18
8. ESTUDO DA MANUTENÇÃO DO LASER E SUA INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DE CORTE	19
8.1. Manutenção do laser	19
8.1.1. Componentes de laser que influencia a qualidade de corte	19
8.1.1.1. Componentes mecânicos	19
8.1.1.2. Componentes do caminho óptico	21
8.2. Qualidade de corte	22
8.2.1. Tolerância de perpendicularidade e inclinação	22
8.2.2. Rugosidade	24
8.2.3. Atraso entre estrias	25
8.2.4. Arredondamento na aresta da superfície de corte	26
8.3. Medição dos parâmetros	26
8.3.1. Medição da tolerância de perpendicularidade e inclinação	26
8.3.2. Medição da rugosidade	26
8.3.3. Medição do atraso entre estrias	29
8.4. Experimentação (estudo 1)	29
8.4.1. Resultados obtidos da qualidade das peças em estudo	30
8.4.1.1. Medição de u	32
8.4.1.2. Medição de R_z , R_a e $R_{máx}$	33
8.4.1.3. Medição de n	36
8.4.1.4. Observação de r	37
8.5. Experimentação (estudo 2)	37
8.5.1. Medição da rugosidade	37
8.5.2. Observação das estrias	40
8.6. Discussão dos resultados obtidos. Conclusões	41
9. INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS MÉTODOS E TEMPOS	42
9.1. Objectivos do estudo de métodos e tempos	42
9.2. Estudo dos métodos	43
9.2.1. Observação	44
9.2.2. Registo de dados	44
9.2.3. Esquematização	45
9.3. Estudos dos tempos	46
9.3.1. Divisão da actividade em tarefas	46
9.3.2. Registo dos dados relevantes	46
9.3.3. Decomposição da operação em elementos	47
9.3.4. Cronometragem – Equipamento de base	47

9.4. Experimentação	48
9.4.1. Fluxograma e mapa do processo	49
9.4.2. Divisão do processo em elementos	50
9.4.3. Folhas de cronometragem e de cálculo	51
9.4.4. Resultados obtidos do tempo padrão de cada elemento	54
9.4.5. Análise e discussão dos resultados obtidos	54
10. ESTUDO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO ACTIVITY BASED COSTING NA EMPRESA	59
10.1. Método Activity Based Costing	59
10.1.1. Principais conceitos	59
10.1.2. Comparação entre os sistemas tradicionais de contabilidade analítica e o método ABC	62
10.1.3. Vantagem e desvantagem da utilização do método ABC	63
10.2. Etapas e realização do teste de implementação do método ABC	64
10.3. Discussão dos resultados obtidos	68
11. REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA	69
Anexo A: Cabeçalho da folha de observação da qualidade de corte	71
Anexo B: Conteúdo da folha de observação da qualidade de corte segundo a norma DIN 2310	72
Anexo C: Fluxograma do processo (estudo de métodos e tempos)	73
Anexo D: Valores de TC obtidos durante as 15 medições efectuadas aos elementos constituintes da actividade de corte por laser	74
Anexo E: Valores de TC, TN e $TN_{méd}$ e TP para os elementos constituintes da actividade de corte por laser	76
Anexo F: Precisão da amostra (verificação do nº de medições realizadas)	77

Lista de figuras:

Figura 1: Organograma da empresa	1
Figura 2: Esquema ilustrativo de um laser de rubi	3
Figura 3: Laser é luz	4
Figura 4: Esquema simples dos elementos constituintes de uma laser	5
Figura 5: Distribuição da densidade de energia ao longo da secção transversal de um feixe laser	6
Figura 6: Esquema simples de um laser CO ₂	7
Figura 7: Princípio de corte por laser	8
Figura 8: Sequência de corte por laser	8
Figura 9: Interação feixe/material – frente de corte	12
Figura 10: Estrias regulares	13
Figura 11: Estrias com curva no topo inferior do corte	13
Figura 12: Aspecto esquemático de uma superfície de corte	13
Figura 13: Equipamento de corte por laser (modelo CCL 3015)	15
Figura 14: Esquema simplificado dos componentes principais da máquina	17
Figura 15: Representação de uma boquilha em bom estado a) e uma em mau estado b)	20
Figura 16: Tolerância de perpendicularidade e de inclinação	22
Figura 17: Valores de u em função do nível de qualidade	23
Figura 18: Localização dos pontos de medida de u	23
Figura 19: Rugosidade média	24
Figura 20: Localização da medida da rugosidade média	24
Figura 21: Rugosidade em função do nível de qualidade	25
Figura 22: Definição do desvio entre estrias	25
Figura 23: Arredondamento da aresta superior da superfície de corte	26
Figura 24: Perfil da peça – Rugosidade + Ondulação	27
Figura 25: Diferentes comprimentos de “cut-off” e respectivos perfis de rugosidade e de ondulação	28
Figura 26: Rugosidade máxima	29
Figura 27: Direcção de medição utilizada para retirar os valores da rugosidade	29
Figura 28: Peça 1	31

Figura 29: Peça 2	31
Figura 30: Peça 3	31
Figura 31: Peça 4	32
Figura 32: Rebarba no topo inferior de corte da peça 4	32
Figura 33: Peça 5	32
Figura 34: Perfil de rugosidade da peça 1	33
Figura 35: Perfil de rugosidade da peça 2	34
Figura 36: Perfil de rugosidade da peça 3	34
Figura 37: Perfil de rugosidade da peça 4	35
Figura 38: Perfil de rugosidade da peça 5	35
Figura 39: Macrografias da superfície de corte das peças em estudo	36
Figura 40: Perfil de rugosidade da amostra nº1	38
Figura 41: Perfil de rugosidade da amostra nº3	38
Figura 42: Perfil de rugosidade da amostra nº4	39
Figura 43: Perfil de rugosidade da amostra nº8	39
Figura 44: Perfil de rugosidade da amostra nº10	39
Figura 45: Macrografias da superfície de corte das amostras em estudo	40
Figura 46: Histórico da evolução do estudo de tempos e métodos	42
Figura 47: Objectivos do estudo de tempos e métodos	43
Figura 48: Posicionamento dos elementos/objectos e movimentações da chapa	49
Figura 49: Posicionamento dos elementos/objectos e movimentações do operador	50
Figura 50: Folha de observação ou cronometragem utilizada	51
Figura 51: Folha de cálculo utilizada	52
Figura 52: Máquina de corte por laser com sistemas de carga, descarga e armazém automática da ADIRA	56
Figura 53: Quantidade e posicionamento do(s) operador(es) referente ao elemento 1	57
Figura 54: Quantidade e posicionamento do(s) operador(es) referente ao elemento 2	58
Figura 55: Quantidade e posicionamento do(s) operador(es) referente ao elemento 3	58
Figura 56: Modelo conceptual para a avaliação do valor agregado de uma actividade	60
Figura 57: Direcçionadores de 1º estágio	61
Figura 58: Direcçionadores de 2º estágio	61
Figura 59: Critério ABC, uma visão global	62

Figura 60: Comparação entre os sistemas tradicionais e o sistema ABC	63
Figura 61: Fluxograma das actividades do processo	64
Figura 62: Produto em estudo	67
Figura 63: Resumo das etapas necessárias para a implementação do método ABC	68

Lista de tabelas:

Tabela 1: Características gerais do equipamento em estudo	18
Tabela 2: Intervalo de manutenção e operação necessária para a manutenção dos pentes das mesas	19
Tabela 3: Intervalo de manutenção e operação necessária para a manutenção da peça cerâmica	20
Tabela 4: Intervalo de manutenção e operação necessária para a manutenção de lentes	21
Tabela 5: Intervalo de manutenção e operação necessária para a manutenção de espelhos	21
Tabela 6: Cálculo da tolerância para os três níveis	23
Tabela 7: Cálculo da rugosidade para os três níveis	25
Tabela 8: Comprimento de amostragem (“ <i>cut-off</i> ”)	27
Tabela 9: Característica da rugosidade R_a segundo a norma NBR8404/84	28
Tabela 10: Características das peças em estudo	30
Tabela 11: Valores obtidos de u	32
Tabela 12: Valores de R_z , $R_{máx}$ e R_a obtidos pela leitura do rugosímetro das peças retiradas no dia da manutenção do laser	33
Tabela 13: Valores de R_z , $R_{máx}$ e R_a obtidos pela leitura do rugosímetro das peças retiradas após um dia da manutenção do laser	34
Tabela 14: Valores de R_z , $R_{máx}$ e R_a obtidos pela leitura do rugosímetro das peças retiradas após dois dias da manutenção do laser	35
Tabela 15: Características observadas do arredondamento da aresta superior de corte	37
Tabela 16: Valores médios de R_z , R_a e respectiva classe das amostras em estudo	38
Tabela 17: Quadro-síntese de questões a formular para uma observação	44
Tabela 18: Fluxograma e suas aplicações	45
Tabela 19: Simbologia utilizada para a elaboração de um fluxograma	45
Tabela 20: Total de operações transporte, inspeção, espera e armazenagem requeridos pelo processo em estudo	49
Tabela 21: Valores do $TN_{méd}$ e TP em segundos	54
Tabela 22: Valores do TP em segundos quando os elementos são executados por um e dois operadores	57

Tabela 23: Actividades e respectivos cost drivers do processo em estudo	66
Tabela 24: Custo das actividades	66
Tabela 25: Custo do produto	67

Nomenclatura:

TEM	“ <i>Transverse Electromagnetic Mode</i> ” (Modo Electromagnético Transverso)
K	Factor qualidade
CNC	Comando Numérico por Computador
ZAC	Zona Afectada pelo Calor
U	Tolerância de perpendicularidade e inclinação
R _z	Rugosidade média (norma DIN 2310)
R _a	Rugosidade média
R _{máx.}	Rugosidade máxima
N	Desvio entre estrias
TC	Tempo Cronometrado
TN	Tempo Normalizado
TN _{méd}	Tempo Normalizado Médio
TP	Tempo Padrão
V	Velocidade do operador
N	Número de elementos cronometrados
N'	Número de elementos necessários
X	Tempos cronometrados
ABC	Activity Based Costing
M.P	Matéria-Prima
O.P	Ordem de Produção

Capítulo I – Introdução ao estudo do processo de corte por laser e equipamento utilizado

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação da empresa *Fernando Jesus Mourão & C^a. Lda.*

A empresa *Fernando Jesus Mourão & C^a. Lda.* é uma indústria metalúrgica de estrutura reduzida, com cerca de 20 colaboradores, sendo a maior parte relacionados à área da produção e os restantes à área administrativa. Fundada a mais de 30 anos por Fernando Jesus Mourão, passou em 2004 a ter como sócios Carlos Manuel Lisboa Mourão e Maria da Conceição Lisboa Mourão, filhos do fundador com o principal objectivo de dar continuidade a projectos com vários anos de existência. Esta continuidade passou pela adaptação de novos desafios, uma vez que a empresa actualmente já não fabrica produtos que se destinavam a ventilação mecânica de edifícios e revestimento de telhados em zinco e chapa.

Actualmente, a empresa produz:

- Componentes metálicos para autocarros
- Componentes para transformadores
- Componentes para gruas e para a construção civil.

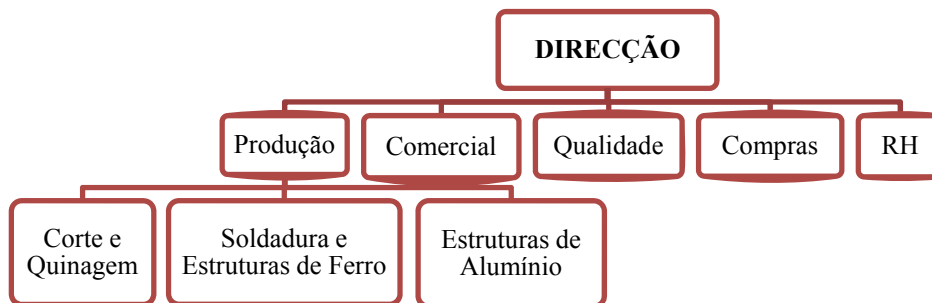


Figura 1: Organograma da empresa [1]

1.2. O projecto na empresa *Fernando Jesus Mourão & C^a. Lda.*

O projecto foi desenvolvido no intuito de ser útil para a empresa. Deste modo e uma vez que foi adquirido recentemente pela empresa um equipamento de corte por laser, decidiu-se que o objectivo principal deste projecto consistiria em otimizar o processo de corte por laser.

Assim, foram fixados como objectivos específicos:

- Avaliar a qualidade da superfície de corte das peças obtidas por laser, relacionando esta com a manutenção da laser efectuada na empresa;
- Efectuar o estudo de métodos e tempos das diversas etapas ou tarefas envolvidas no processo de corte por laser;
- Averiguar a possibilidade de implementação do método *Activity Based Costing* na empresa.

1.3. Temas abordados

Inicialmente, serão abordados temas relacionados com o equipamento em estudo, isto é, pesquisa bibliográfica acerca do processo de corte por laser e levantamento das características do equipamento que será alvo de estudo.

Na parte experimental deste trabalho, serão abordados temas relacionados com:

- Manutenção dos componentes do laser: determinação de quais são os componentes do laser que influenciam a qualidade de corte e que estão sujeitos a manutenção, como também quando é necessário efectuar a manutenção destes;
- Qualidade de corte: neste tema iremos referir quais os parâmetros a estudar de modo a avaliar a qualidade da superfície de corte e como se efectua este estudo segundo a norma DIN 2310;
- Estudo de métodos e tempos: tal como o nome indica, será efectuado um estudo sobre os métodos aplicados na empresa e os tempos requeridos aos operadores para efectuar as diversas tarefas envolvidas e necessárias para a obtenção das peças cortadas a laser;
- Sistema *Activity Based Costing* (ABC): nesta parte do trabalho incidimos em que consiste o método ABC, para que serve e como se aplica numa empresa.

2. INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE CORTE POR LASER

Desde o início da década de 70, com o desenvolvimento dos lasers de potência, a utilização destes no corte não tem parado de crescer. O corte por laser tornou-se o processo de corte preferencial para muitas empresas, com base nas altas velocidades de corte e na exactidão do processo. Os equipamentos destinados a este fim permitem obter peças de geometria complexa, acabamento de superfícies praticamente livre de rebarbas na região de corte e rapidez na execução de peças. [2]

2.1. Introdução histórica

Os primeiros trabalhos de investigação que conduziram à invenção do feixe laser foram realizados por *Albert Einstein* em 1917. Tratava-se então do estudo dos fenómenos físicos de emissão espontânea e estimulada subjacentes ao princípio do funcionamento do laser.

Os trabalhos de *Bohr* e *Planck* permitiram formular a teoria da mecânica quântica, componente essencial a compreensão do modo de funcionamento do laser.

O primeiro laser foi construído em Julho de 1960, por *Theodore Maiman*, que trabalhava nos laboratórios de investigação de Hughes. Tratava-se de um laser de estado sólido de rubi, excitado por uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio e filamento helicoidal, como é possível observar na figura 2.

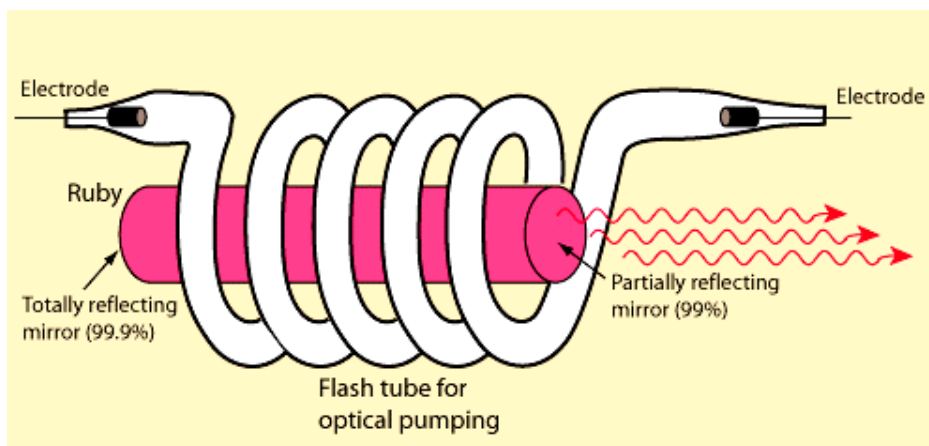


Figura 2: Esquema ilustrativo de um laser de rubi [3]

Poucos meses depois, em Dezembro de 1960, surgiu o primeiro laser de estado gasoso. Tratava-se de um laser He-Ne desenvolvido por *Javan, Benett e Harriot*. Só alguns anos mais tarde aparecia o laser de CO₂ desenvolvido por *Patel*.

A era do laser tinha chegado e desde então, os equipamentos e a tecnologia não têm parado de se desenvolver. As primeiras aplicações industriais dos lasers surgem no início da década de 70 com os lasers de gás.

Actualmente existem inúmeros tipos de fontes de lasers: lasers de estado sólido, gasoso e líquido, cada qual com as suas características que justificam a sua aplicação para determinado fim. [4]

2.2. Conceito de Laser e suas características

2.2.1. LASER

LASER, acrónimo de “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação), é hoje em dia sinónimo de máxima eficiência e máxima qualidade de processamento de materiais. É um dispositivo que emite radiação luminosa através do bombeamento efectuado por uma fonte de energia apropriada a um meio activo. Este meio é escolhido de modo a ocorrer uma emissão estimulada. [5]

O uso do laser pode ser entendido mais facilmente se imaginarmos o que acontece quando focalizamos raios de sol através de uma lente, para produzir uma fonte concentrada de energia, na forma de calor, sobre uma folha de papel como é possível observar na figura 3. Embora desse método resultem apenas buracos queimados no papel, ele nos mostra que a luz é realmente uma fonte de energia com potencial condições de ser processada e explorada do ponto de vista industrial.

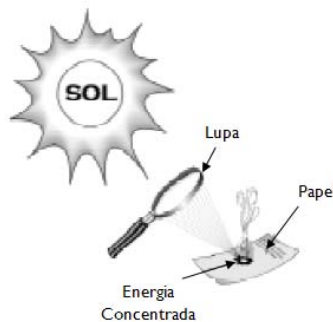


Figura 3: Laser é luz [6]

Em suma, o laser é um sistema que produz um feixe de luz concentrado, obtido por excitação dos electrões de determinados átomos, utilizando um meio activo que pode ser sólido, líquido ou gasoso. Este feixe de luz produz intensa energia na forma de calor. Para a obtenção do laser é necessário acrescentar ao meio activo um sistema óptico adequado, a cavidade ressonante, constituída por dois espelhos, posicionados nas extremidades do meio activo e coaxial a ele, perpendicularmente à direcção em que o feixe é emitido. [7]

Na figura 4 é possível observar um equipamento laser simples, o qual é composto por: um meio activo, uma fonte de excitação ou de bombeamento, a cavidade ressonante e um dissipador de calor.

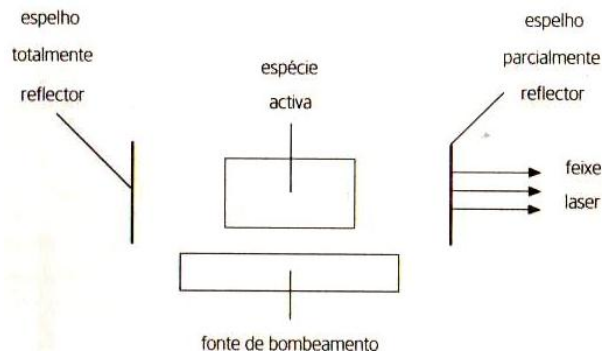


Figura 4: Esquema simples dos elementos constituintes de um laser [4]

O meio activo é constituído por uma mistura de uma substância activa, de energia disponível para permitir a emissão estimulada, diluída numa substância que é transparente à radiação emitida e que auxilia a extracção do calor. Tem por objectivo converter a energia eléctrica em energia de radiação.

A fonte de bombeamento é constituída pela fonte de energia que permite bombear átomos desde o nível fundamental até ao nível excitado. A fonte pode ser eléctrica, química ou óptica.

As cavidades ressonantes mais simples são delimitadas por dois ou mais espelhos colocados paralelamente entre si e perpendiculares ao eixo maior do elemento contendo o meio activo. Estes espelhos devem ser cuidadosamente alinhados de modo a reflectirem o feixe de luz para a frente e para trás, dentro da cavidade, com o objectivo de armazenar energia.

Por fim, o dissipador de calor tem por objectivo remover o calor libertado pelo meio activo não consumido na produção de radiação laser. [2,4]

2.2.2. Características da radiação laser

A consequência das propriedades da emissão e das características da cavidade ressonante é que os fótons que constituem a radiação emitida por laser estão em fase, isto é existe coerência da radiação. Esta coerência apresenta-se sob a forma de dois aspectos: temporal e espacial. Outras características importantes são a sua elevada direcionalidade e sua baixa divergência.

Os fótons emitidos têm todos a mesma energia e o mesmo comprimento de onda, isto é a radiação é monocromática.

Em suma, a radiação laser possui características muito especiais, ela é monocromática, coerente, direccional e apresenta baixa divergência. [2,8]

2.2.3. Estrutura de modos

Designa-se por modo TEM, acrónimo de “*Transversal Electromagnetic Mode*” (Modo Electromagnético Transverso), a forma como a energia radiante transportada pelo feixe é distribuída. Habitualmente associam-se à designação do modo dois índices m e n, TEM_{mn} , números inteiros que representam o número de zeros da distribuição espacial de energia contida no feixe segundo dois eixos ortogonais, como por exemplo o modo TEM_{00} representa um modo que não tem zeros nas direcções horizontais e vertical. Para o corte por laser, o modo mais interessante é habitualmente o TEM_{00} , também conhecido por modo fundamental ou modo gaussiano. [8]

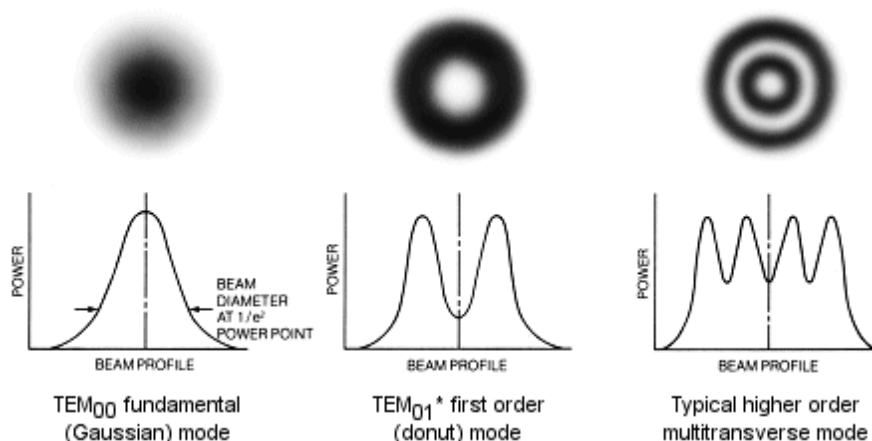


Figura 5: Distribuição da densidade de energia ao longo da secção transversal de um feixe laser [9]

2.2.4. Tipos de laser

O corte de chapas por laser tem a vantagem de produzir superfícies de corte com enorme precisão e muito menor distorção em relação a outros processos como o oxicorte e o arco em plasma por exemplo. Além de constituir um processo muito mais rápido, o laser tem ainda a vantagem de produzir uma reduzida zona afectada pelo calor (ZAC).

De entre os vários tipos de lasers, os mais comuns são sem dúvida o laser de CO_2 e o laser Nd: YAG. Também os lasers de excímeros estão a tornar-se comuns, estando ainda em fase de desenvolvimento e implementação industrial. Neste trabalho iremos apenas referir o laser de CO_2 , uma vez que o equipamento de corte por laser em estudo possui um laser deste tipo.

Laser CO₂

O laser CO₂ é o tipo de laser mais comum e adequado para o processamento de materiais, sobretudo nas aplicações que exijam elevada densidade de potência, isto é feixes com elevada qualidade. Este tipo de laser utiliza como meio activo uma mistura de carbono (CO₂), hélio (He) e azoto (N₂) em concentrações de aproximadamente 6, 10 e 84% respectivamente [2]. Cada um dos compostos, enunciados anteriormente, desempenha uma função, sendo ela a seguinte:

- CO₂: emissora de radiação;
- He: é responsável simultaneamente pelo arrefecimento e pela manutenção da inversão da população;
- N₂: ajuda a excitar as moléculas de CO₂ para o nível de energia mais elevado.

Funciona com lentes que focam o feixe, possibilitando um feixe de potência superior em relação a outros tipos de laser, atingindo potências até 50 kW e oferecendo uma eficiência de cerca de 5 à 10%. Os lasers de CO₂ emitem radiações com comprimentos de onda de 10,6 µm e produz potências (densidade) de 10 W/mm².

O feixe produzido é luz infravermelha, o que significa que não é visível a olho humano, sendo frequente a permuta para um feixe de baixa potência visível ao olho humano durante o processamento da peça, para o seu alinhamento. Este tipo de laser produz espessuras ZAC e distorções de 0,5 mm. [4,10]

Os raios laser de CO₂ são transmitidos à peça por espelhos e ópticas transmissíveis. Os sistemas de laser de CO₂ necessitam de cuidados de manutenção como a limpeza e o realinhamento das lentes. [10]

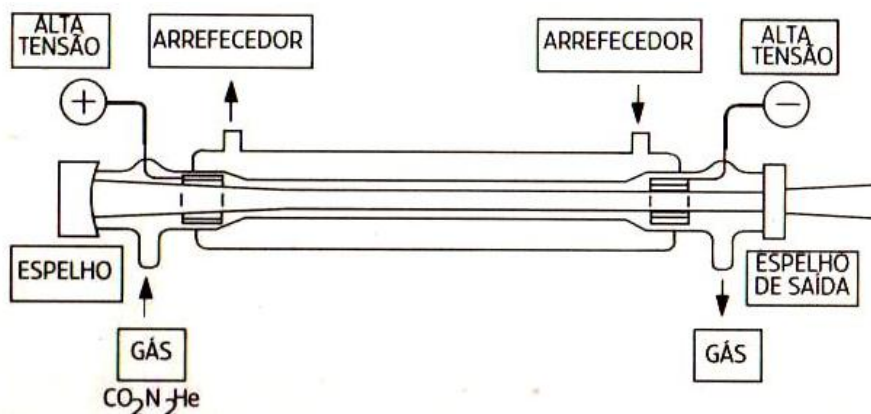
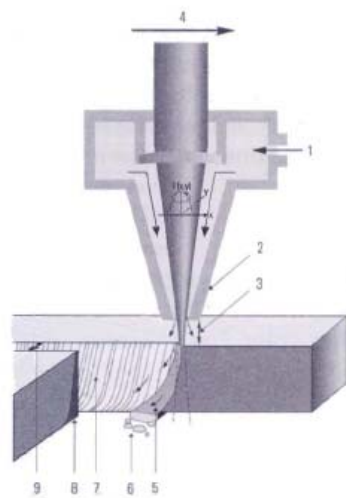


Figura 6: Esquema simples de um laser de CO₂ [4]

2.3. Princípio de funcionamento do corte por laser

A elevada densidade de energia do feixe laser focado sobre a peça produz um aquecimento localizado dando origem a uma fusão rápida e à evaporação parcial ou total do material a cortar. A corrente do gás de assistência, que sai coaxialmente com o laser pela boquilha (também designado por *nozzle* - componente com uma pequena abertura circular onde sai o feixe laser focado e os gases de assistência ao corte), ejecta o material fundido ou evaporado da zona de separação. O aquecimento do material pode eventualmente ser auxiliado por reacções exotérmicas devidas à interacção entre o gás de assistência e o metal. O corte progride pelo movimento relativo da peça e a boquilha, produzindo-se assim a linha desejada. [11]



Legenda:

1. Gás de assistência
2. Boquilha ou nozzle
3. Distância do bico à chapa "Offset"
4. Velocidade de corte
5. Material fundido
6. Rebarba
7. Rugosidade de corte
8. ZAC
9. Largura de separação

Figura 7: Princípio de corte por laser [11]

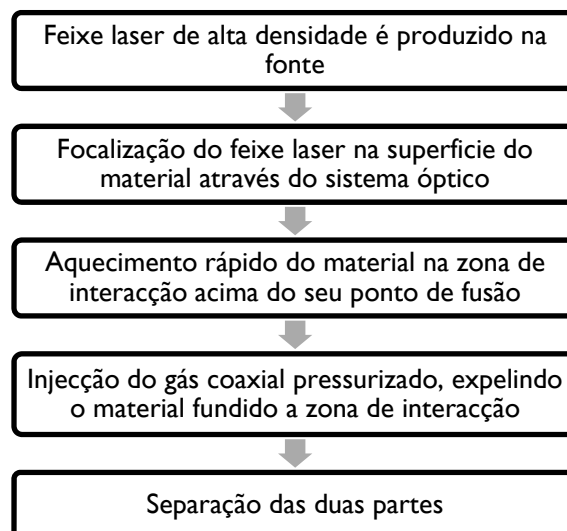


Figura 8: Sequência do corte por laser

2.4. Características principais do corte

As características principais do corte por laser são:

- Larguras de corte produzidas muito pequenas, aumentando contudo com a espessura do material a cortar;
- Superfícies de corte geralmente com estrias e rebarbas na face oposta à da ordem de incidência do feixe em particular se o material fundido for muito viscoso e difícil de destacar por acção do gás;
- Extensão da zona termicamente afectada mínima devido a entrega térmica do processo ser muito pequena e o gás fluido ao longo das paredes cortadas arrefece-as impedindo a dissipação do calor para o material. [2]

2.5. Aplicação de corte: corte de materiais metálicos

Os materiais mais frequentes cortados por laser são os materiais metálicos, especialmente o aço e o alumínio.

Aço

O aço é um material fácil de cortar por laser de CO₂, em particular utilizando o oxigénio como gás de assistência. A qualidade de corte é geralmente boa com larguras de corte pequenas e bordos rectos isentos de óxidos e rebarbas. A ZAC é praticamente desprezável contudo, para espessuras superiores a 10 mm a qualidade da superfície de corte diminui, nomeadamente as estrias tornam-se mais proeminentes e a rugosidade de superfície aumenta.

Aço inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são susceptíveis de ser cortado por laser, no entanto apresentam uma reflectividade superior à dos aços. Tipicamente obtêm-se excelentes qualidades de corte de superfície em chapa fina (1 – 2 mm) e boa qualidade até espessuras da ordem de 5 mm. A baixa entrega térmica do processo origina uma ZAC muito estreita ou quase inexistente e o aço não perde as suas características de inoxidabilidade na superfície de corte.

Alumínio

O alumínio é um material de elevada reflectividade no comprimento de onda da radiação laser de CO₂ e um bom condutor térmico. Devido a sua elevada condutividade térmica e seu elevado índice de reflectividade ao laser de CO₂, o alumínio requer consideravelmente maiores densidades de energia para iniciar o processo comparando este com o aço. [4,11]

2.6. Gás de assistência

No corte de metais por laser, são normalmente utilizados dois tipos de gás de assistência: o oxigénio (O_2) e o nitrogénio (ou azoto, N_2). A utilização do oxigénio ou do nitrogénio depende da qualidade requerida na aplicação.

O gás de assistência desempenha múltiplas funções, sendo as mais importantes: a de remover o material fundido proveniente do corte e a de proteger a lente. O gás normalmente utilizado para estas finalidades é o oxigénio, porque é um gás que favorece uma reacção exotérmica, isto é, liberta calor, aumentando ainda mais a temperatura do processo e, por consequência, a velocidade de corte.

No entanto, o azoto pode ser preferido como gás de assistência quando são necessárias superfícies livres de óxidos, como no caso do corte de aços inoxidáveis.

Como referido anteriormente, o oxigénio reage fortemente com o material, produzindo grandes velocidades de corte quando comparado com o azoto, devido a contribuições exotérmicas. O oxigénio é o principal gás de corte para aços de baixa liga, e a sua pureza influencia directamente a velocidade de corte máxima. No entanto, o nível de óxido que se forma na superfície de corte não é desejável, quando o aço inoxidável é cortado com oxigénio, a resistência a corrosão é destruída e surge uma superfície irregular não aceitável, e no alumínio é encontrada escória aderente à superfície. De modo a evitar estas irregularidades, para chapas de aço inoxidável e alumínio, o azoto é utilizado como gás de corte, pois consegue-se grandes velocidades e elimina-se o aparecimento de escória.

Em suma, o corte com azoto é muito comum quando se pretende obter uma aresta de corte limpa de óxidos, permitindo também obter peça sem rebarba e sem necessidade de acabamento posterior. O oxigénio provoca uma reacção exotérmica, quando em corte de aço, este facto é aproveitado como uma vantagem uma vez que permite fazer cortes a maior velocidade. A formação de uma camada de óxido, é na maior parte das vezes, um factor determinante para a escolha de corte com oxigénio ou com azoto, particularmente em chapa fina. [4,11]

2.7. Sistema Laser

Um sistema laser é constituído por uma fonte laser e por um equipamento que permite deslocamentos relativos do feixe e da peça a cortar.

O equipamento mais comum é constituído por três partes:

- O *laser* que é a fonte de radiação coerente com potência suficiente e características adequadas ao trabalho de corte pretendido;
- Uma *mesa* sobre a qual é colocado o material a cortar sob a forma de chapa;
- Um *sistema de interligação* entre os dois elementos anteriormente referidos, que encaminha o feixe desde a saída até ao material e permita a movimentação relativa entre este e o feixe.

Nas máquinas de corte por laser, o material a ser cortado normalmente encontra-se em forma de chapa, embora existem máquinas que se destinam ao corte de tubos. No caso em estudo, o equipamento de corte por laser destina-se ao corte de material sob a forma de chapa.

O corte por laser realiza-se do seguinte modo: inicialmente é colocado na mesa de trabalho o material a cortar sob a forma de chapa; a cabeça de corte¹ movimenta-se sobre a chapa segundo as direcções longitudinal e transversal, estes movimentos são transmitidos por motores lineares; pela cabeça de corte flui o gás de assistência que tem por função, entre outras, a de remover o material fundido e óxidos da região de corte.

Nas máquinas de corte por laser é possível cortar chapas de aço ao carbono até 20 mm de espessura. Ao contrário do que acontece no corte de chapas de alumínio que é bem menor, até 8 mm de espessura, isto devido a tendência do alumínio a reflectir a luz. [2,4,11]

2.8. Vantagens e desvantagens da utilização do laser

Por ser uma forma de energia concentrada em pequenas áreas, o corte a laser proporciona cortes rectos, pequena largura de corte, mínima espessura da ZAC, mínima distorção e arestas de excelente qualidade. É um sistema de fácil automatização, permite cortar peças de formas complexas e não requer a troca de “ferramentas de corte” cada vez que é substituído o material a ser removido.

Outras vantagens:

- Como referido anteriormente, larguras de corte muito pequenas, o que conduz a corte muito precisos em que as tolerâncias geométricas e dimensionais podem ser controladas mesmo em peças de geometria complexa;
- Ausência de contacto físico entre a “ferramenta de corte” e o material. Deste modo, não existe deformação na superfície de corte;
- As arestas e as superfícies de corte são de excelente qualidade, livre de óxidos, fissuras, etc.
- Flexibilidade, no sentido que permite cortar materiais diferentes, com espessuras diferentes sem necessidade de trocar a “ferramenta de corte”;
- O processo pode ser completamente controlado por comando numérico. Se o CNC (Comando Numérico por Computador) estiver ligado a um sistema de desenho assistido por computador (CAD), qualquer peça desenhada no CAD é imediatamente transferida para o CNC e executado o corte. A flexibilidade do laser enquanto ferramenta permite num tempo mínimo cortar diferentes peças em diferentes materiais, de acordo com as exigências de produção;
- Comparado com processos convencionais, o laser é muito mais rápido;
- É um processo silencioso, rápido e limpo na maior parte das aplicações. [2]

¹ Conjunto onde sai o feixe laser e no qual está montada a lente, o sensor capacitivo, a boquilha e onde são introduzidos os gases de assistência para além de outros fluidos.

Do lado das desvantagens, é possível destacar-se o alto custo inicial do sistema e a pequena variedade de potências disponíveis, que delimitam o corte a espessuras relativamente baixas e a materiais que apresentam baixa reflexão da luz. Contudo a elevada flexibilidade do processo e a possibilidade de produzir praticamente qualquer forma numa gama muito vasta de materiais e espessuras, permitem tornar esta tecnologia economicamente rentável. [2,4]

3. O PROCESSO DE CORTE

3.1. Interação feixe/matéria

Quando um feixe de radiação laser de comprimento de onda conhecido actua com um material não transparente, ocorre transferência de energia por interacção dos fotões da radiação com os electrões livres ou de ligação do material. [2]

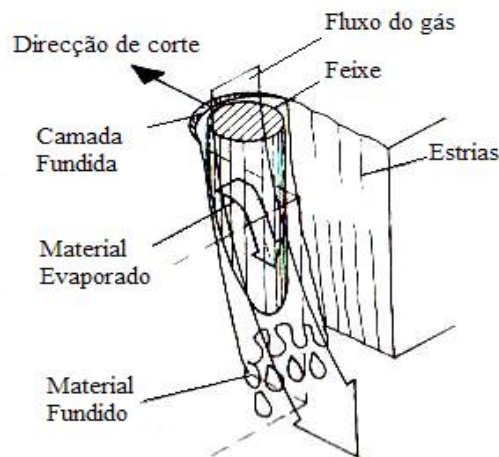


Figura 9: Interação feixe/material – frente de corte [2]

3.2. Formação da superfície de corte

O mecanismo básico responsável pelo corte por laser consiste no aquecimento acima da temperatura de fusão e vaporização na frente de corte. O material fundido é expelido para baixo ou para trás na frente de corte por acção de um jacto de gás de assistência, aplicado coaxialmente.

Sobre as superfícies observam-se estrias, a sua disposição e geometria é geralmente:

- Regular, de linhas dispostas verticalmente quase paralelas ao feixe laser. Correspondendo a um bom corte com pressões de gás relativamente baixas e velocidades de corte inferiores à velocidade máxima. [4]



Figura 10: Estrias regulares [11]

- Em padrões mais complexos em que as linhas são curvas no topo inferior do corte. Este é um corte obtido com pressões de gás elevadas e velocidades próximas da velocidade máxima. [4]



Figura 11: Estrias com curva no topo inferior do corte [11]

As estrias resultam da oscilação de frente relativamente à linha de interacção do feixe com o material, devido ao sobreaquecimento do metal fundido na frente de corte. Isto combinado com a existência de O_2 resulta um movimento da zona fundida à frente do feixe laser devido à reacção exotérmica. No arrefecimento o material fundido solidifica deixando estas irregularidades na superfície. [2,4]

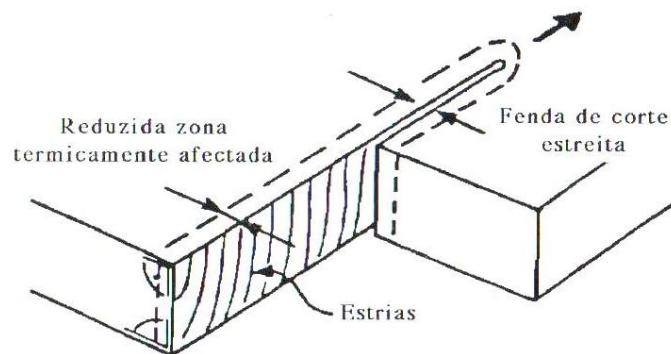


Figura 12: Aspecto esquemático de uma superfície de corte [8]

4. PARÂMETROS DE CORTE

4.1. Principais parâmetros

Quando se pretende efectuar um corte por laser, temos de ter em consideração inúmeros parâmetros, dentro dos quais se destacam: feixe laser, potência, modo de funcionamento (contínuo ou pulsado), comprimento de onda da radiação, lentes, etc.

Do ajuste dos parâmetros acima referidos resultam os seguintes parâmetros a ter em consideração: velocidade de corte, gás de assistência, material (características, reflectividade, espessura, entre outros). [4]

4.2. Factores que afectam a qualidade da superfície de corte

Existem inúmeros factores que assumem particular importância pela influência que exercem na qualidade das superfícies de corte, dentro dos quais é possível destacar os seguintes:

- Potência da radiação incidente: é um factor determinante da densidade de energia introduzida no material. Assim a potência deve ser determinada de modo a que a energia introduzida seja suficiente para executar o corte, para fundir todo o material no sentido da espessura, sem contudo, fundir uma quantidade exagerada o que implica um aumento a largura de corte e da extensão da ZAC. Em geral, o aumento da potência permite cortar com velocidades maiores, mantendo a qualidade de corte inalterada, ou cortar materiais de maiores espessuras. Uma vez que a potência do feixe é associada a velocidade e a espessura do material, esta deve ser escolhida de modo a garantir um corte de boa qualidade.

- Comprimento de onda da radiação laser: como referido anteriormente, os lasers de CO₂ são os mais habitualmente utilizados no corte, tendo um comprimento de onda igual à 10,6 µm.

- Modo de funcionamento: o corte pode ser executado em modo contínuo ou em modo pulsado seleccionando-se o modo em função do material a cortar. O modo pulsado tem como vantagens principais permitir obter elevadas potências de pico e melhorar a qualidade de corte em peças de geometria complexas e com ângulos vivos.

- Polarização do feixe: a absorção da luz depende da relação entre a orientação do plano da superfície e o plano de vibração dos campos eléctricos e magnéticos das ondas de radiação laser. A quantidade de corte otimizada consegue-se com o feixe polarizado paralelo à direcção de corte. Contudo, a maior parte das peças a cortar têm geometrias complexas, daí a necessidade de usar um feixe polarizado circular que permite ter as mesmas características de absorção independentemente da direcção de corte.

- Ópticas de focalização: habitualmente utilizam-se lentes convergentes para focalizar o feixe numa mancha de pequenas dimensões. A distância focal da lente é um parâmetro importante do componente óptico, uma vez que quanto menor for a distância focal, menor é o diâmetro do feixe no ponto focal e menor a largura de corte obtido. Tipicamente, utilizam-se

lentes de distância focal igual a 2,5” para cortar materiais de espessuras inferior a 1 mm, 5” para materiais de espessura entre 1 e 15 mm e de 7,5” para espessuras inferiores.

- Modo, simetria e estabilidade do feixe: estas são três características do feixe particularmente importantes no corte. Em corte são preferíveis laser de TEM₀₀ que permitem ser focados em lentes até diâmetros muito pequenos no ponto focal, concentrando-se energia no centro do feixe, evitando bordos queimados e larguras de corte grandes. Geralmente utilizam-se lasers de fluxo axial lento que permitem melhores características de feixe em termos de simetria e estabilidade.

- Posição do ponto focal: o ponto focal deve ser mantido na superfície da peça conseguindo-se aí uma maior densidade de potência e portanto, um corte mais eficaz.

- Velocidade de corte: é definida consoante potência do feixe e a espessura a cortar. Velocidades muito elevadas tendem a produzir estrias na superfície de corte, rebarbas na parte posterior da superfície atingida pela radiação e até mesmo a impossibilidade de realizar o corte. Velocidades baixas, por outro lado, produzem um aumento da ZAC e um decréscimo na qualidade de corte.

- Gás de assistência: desempenha múltiplas funções no processo de corte, sendo as principais às de proteger as lentes do sistema óptico, expelir o material da frente de corte, arrefecer as superfícies cortadas e aumentar a velocidade promovendo reacções exotérmicas que fornecem energia adicional ao processo de corte. [2,4]

5. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE CORTE POR LASER EM ESTUDO

O equipamento de corte por laser em estudo, fornecido pelo fabricante português ADIRA, é um modelo CCL 3015 equipado com um gerador CO₂ do tipo “slab”, Rofin Sinar série DC025. Apresenta muito baixa divergência de feixe e uma distribuição de energia óptima, com modo TEM₀₀, apresentando um factor de qualidade² inigualável ($K > 0,9$).



Figura 13: Equipamento de corte por laser (modelo CCL 3015) [11]

² Factor de qualidade: relação entre a qualidade do feixe gaussiano e a qualidade do feixe real.

Esta máquina de corte por laser do tipo CCL é uma máquina de comando numérico com três eixos destinada ao corte a laser com grandes velocidades e elevada precisão de chapas planas, garantindo:

- Excelente qualidade de corte em diferentes materiais e espessuras;
- Elevada versatilidade, uma vez que não recorre a troca de ferramentas;
- Elevada produtividade associada a elevadas velocidades de corte e de posicionamento;
- Elevada potencialidade de programação;
- Tempos mínimos de preparação;
- Custos mínimos de operação no que se refere à baixa manutenção, aos baixos consumos e à elevada performance;
- Grande potencialidade de automação. [11]

5.1. Conceito geral

Como referido anteriormente, as máquinas ADIRA do tipo CCL são centros de corte por laser comandados numericamente que se destinam a trabalhar peças planas em chapa metálica.

Neste tipo de equipamento, a “ferramenta” é um feixe laser com características ajustáveis que é conduzido a partir da sua fonte (ressonador³) até a chapa, através da lente e dos espelhos. Os espelhos e as lentes estão ligados a órgãos estruturais em movimento (ópticas móveis) mantendo-se a chapa a trabalhar imóvel. A posição e a velocidade do ponto focal são adequadamente definidas pelo comando CNC que controla os vários eixos a partir da informação introduzida por um programa. A distância entre a chapa e a boquilha da cabeça de corte é mantida automaticamente por um sensor capacitivo⁴.

A introdução da chapa na máquina bem como a retirada das peças cortadas é conseguida através de um sistema de troca de mesas. [11]

5.2. Principais componentes e sistemas

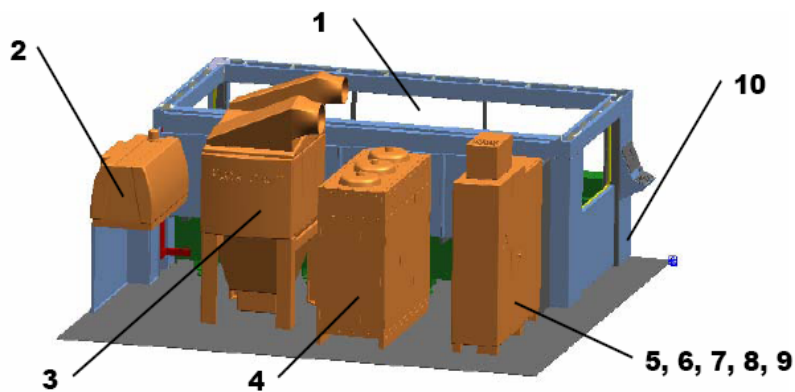
O equipamento de corte por laser em estudo é constituído essencialmente pelos seguintes sistemas:

- Sistema de posicionamento: consiste fundamentalmente numa estrutura fixa, num pórtico que se movimenta num eixo de direcção horizontal da cabeça de corte alinhada com a dimensão maior da chapa (eixo X) do tipo *gantry* (dois motores lineares sincronizados), numa carruagem que num eixo de direcção horizontal da cabeça de corte alinhada com a dimensão menor da chapa (eixo Y) e no eixo Z, isto é na direcção do movimento vertical da cabeça de corte perpendicular a chapa;

³ Parte da fonte laser na qual é produzido o feixe laser propriamente dito.

⁴ Dispositivo que regula a distância da boquilha a chapa.

- Sistema óptico: consiste na fonte laser onde é criado o feixe laser, no caminho óptico que conduz o feixe ao longo da máquina e na cabeça de corte que foca o feixe e o faz incidir adequadamente sobre a chapa. É composto pela fonte laser e espelhos;
- Sistema de aspiração de fumos: consiste fundamentalmente numa unidade de aspiração e filtragem de fumos;
- Sistema de refrigeração: destina-se a manter a água de refrigeração a temperatura constante, e distribuir o fluido pelos vários componentes a refrigerar;
- Sistema de troca de mesa: consiste num elevador que permite alinhar as mesas de apoio da chapa como a estrutura e um mecanismo de translação que movimenta a mesa adequada para a máquina.
- Sistemas de segurança: inclui blindagens, portas deslizantes, sinalizadores luminosos, etc. [11]



Legenda:

1. Sistema de posicionamento
2. Fonte laser
3. Sistema de aspiração de fumos
4. Sistema de refrigeração
5. Sistema de ar comprimido
6. Sistema de lubrificação centralizada
7. Sistema eléctrico de potência
8. Sistema eléctrico de comando
9. Sistema eléctrico da fonte laser
10. Blindagens exteriores

Figura 14: Esquema simplificado dos componentes principais da máquina [11]

Capítulo II – Experimentação

6. MATERIAIS UTILIZADOS

Para elaboração da parte experimental utilizou-se os materiais mais usualmente processados pelo equipamento em estudo, isto é aço, alumínio e aço inoxidável.

O aço é o principal material que é cortado por laser devido ao vasto volume de aplicações industriais, como também por ser cortado mais facilmente. O alumínio ocupa o segundo lugar em termos de volume de aplicações de corte por laser. No entanto, o seu número de aplicação tem vindo a crescer graças a indústria automóvel. Quando exposta a atmosfera, o alumínio é oxidado, formando uma camada de óxido de alumínio (Al_2O_3) que impede a progressão da corrosão. Este filme de óxido tem uma temperatura de fusão muito alta, o que faz com que seja muito mais difícil a obtenção de um corte limpo. De modo a evitar a formação do óxido é habitual recorrer ao corte com azoto. Quanto aos aços inoxidáveis, o laser é uma ferramenta adequada para o seu processamento. Na medida em que o aço inoxidável não reage com o oxigénio de forma eficaz como reage o aço, devido a camada passiva de óxido de crómio (Cr_2O_3) que isola eficazmente o ferro do escoamento do oxigénio, a reacção exotérmica é inibida. Normalmente, o corte deste material é realizado com azoto. [5,11]

7. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Como referido anteriormente, as peças em estudo foram efectuadas num centro de corte por laser do fabricante português ADIRA, modelo CCL 3015, equipado com um gerador laser CO_2 do tipo *slab* do fabricante Rofin Sinar, modelo DC025.

A tabela 1 indica as características gerais do equipamento de corte por laser utilizado.

Tabela 1: *Características gerais do equipamento em estudo*

Características ADIRA CCL 3015 DC025	
Dimensões máximas da chapa (mm)	3050 x 1520 x 20
Curso de trabalho eixo X nominal (mm)	3000
Curso de trabalho eixo Y nominal (mm)	1500
Curso de trabalho eixo Z nominal (mm)	125
Velocidade máx. de posicionamento paralelo X, Y (m/min)	200
Velocidade máx. de posicionamento paralelo Z (m/min)	120
Precisão do posicionamento X, Y (mm)	± 0,05
Repetibilidade do posicionamento X, Y (mm)	± 0,02
Comprimento de onda (µm)	10,6
Modo do feixe	TEM ₀₀
Factor de qualidade do feixe	>0,9

8. ESTUDO DA MANUTENÇÃO DO LASER E SUA INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DE CORTE

8.1. Manutenção do laser

A manutenção do laser é essencial para a obtenção de uma óptima qualidade de superfície de corte das peças a realizar.

Nesta parte do trabalho, será efectuado um estudo sobre os componentes da máquina de corte por laser que poderão influenciar na qualidade da superfície de corte, como também quais os métodos e intervalos necessários para a manutenção destes.

8.1.1. Componentes do laser que influenciam a qualidade de corte

Recorrendo ao manual de instruções da ADIRA e segundo uma pesquisa efectuada na empresa, verificou-se que os componentes que poderão influenciar a qualidade da superfície de corte são os seguintes:

- Componentes mecânicos: pentes das mesas e cabeça de corte;
- Componentes do caminho óptico: lentes e espelhos.

De seguida, será efectuada uma pequena descrição de quando e como se deve efectuar a manutenção dos componentes referidos anteriormente.

8.1.1.1. Componentes mecânicos

Pentes das mesas

São o suporte da chapa. Deterioram devido a incidência do laser, sendo necessário proceder à sua substituição periodicamente. O grau de deterioração depende do tempo de corte, tipo de contorno e do tipo de corte. Uma não uniformidade dos pentes leva a que a chapa fique mal apoiada provocando oscilações da mesma. As oscilações levam a perda de qualidade de corte e de tempo.

Na tabela 2 está descrito o intervalo de manutenção e o tipo de operação a efectuar segundo o manual da ADIRA.

Tabela 2: Intervalo de manutenção e operação necessária para a manutenção dos pentes das mesas

Componente	Intervalo de Manutenção	Operação
Pentes em chapa de aço de 3 mm	Sempre que necessário	Substituição

Para executar a sua substituição, é necessário cortar novos pentes numa chapa de aço de 3000x1500x3 mm e substituir os antigos por estes. [11]

Ao longo deste estudo, constatou-se que o intervalo de manutenção e o tipo de operação exigido pelo fabricante ADIRA é o utilizado na empresa.

Cabeça de corte

Na cabeça de corte é necessário recorrer a manutenção de dois componentes: boquilha e peça cerâmica.

Boquilha

A boquilha é um elemento essencial para o corte laser. Para se obter um bom corte, é indispensável que a boquilha esteja em bom estado, particularmente a geometria de orifício. Segundo o manual da ADIRA, a boquilha deve ser substituída sempre que necessário.

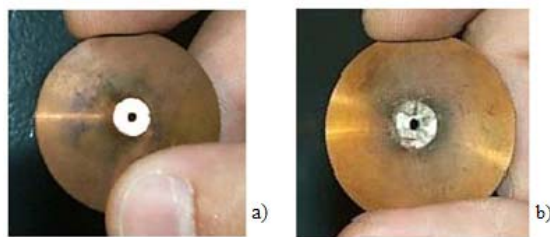


Figura 15: Representação de uma boquilha em bom estado a) e uma em mau estado b) [11]

Para se proceder a substituição da boquilha é necessário apenas desenroscá-la da peça cerâmica e enroscar uma outra nova. A boquilha deve ser apertada manualmente, pois a utilização de ferramentas pode danificar esta e a peça cerâmica. [11]

Peça cerâmica

A peça cerâmica está sujeita ao desgaste, deste modo é necessário trocar sempre que se fractura.

Tabela 3: Intervalo de manutenção e operação necessária para a manutenção da peça cerâmica [11]

Componente	Intervalo de Manutenção	Operação
Peça cerâmica	Sempre que necessário	Substituição

Tanto para a manutenção da boquilha como também a peça cerâmica, a empresa utiliza o intervalo de manutenção e o tipo de operação exigido pela ADIRA.

8.1.1.2. Componentes do caminho óptico

Ao manipular os elementos ópticos deve ser garantido a máxima limpeza e realizar todas as operações com o máximo cuidado. É importante que, o ambiente, o lugar de trabalho, as ferramentas e todo o material auxiliar estejam limpos.

Como referido inicialmente, o caminho óptico é constituído por: lentes e espelhos.

Lentes

Na tabela 4 estão apresentados os intervalos de manutenção consoante o tipo de operação a realizar.

Tabela 4: Intervalo de manutenção e operação necessária para a manutenção de lentes [11]

Componente	Intervalo de Manutenção	Operação
Lente de 5" ou 7,5"	Cada 8h e sempre que necessário	Limpeza
	Sempre que necessário	Substituição

Espelhos

O equipamento em estudo possui três espelhos: um espelho polarizado e dois espelhos planos. A tabela 5 apresenta o intervalo de manutenção exigido pela ADIRA para os diferentes espelhos existentes.

Tabela 5: Intervalo de manutenção e operação necessária para a manutenção de espelho [11]

Componente	Intervalo de Manutenção	Operação
Espelho polarizado	1000h	Limpeza
Espelho plano de cobre	500h	

No que se refere as lentes, a empresa empregue o intervalo de manutenção e o tipo de operação exigido pelo fabricante ADIRA. Enquanto que não se efectua nenhum tipo de operação aos espelho.

8.2. QUALIDADE DE CORTE

Os sistemas de classificação da qualidade da superfície de corte contêm em geral a seguinte informação:

- Parâmetros a medir e sua classificação;
- Métodos de medida e instrumentos a ser utilizados;
- Critérios aplicáveis a diferentes situações de corte consoante a utilização final da superfície de corte.

Existem diversas normas nacionais que definem os níveis de qualidade de superfícies de corte como a AWS C4.1 – 77, NF A 87 – 000, ISO/TC 44/5 C 8 407, ISO 9013 e DIN 2310.

Foi utilizado a norma DIN 2310, uma vez que esta é a norma utilizada pelo manual da ADIRA. Esta norma fornece um bom sistema de classificação das superfícies, uma vez que contem a descrição dos parâmetros a medir e classificar, os métodos de medida, os graus de qualidade que se refere à aplicação posterior das superfícies cortadas.

Os parâmetros que determinam a qualidade de corte são:

- Tolerância e perpendicularidade e de inclinação (u)
- Rugosidade (R_z)
- Desvio entre estrias (n)
- Arredondamento na aresta superior da superfície de corte (r)

De entre estes, os dois primeiros são utilizados para classificar a qualidade da superfície de corte. Os restantes parâmetros permitem fazer uma avaliação visual da qualidade. [2,8,11]

8.2.1. Tolerância de perpendicularidade e de inclinação

A tolerância de perpendicularidade e de inclinação (u) é definida como a maior distância perpendicular (medida em mm) entre a superfície cortada real e teórica, isto é, u é a soma dos desvios angulares e de concavidade/convexidade da superfície. [2,8]

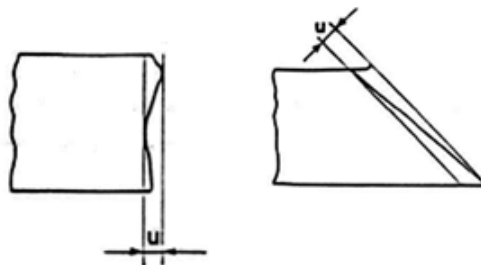


Figura 16: Tolerância de perpendicularidade e inclinação [11]

A norma DIN 2310 apresenta três níveis para a tolerância (medida em mm), como é possível observar na tabela 6.

Tabela 6: Cálculo da tolerância para os três níveis [11]

Cálculo da tolerância (u)	
Nível 1	$0,05 + 0,0025 \times \text{espessura}$
Nível 2	$0,1 + 0,015 \times \text{espessura}$
Nível 3	$0,25 + 0,025 \times \text{espessura}$

O modelo CCL em estudo cumpre o *nível 2* da norma DIN 2310. [11]

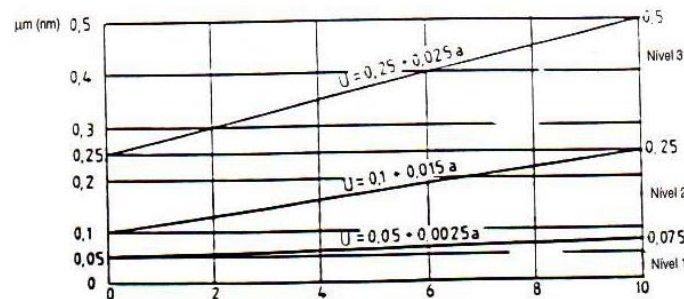


Figura 17: Valores de u em função do nível de qualidade [2]

As tolerâncias de perpendicularidade e de inclinação devem ser medidas em posições específicas consoante a espessura da peça (a), como é possível observar na figura 18.

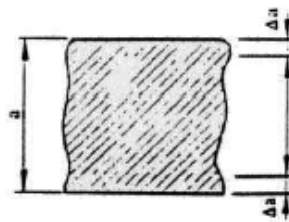


Figura 18: Localização dos pontos de medida de u [11]

Para espessuras inferiores à 2 mm, Δa apresenta o valor de 0,1 mm e para espessuras superiores à 2 mm Δa deverá ser de 0,2 mm.

8.2.2. Rugosidade

A rugosidade é um conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, como por exemplo o rugosímetro. [11,12]

A rugosidade é avaliada através do valor médio da rugosidade (R_z). Esta é determinada tal como se ilustra na figura 19.

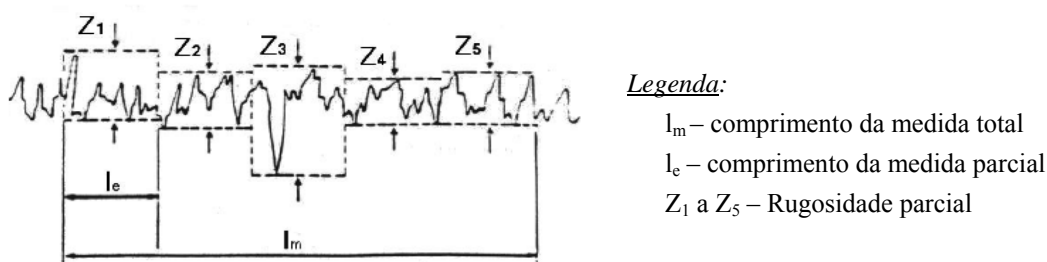


Figura 19: Rugosidade média [8]

O comprimento da medida l_m deve ser de 15 mm dividido em cinco comprimentos parciais. A distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo é determinada para cada comprimento parcial. A rugosidade média é a média destas cinco distâncias expressas em mm e é medida a $2/3$ da espessura da chapa a partir da face superior, como é possível observar na figura 20.

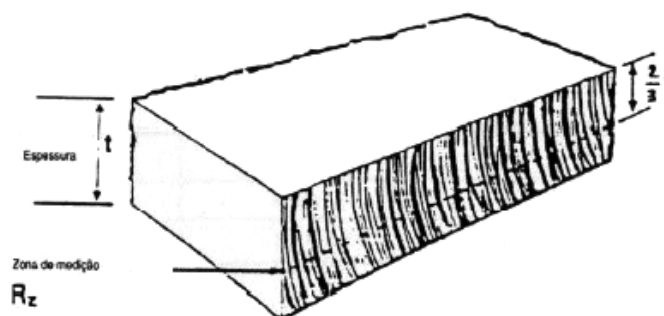


Figura 20: Localização da medida da rugosidade média [8]

Em chapas de espessuras inferiores a 2 mm, a rugosidade média é medida a meia espessura. A rugosidade é medida em μm .

Tal como a tolerância de perpendicularidade e de inclinação, a norma DIN 2310 apresenta três níveis para a rugosidade, como é possível observar na tabela 7.

Tabela 7: Cálculo da rugosidade para os três níveis [11]

Cálculo da rugosidade	
Nível 1	$10 + 2 \times \text{espessura}$
Nível 2	$30 + 3 \times \text{espessura}$
Nível 3	$60 + 4 \times \text{espessura}$

O modelo CCL cumpre o nível 2 da norma DIN 2310. [11]

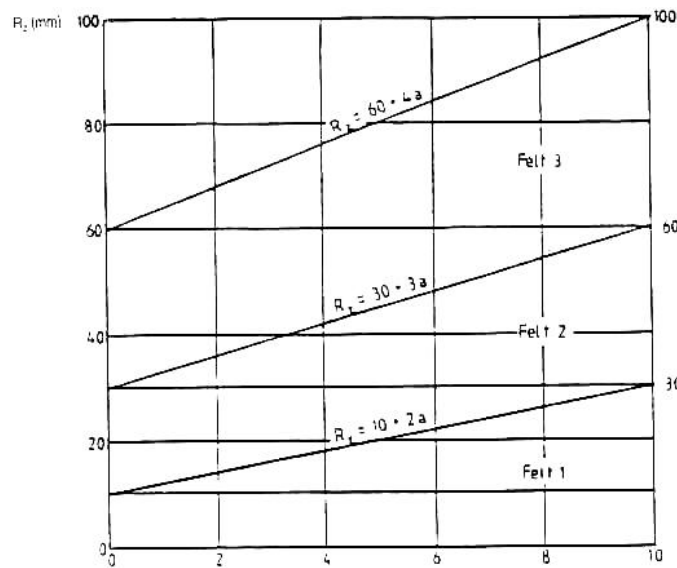


Figura 21: Rugosidade em função do nível de qualidade [2]

8.2.3. Desvio entre estrias

O desvio entre estrias (n) é o desvio entre a linha de corte e a linha perpendicular à superfície, como é possível observar na figura 22.

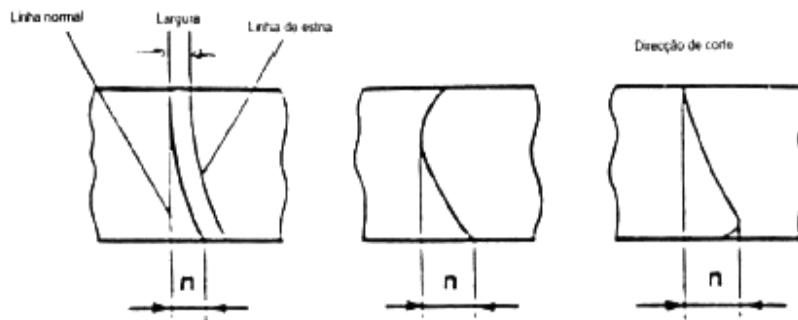


Figura 22: Definição do desvio entre estrias [8]

8.2.4. Arredondamento na aresta superior da superfície de corte

O arredondamento na aresta superior da superfície de corte (r) fornece indicação sobre a forma da aresta superior de corte. Esta pode ser: viva ou arredondada com ou sem garganta, como é ilustrado na figura 23.

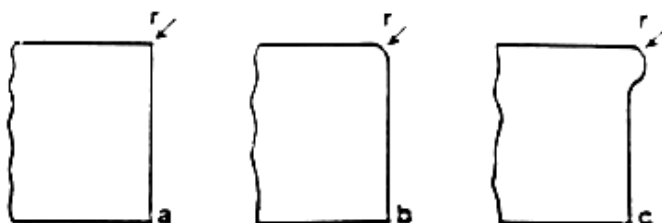


Figura 23: Arredondamento da aresta superior da superfície de corte [8]

- a) Aresta viva
- b) Aresta fundida com ou sem garganta
- c) Aresta com material fundido e garganta

8.3. MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS

A medição dos parâmetros enunciados anteriormente deve ser efectuada em superfícies planas e limpas, ou seja isentas de defeitos tais como crateras, entalhes, bordos queimados ou escória. A parte superior e inferior da superfície de corte é utilizada como ponto de referência. Deste modo, antes de se efectuar o estudo, as peças foram mergulhadas numa tina cuja função será a de limpar as peças removendo os óxidos presentes nestas.

8.3.1. Medição da tolerância de perpendicularidade e inclinação

Para a medição da tolerância de perpendicularidade e inclinação recorreu-se a utilização de um paquímetro, um aristo e dos desenhos 2D das peças em estudo para determinar a maior distância perpendicular entre a superfície cortada real e teórica.

8.3.2. Medição da rugosidade

As rugosidades foram retiradas utilizando um rugosímetro *Hommelwerke* (Turbo Wave V7.20). As medições foram efectuadas no CETRIB, Unidade de Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Na medição da rugosidade, o instrumento mostrará o perfil da peça composto da rugosidade e da ondulação:

- **Ondulação:** é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento bem maior que a sua amplitude. A frequência destas ondas é pequena.
- **Rugosidade superficial:** é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento semelhantes a sua amplitude. A frequência destas ondas é bastante elevada.

Para a medição da rugosidade, esta deve ser separada da ondulação através da filtragem, como mostra a figura 24. Um filtro de rugosidade separa o perfil de rugosidade dos inúmeros desvios de forma. [12]

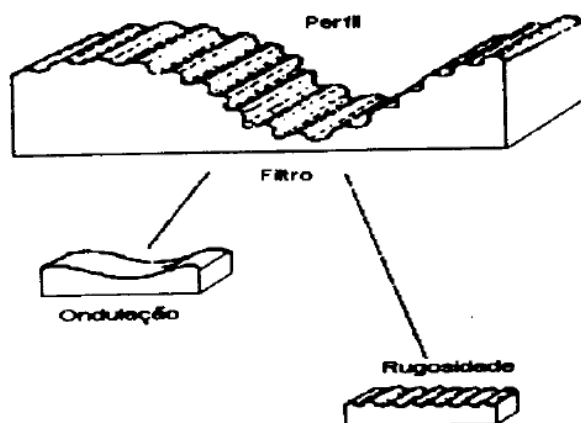


Figura 24: Perfil da peça – Rugosidade + Ondulação [12]

O comprimento de onda do filtro, denominado por “*cut-off*”, determina o que deve passar e o que não deve passar. Os sinais com frequência inferior a frequência do “*cut-off*” são eliminados.

Tabela 8: Comprimento de amostragem (“*cut-off*”) [12]

Mínimo comprimento da amostragem “ <i>Cut-off</i> ” (mm)	Rugosidade R_a (mm)
0,25	De 0 até 0,1
0,80	Maior que 0,1 até 2,0
2,50	Maior que 2,0 até 10,0
8,00	Maior que 10,0

Para a medição das rugosidades das peças e amostras em estudo utilizou-se um “*cut-off*” de 0,80 mm.

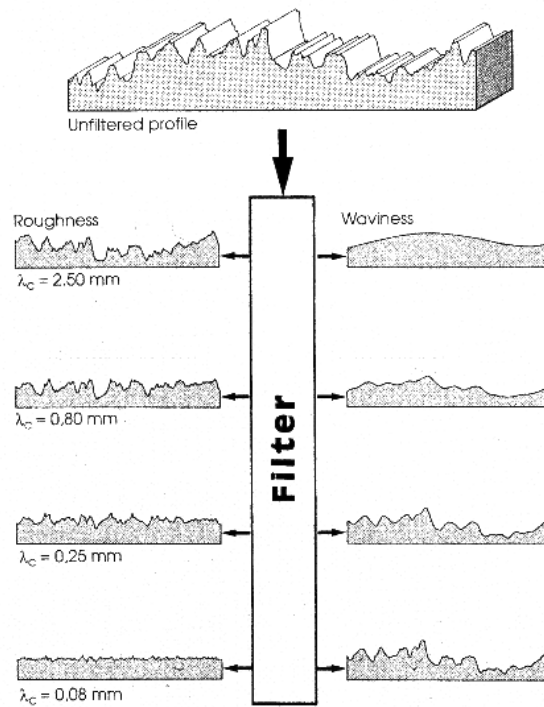


Figura 25: Diferentes comprimentos de “cut-off” e respectivos perfis de rugosidade e de ondulação [12]

Para um melhor estudo, decidiu-se inserir no estudo outros parâmetros, sendo estes o seguintes:

- Rugosidade média (R_a): é o parâmetro mais utilizado. A sua característica principal (valor) pode ser indicada pelo número de classe de rugosidade correspondente, conforme a tabela 9.

Tabela 9: Característica da rugosidade R_a segundo a norma NBR 8404/84

Classe de Rugosidade	R_a (μm)
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

- Rugosidade máxima ($R_{m\acute{a}x}$): é o maior valor das rugosidades parciais.

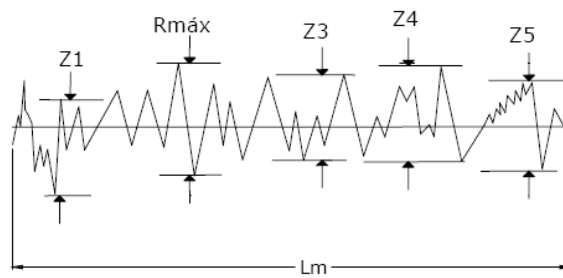


Figura 26: Rugosidade máxima ($R_{m\acute{a}x}$) [12]

A figura 27 ilustra a direcção em que foi efectuada a leitura das três medições de rugosidade na superfície de corte de cada peça e amostras em estudo.

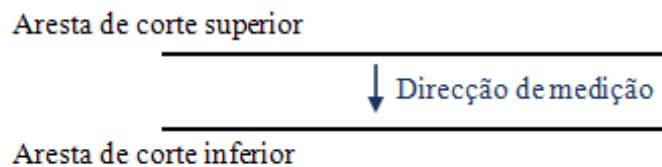


Figura 27: Direcção de medição utilizada para retirar os valores da rugosidade

8.3.3. Medição do atraso entre estrias

A medição do atraso entre estrias foi efectuada recorrendo a utilização de um macroscópio. As macrografias foram realizadas no laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A ampliação na ocular da lupa vai de mais ou menos 6x a 40x, sendo o factor da lupa para a câmara desconhecido.

8.4. Experimentação (estudo 1)

Como referido anteriormente, nesta parte do trabalho será efectuada uma análise da manutenção do laser e sua influência na qualidade da superfície de corte.

Inicialmente, averiguou-se quais eram os métodos utilizados na empresa e os tempos de intervalo necessários para efectuar a manutenção dos componentes que influenciam na qualidade de corte. Verificou-se que a manutenção do laser é efectuada de três em três dias, consistindo na substituição da lente, boquilha e peça cerâmica se necessária. Durante o intervalo de manutenção aplicado pela empresa, estes componentes poderão ser trocados, isto é a peça cerâmica pode se fracturar devido a uma má qualidade da chapa por exemplo.

De modo a ajudar a registar todos os dados necessários para realizar este estudo, foi elaborado uma folha de observação⁵ onde consta a seguinte informação:

- Dia em que o estudo foi elaborado;
- Dia da manutenção do laser;
- Dados acerca da peça (material, espessura e gás de assistência utilizado);
- Observações visuais (estrias, rebarbas, etc.);
- Dados relativos a norma DIN 2310, isto é comparação dos dados retirados directamente da peça com os da norma (u, R_z, etc.).

O estudo 1 procedeu-se do seguinte modo:

- Levantamento de peças realizadas no 1º, 2º e 3º dia após a manutenção do laser;
- Medição dos diversos parâmetros enunciados no ponto 8.2;
- Análise e discussão dos resultados obtidos.

8.4.1. Resultados obtidos da qualidade das peças em estudo

Inicialmente, retirou-se os dados necessários das peças em estudo (material, espessura, intervalo de manutenção) como também se procedeu a uma inspecção visual (existência de rebarbas e forma das estrias).

Tabela 10: Características das peças em estudo

	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5
Material	Aço	Aço	Aço	Aço Inox.	Alumínio
Espessura (mm)	3	5	4	6	3
Gás de assistência	O ₂	O ₂	O ₂	N ₂	N ₂
Dia de realização da peça após manutenção	0	1	1	2	2

Ao observar a figura 28 é possível constatar que a peça 1 apresenta uma superfície de corte com estrias uniformes e sem rebarbas. Apresentando numa das suas extremidades material, este material é colocado propositadamente (colocado no CNC) para que ao executar a peça esta não se desloca ou se solta, podendo danificar o laser.

⁵ Impresso da folha de observações da qualidade estão colocadas em anexo.



Figura 28: Peça 1

Observando as figuras 29 e 30, é possível constatar que ambas as peças apresentam uma superfície de corte com estrias uniformes, sem rebarbas. É de notar novamente que apresentam material numa das extremidades da peça.

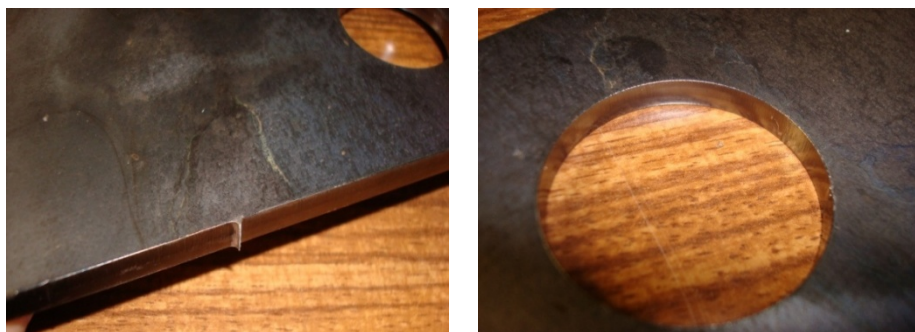


Figura 29: Peça 2

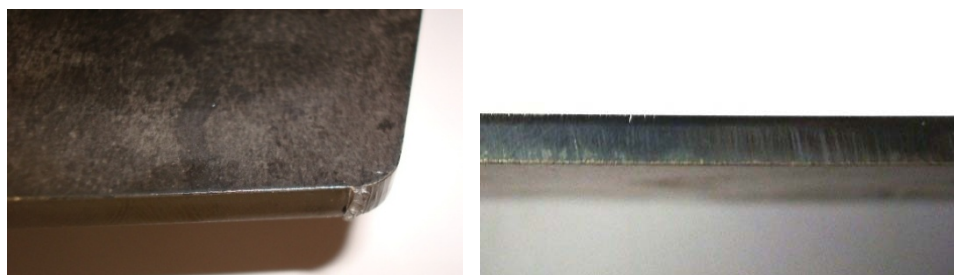


Figura 30: Peça 3

Ambas as peças (4 e 5) apresentam estrias regulares e uniformes. A peça 4 apresenta num dos lados rebarba, como é possível observar na figura 32, talvez provocado pelo descentramento da boquilha ou mesmo orifício da boquilha danificada.

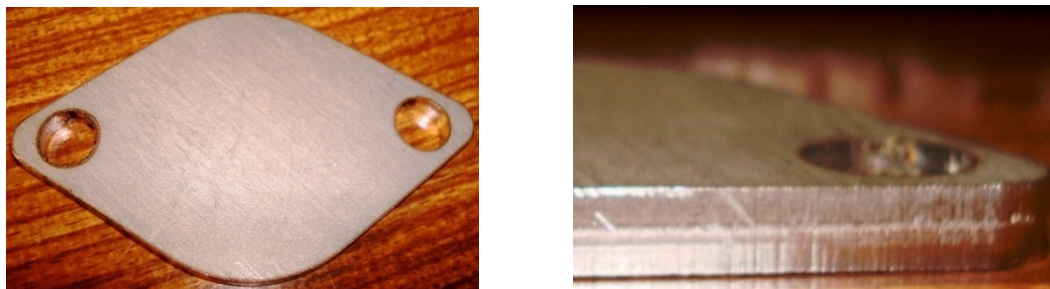


Figura 31: Peça 4



Figura 32: Rebarba no topo inferior da superfície de corte da peça 4

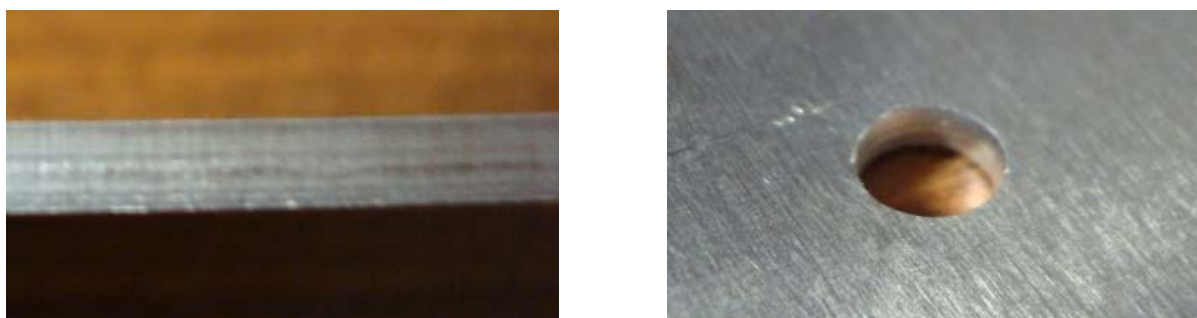


Figura 33: Peça 5

8.4.1.1. Medição de u

Para uma boa qualidade de corte, teremos de verificar que $u < u_{\text{nível2}}$. Na tabela 11 está representada os valores de u obtidos nas peças e os respectivos $u_{\text{nível2}}$ (tabela 6, nível2).

Tabela 11: Valores obtidos de u

	Nº PEÇA				
	1	2	3	4	5
u (mm)	0	0	0	0	0,01
$u_{\text{nível2}}$ (mm)	0,145	0,175	0,16	0,19	0,145

8.4.1.2. Medição de R_z , R_a e $R_{máx}$

Nas tabelas 12, 13 e 14 estão apresentados os valores de R_z obtidos das peças em estudo, como também os valores de R_a e $R_{máx}$ que permitirão um estudo mais alargado da qualidade da superfície de corte das peças em estudo. Foram efectuadas três medições para retirar os valores de R_z , R_a e $R_{máx}$.

As figuras 34 à 38 representam o perfil de rugosidade da medição 2, isto é medição intermédia entre a aresta de corte superior e inferior, das peças em estudo.

Tabela 12: Valores de R_z , $R_{máx}$ e R_a obtidos pela leitura do rugosímetro da peça retirada no dia da execução da manutenção do laser

Medição	Peça 1		
	R_z (μm)	$R_{máx}$ (μm)	R_a (μm)
1	1,58	2,00	0,28
2	2,84	4,89	0,47
3	2,46	3,86	0,47
Valor Médio	2,29		0,41
Classe	N5		

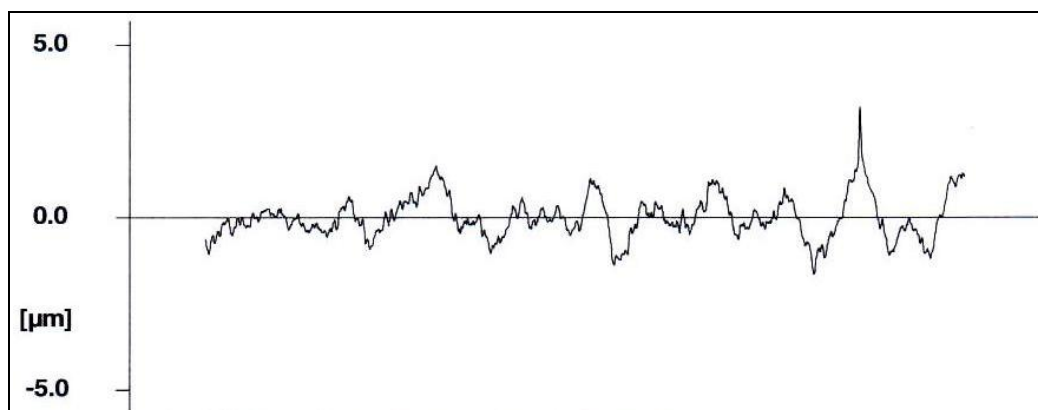


Figura 34: Perfil de rugosidade da peça 1

Tabela 13: Valores de R_z , $R_{máx}$ e R_a obtidos pela leitura do rugosímetro das peças retiradas após um dia da execução da manutenção do laser

Medição	Peça 2			Peça 3		
	R_z (μm)	$R_{máx}$ (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	$R_{máx}$ (μm)	R_a (μm)
1	2,33	2,68	0,43	3,93	4,98	0,78
2	6,53	11,54	1,27	6,59	8,85	1,44
3	6,65	10,89	1,39	5,80	6,70	1,38
Valor Médio	5,17		1,03	5,44		1,20
Classe	N6			N6/N7		

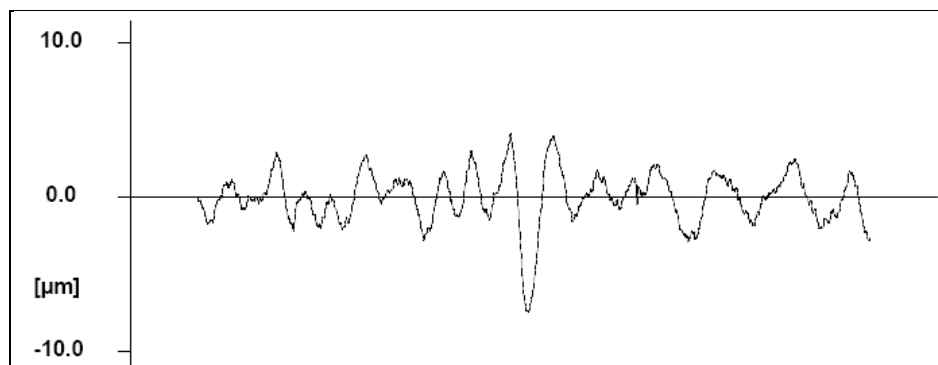


Figura 35: Perfil de rugosidade da peça 2

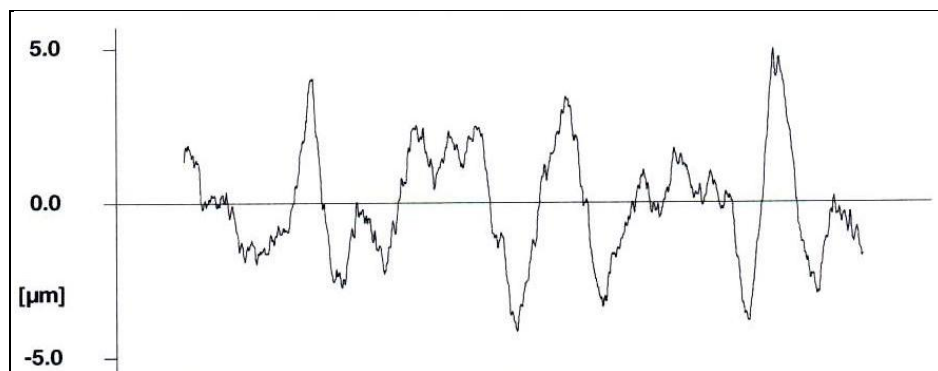


Figura 36: Perfil de rugosidade da peça 3

Tabela 14: Valores de R_z , $R_{máx}$ e R_a obtidos pela leitura do rugosímetro das peças retiradas após dois dias da execução da manutenção do laser

Medição	Peça 4			Peça 5		
	R_z (μm)	$R_{máx}$ (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	$R_{máx}$ (μm)	R_a (μm)
1	11,32	17,20	2,07	8,57	11,57	1,53
2	10,34	12,36	2,13	13,05	15,70	2,48
3	6,22	7,69	1,17	13,37	17,02	2,29
Valor Médio	9,29		1,79	11,66		2,10
Classe	N7			N8		

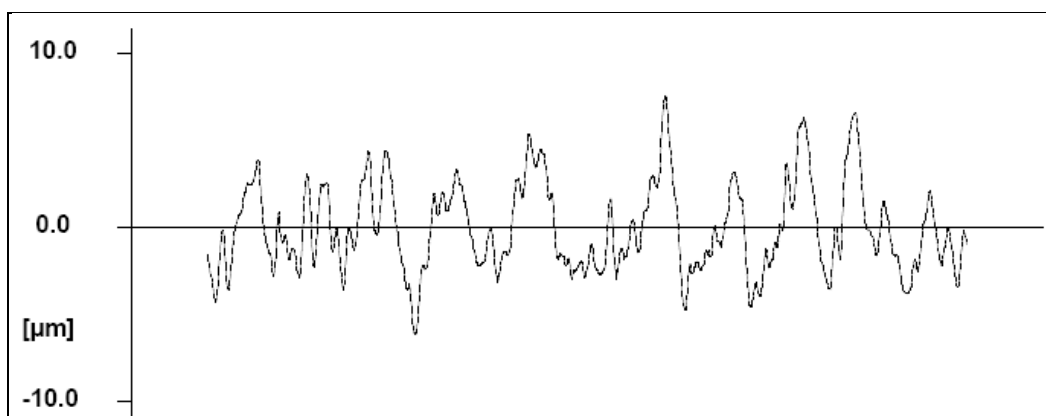


Figura 37: Perfil de rugosidade da peça 4

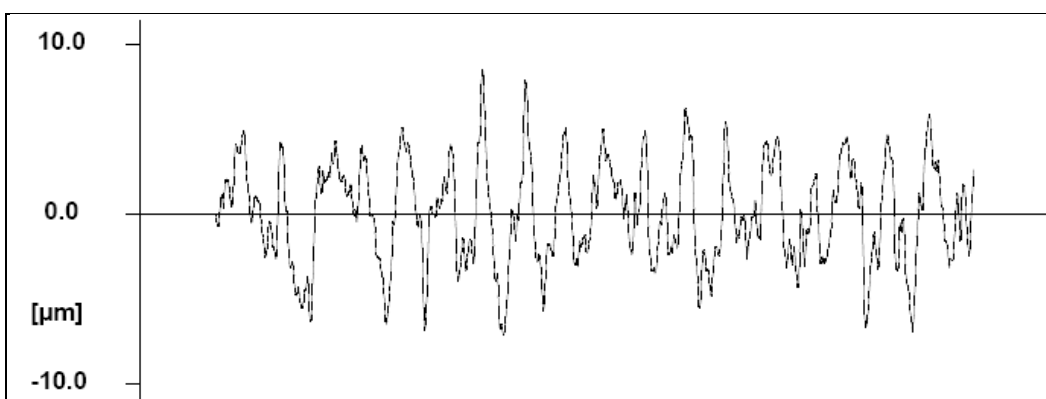


Figura 38: Perfil de rugosidade da peça 5

Ao observar os resultados obtidos, constata-se que a medida que aumenta o intervalo de manutenção, aumenta o valor de R_z , R_a e $R_{máx}$. Constata-se em alguns casos como por exemplo na peça 4 medição 1, uma diferença significativa entre R_z e $R_{máx}$. Esta diferença deve-se talvez à existência de defeitos na zona onde se efectuou a medição destes valores.

8.4.1.3. Medição de n

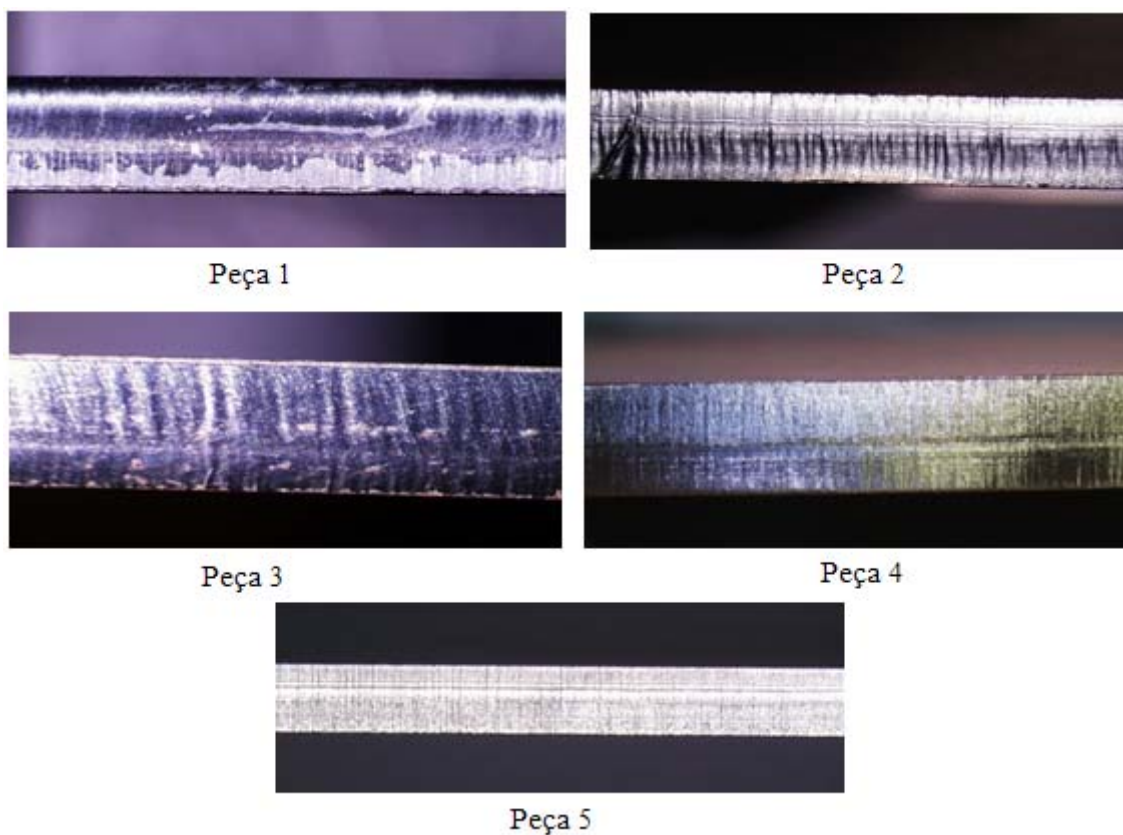


Figura 39: Macrografias da superfície de corte das peças em estudo

A partir das macrografias tiradas as superfícies de corte das peças em estudo é possível observar que é difícil retirar o valor do atraso entre estrias (n) das peças em estudo. No entanto, é possível constatar que as peças 1, 4 e 5 apresentam estrias regulares e as restantes peças estrias regulares com curva no topo inferior de corte. De notar também que as estrias se tornam mais proeminentes a medida que a espessura da chapa aumenta.

8.4.1.4. Observação de r

A tabela 15 apresenta as características das peças em estudo quanto ao tipo de arredondamento da aresta superior de corte.

Tabela 15: Características observadas do arredondamento da aresta superior da superfície de corte

Peça	Observação de r
1	Aresta viva
2	Aresta viva
3	Aresta fundida com ou sem garganta
4	Aresta viva
5	Aresta viva

8.5. Experimentação (estudo 2)

Após ter analisado a qualidade das superfícies de corte obtidas no intervalo de manutenção do laser exercido na empresa, constatou-se que a qualidade de corte poderia ser melhorada no que se refere a classe da rugosidade, diminuindo o intervalo de manutenção. Para tal, decidiu-se estudar qual seria o intervalo óptimo de manutenção do laser que irá permitir a obtenção de superfícies de corte de óptima qualidade. Para tal, decidiu-se retirar uma amostra em cada chapa efectuada ao longo do intervalo de manutenção (3 dias) e analisar as superfícies de corte.

Neste estudo iremos incidir apenas nos seguintes parâmetros: rugosidade e observação das estrias para averiguar a qualidade de corte das superfícies.

O estudo 2 procedeu-se do seguinte modo:

- Levantamento de amostras realizadas no 1º dia, 2º dia e 3º dia de manutenção do laser;
- Medição de R_z , R_a e $R_{máx}$;
- Observação das estrias;
- Análise e discussão dos resultados obtidos.

8.5.1. Medição da rugosidade

As medições da rugosidade foram retiradas de modo idêntico ao estudo 1, isto é recorreu-se a utilização do rugosímetro para a obtenção de R_z e R_a . Efectuaram-se três medições na direcção de medição referida na figura 27.

Tabela 16: Valores médios de R_z , R_a e respectiva classe de rugosidades das amostras em estudo

Nº Amostra	R_z (μm)	R_a (μm)	Classe
1	2,17	0,31	N4/N5
2	1,68	0,33	N4/N5
3	2,29	0,41	N5
4	6,07	0,92	N6
5	4,19	0,82	N6
6	5,81	0,99	N6
7	4,91	1,07	N6/N7
8	7,07	1,24	N6/N7
9	9,94	1,62	N7
10	10,04	1,80	N7
11	11,75	2,27	N7/N8

- Amostras retiradas no dia da realização da manutenção do laser
- Amostras retiradas um dia após a realização da manutenção do laser
- Amostras retiradas dois dias após a realização da manutenção do laser

Nas figuras 40 à 44 estão representados os perfis de rugosidade das seguintes amostras: 1, 3, 4, 8 e 10 representando as diferentes classes de rugosidade.

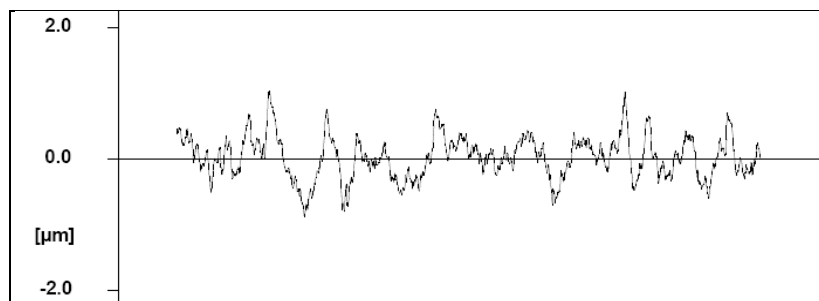


Figura 40: Perfil de rugosidade da amostra nº1

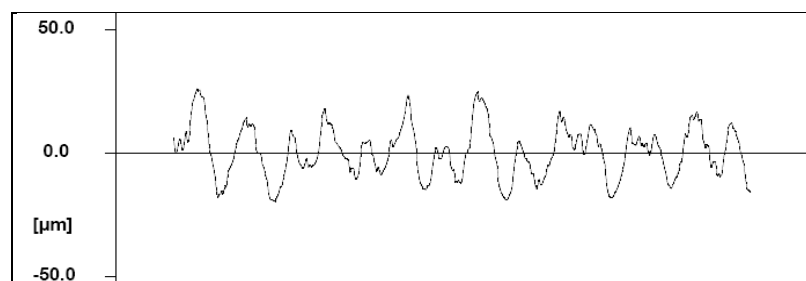


Figura 41: Perfil de rugosidade da amostra nº3

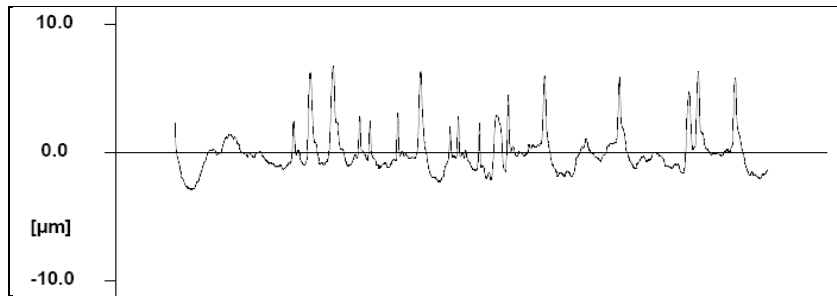


Figura 42: Perfil de rugosidade da amostra nº 4

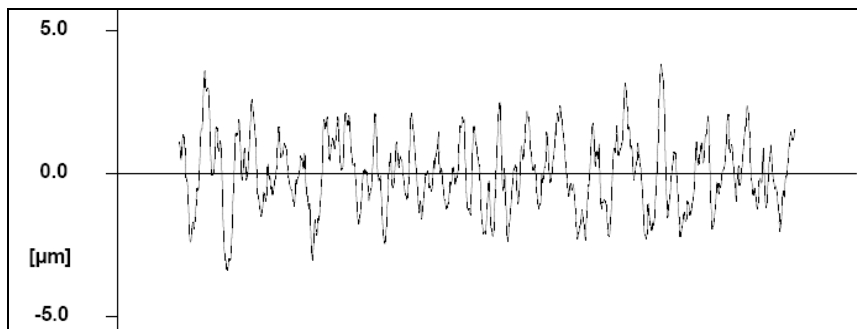


Figura 43: Perfil de rugosidade da amostra nº 8

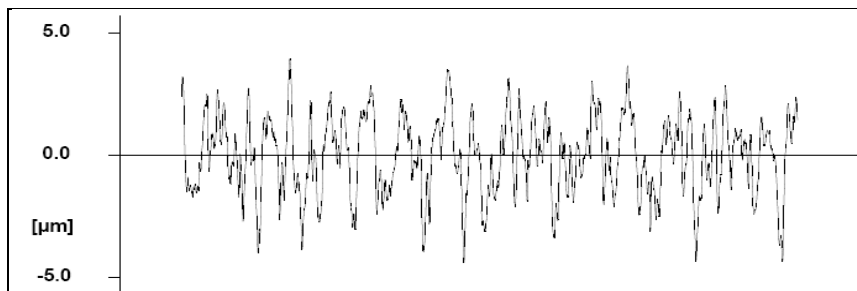


Figura 44: Perfil de rugosidade da amostra nº 10

8.5.2. Observação da superfície de corte (estrias)

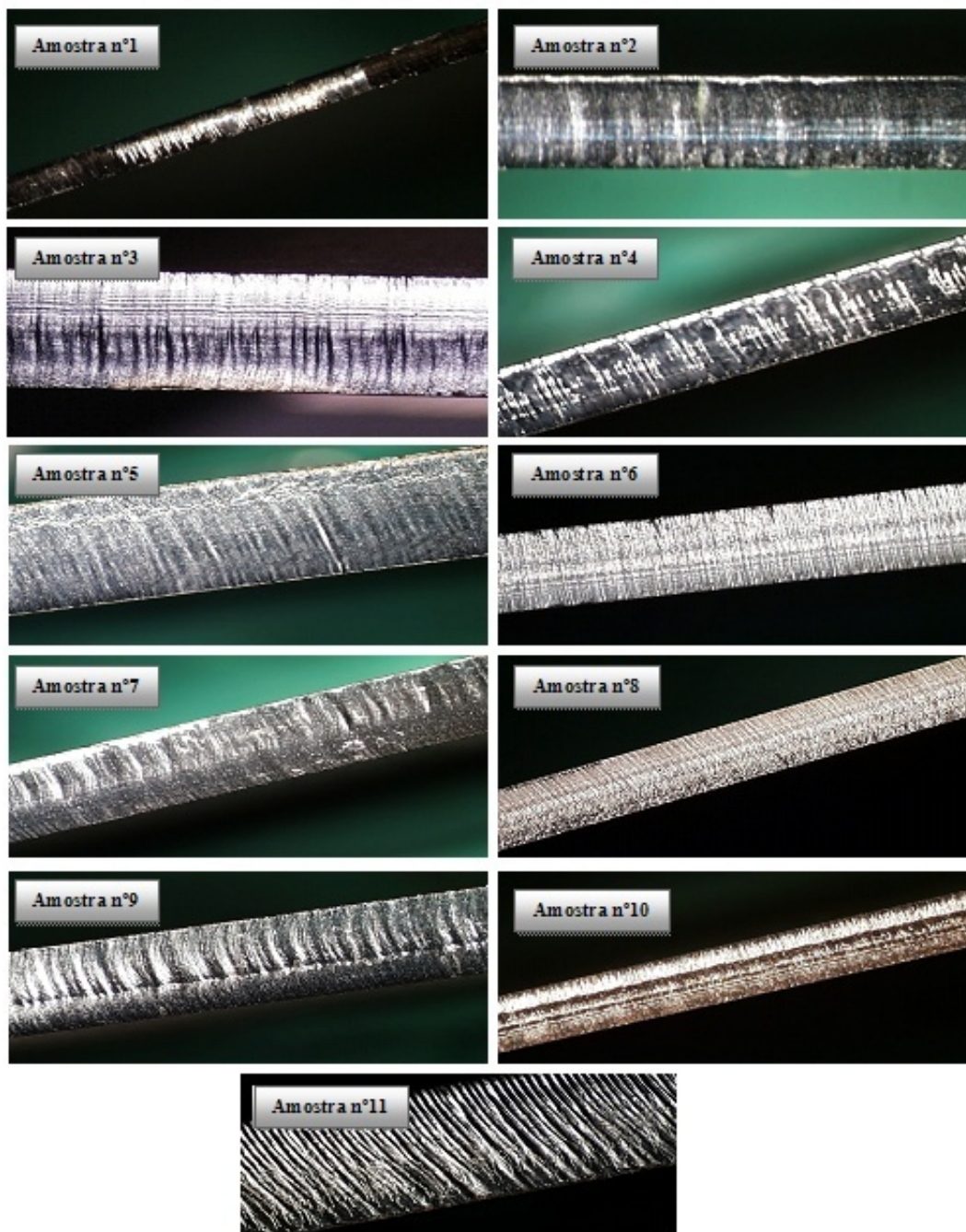


Figura 45: Macrografias da superfície de corte das amostras em estudo

Tal como referido no estudo anterior, quanto maior for a espessura mais proeminentes são as estrias. É de notar que a maioria das amostras apresentam estrias regulares.

8.6. Discussão dos resultados obtidos. Conclusões

A qualidade das superfícies de corte das peças obtidas a laser é fundamental. Ao longo do estudo efectuado, constatou-se que o intervalo de manutenção do laser (3 dias) empregue pela empresa é aceitável para a obtenção de uma boa qualidade de corte, visto que os valores obtidos dos parâmetros acima mencionados são admissíveis segundo a norma DIN 2310, não devendo contudo ultrapassar este intervalo de manutenção do laser.

A importância do estudo do acabamento superficial, medido através da rugosidade, aumenta na medida que cresce a precisão de ajuste entre peças a serem acoplados, onde somente a precisão dimensiona de forma e de posição não é suficiente para garantir do par acoplado. O acabamento superficial é fundamental onde houver desgaste, atrito, corrosão, aparência, resistência a fadiga, transmissão de calor, entre outros.

Tanto no estudo 1 como no estudo 2 verificou-se que as rugosidades médias obtidas são muitos inferiores ao nível de qualidade que o equipamento cumpre, sendo o desejado. É de notar, que as peças 4 e 5 apresentam em algumas das suas medições $R_z \ll R_{máx}$, podendo ser causador de tal a existência de defeitos na zona de medição.

Ao efectuar o estudo 1, constatou que no final do intervalo de manutenção as peças apresentam uma classe de rugosidade superior a N6 (qualidade de corte mais grosseira). O estudo 2 permitiu estabelecer um intervalo de manutenção no caso de ser exigido uma classe de rugosidade inferior ou igual a N6. A partir dos resultados obtidos constatou-se que, se as peças a produzir requerem uma classe de rugosidade inferior a N6 será necessário efectuar a manutenção do laser dois dias após a última manutenção. Se este critério não for exigido a empresa poderá continuar a realizar a manutenção do laser no intervalo já empregue.

9. INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS MÉTODOS E TEMPOS

Hoje em dia, o estudo de métodos e tempos se torna cada vez mais importante.

O estudo de métodos foi desenvolvido por *Frank B. Gilbreth* e a sua esposa *Lilian M. Gilbreth*, procurando observar e desenvolver a maneira como a maneira é executado.

O estudo de tempos, por sua vez, foi desenvolvido no início do século XX por *F. W. Taylor*, um engenheiro americano que trabalhava na indústria extractiva e se tornou célebre por ter adoptado a divisão do trabalho em tarefas elementares repetitivas, também se questionou sobre estes assuntos, com o objectivo de responder a duas perguntas básicas:

- Qual a melhor maneira de executar esta tarefa?
- Qual deverá ser o trabalho diário a executar por cada trabalhador para otimizar o trabalho de grupo?

O estudo de tempos é utilizado para estabelecer um tempo padrão para a performance no trabalho.

Com o passar dos anos, estes dois tipos de estudos ficaram mutuamente dependentes. [13]

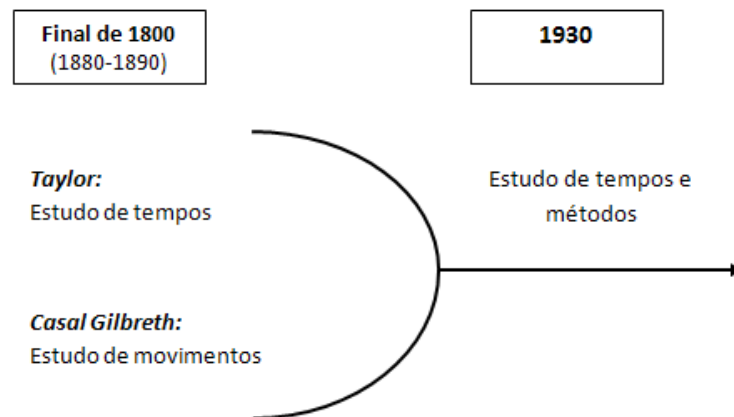


Figura 46: Histórico da evolução do estudo de tempos e métodos [14]

De seguida, iremos abordar a metodologia que irá permitir efectuar o estudo de métodos e tempos referente ao processo em estudo.

9.1. Objectivo do estudo de métodos e tempos

O estudo de métodos e tempos consiste no estudo sistemático dos sistemas de trabalho, tendo por objectivo desenvolver o método mais adequado, geralmente de menor custo, padronizar este método, determinar o tempo necessário para executar uma tarefa e orientar o trabalhador no método especificado. [15]

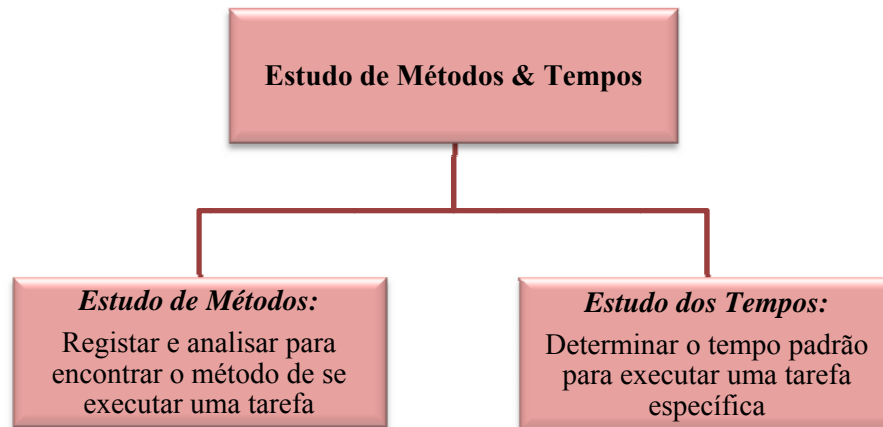


Figura 47: Objectivos do estudo de tempos e métodos [14]

9.2. Estudo dos métodos

O *método* é um processo sistemático de solução de problemas para ajudar na determinação do processo ideal. O estudo de métodos tem por finalidade reduzir custos, melhorar o fluxo da matéria-prima e tornar a actividade mais cómoda para o trabalhador, isto é encontrar o melhor método de se efectuar uma tarefa. [15]

A metodologia a seguir para se executar um estudo de métodos assenta na realização de quatro actividades, que deverão ser cumpridas com rigor para que o resultado final seja fiável, sendo estas as seguintes:

- Observação
- Recolha/registo de dados e informações
- Análise crítica
- Proposta de novos métodos ou oportunidades de melhoria [13]

9.2.1. Observação

A observação pode ser feita por visualização, entrevista ou experimentação directa da tarefa ou operação em análise. Existem um conjunto de informações que, devem obrigatoriamente, ser observadas e recolhidas para posterior tratamento, quando se pretende estudar um método. Deve-se proceder ao registo de tudo o que se considerar que pode vir a ser útil.

Tabela 17: Quadro-síntese de questões a formular para uma observação [13]

1. Objecto (tarefa ou operação)	O que é que está a ser realizado?
	Porque é que tem de ser feito?
	Existe alternativa ao que está a ser feito?
	O que poderia ser feito em alternativa?
2. Local	Onde está a ser realizado?
	Porque está a ser feito nesse local?
	Existe um lugar alternativo?
	Onde deveria ser feito a alternativa?
3. Sequência	Quando está a ser realizado?
	Porque está a ser efectuado nessa sequência?
	Existe momento alternativo?
	Quando é que poderia ser feito em alternativa?
4. Executante	Quem está a realizar?
	Porquê?
	Existe outra pessoa que o pudesse realizar como alternativa?
	Quem deve fazer como alternativa?
5. Meios/ recursos	Como está a ser realizado?
	Porquê está a ser utilizado esse processo?
	Que processo alternativo poderia ser utilizado?
	Como deveria ser feito utilizando um processo alternativo?

9.2.2. Registo de dados

A recolha dos dados deverá ser realizada o mais perto possível da fonte, devendo recorrer-se ao tratamento e sistematização da observação através da utilização de folhas de observações. [13]

9.2.3. Esquematização

A esquematização permite o registo do método de análise de uma forma gráfica e compacta, o que é útil para a sua posterior análise.






Existem vários esquemas gráficos para representar a grande maioria dos problemas que surgem em qualquer organização. No entanto, será abordado neste trabalho apenas um tipo de gráfico para a análise do processo: fluxogramas. [13]

Tabela 18: Fluxograma e suas aplicações [13]

TIPO DE GRÁFICO	ÁREA DE APLICAÇÃO	EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO
Fluxograma	Processo de fabrico	Apresentação de todo o processo/método de transformação do produto
	Parte específica de um método	Analisar as movimentações dos produtos dentro das secções

A separação das tarefas constitui a base para a elaboração dos fluxogramas, como também para outros gráficos de processo. Para efectuar esta divisão de tarefas é possível recorrer a utilização dos grafismos apresentados na tabela 19.

Tabela 19: Simbologia utilizada para a elaboração de um fluxograma [13]

SÍMBOLO	TIPO	DESCRIÇÃO
	<i>Operação</i>	Existe quando um objecto é modificado intencionalmente numa ou mais das suas características.
	<i>Transporte</i>	Ocorre quando um objecto é deslocado de um lugar para outro.
	<i>Inspecção</i>	Ocorre quando um objecto é examinado para a identificação ou comparado com um padrão de quantidade ou qualidade.
	<i>Espera</i>	Ocorre quando a execução da próxima operação planeada não é efectuada.
	<i>Armazenagem</i>	Ocorre quando um objecto é mantido sob controlo e a sua movimentação requer uma autorização.

Em suma, o estudo dos métodos não é mais que uma sistematização de passos de todos os dias, ou seja, em qualquer função devemos ser capazes de observar e ter capacidade crítica. No entanto, a capacidade de melhorar só existe quando é possível comparar com um ponto de partida. Deste modo, o estudo dos métodos consiste em identificar a forma como se realiza produtos, operações ou tarefas.

9.3. Estudo dos tempos

O *estudo de tempos* é uma técnica de medida de trabalho que permite registar os tempos e os factores de actividade para os elementos de uma dada operação ou tarefa, executada em determinadas condições, e analisar os dados recolhidos, a fim de se obter o tempo necessário para executar esta tarefa (designado por *tempo padrão*) a um nível de rendimento bem definido.

O estudo de tempos tem por finalidade determinar o tempo padrão, sendo este tempo uma quantidade de tempo necessário para desenvolver uma unidade de trabalho.

Para a execução do estudo de tempos é necessário:

- Obter e registar informações sobre o a operação e o operador em estudo;
- Dividir a operação em elementos e registar uma descrição completa do método;
- Observar e registar o tempo gasto pelo operador;
- Determinar o número de ciclos a ser cronometrado;
- Avaliar o ritmo do operador;
- Verificar se foi cronometrado o número suficiente de ciclos;
- Determinar o tempo padrão. [16]

9.3.1. Divisão da actividade em tarefas

A primeira fase do estudo de tempos consiste em escolher o trabalho a estudar, obtendo e registando informações sobre a operação em estudo. Regra geral, existe sempre uma razão para se efectuar um estudo de tempos. Eis alguns exemplos: novo trabalho que nunca foi efectuado anteriormente (nova peça, nova operação, nova tecnologia, etc.), mudança de método que exige a fixação de um novo tempo de referência, cálculo da necessidade de mão-de-obra, entre outros.

9.3.2. Registo dos dados relevantes

É indispensável registar todos os dados relativos às condições em que o trabalho é efectuado, aos métodos e aos elementos de actividade. Trata-se de efectuar uma descrição, por escrito, do método em estudo.

As informações a recolher podem ser agrupadas da seguinte maneira:

- *Informação que permite encontrar e identificar o estudo com rapidez:* número do estudo, número de folha de observações, nome do agente responsável pelo estudo do trabalho e a data do estudo;
- *Informação que permite identificar com precisão o processo, o método, a instalação ou a máquina:* descrição da operação ou actividade, descrição do centro do trabalho, máquina e estado de funcionamento (nome do fabricante, modelo, dimensões, etc.). Registrar-se se houve condições anormais;
- *Informação que permite identificar o executante:* nome, categoria profissional, sexo e idade;
- *Informação relativa à duração do estudo:* hora de início e do fim e tempo passado.

9.3.3. Decomposição da operação ou actividade em elementos

Esta fase consiste em decompor a operação ou actividade em elementos, efectuando uma descrição completa do método. O elemento será cada parte distinta de uma dada operação ou actividade, compreendendo, por um lado, uma ou várias tarefas ou movimentos fundamentais do executante e, por outro lado, operações executadas pela máquina ou fases do processo.

A decomposição de uma operação ou actividade em elementos apresenta as vantagens de permitir distinguir o trabalho produtivo de uma tarefa improdutivo, controlar os tempos de referência, de modo a que seja possível, mais tarde, determinar rapidamente qualquer omissão ou inserção de um novo elemento. A escolha dos elementos de uma dada operação devem seguir os seguintes critérios:

- Os elementos devem ser facilmente identificáveis;
- Os elementos devem ser de curta duração;
- Os elementos devem ser os mais unificados possíveis;
- Os tempos “homem” devem ser distintos dos tempos “máquina”: o trabalho manual executado enquanto a máquina controla a totalidade do tempo deve ser separado do trabalho manual executado enquanto a totalidade do tempo é controlada pelo trabalho manual. [13]

9.3.4. Cronometragem – Equipamentos de base

Para se proceder ao estudo de tempos é necessário dispor de um mínimo de material de base, para uso de campo. Para retirar os tempos pretendidos recorre-se a utilização de um cronómetro.

Para o estudo de tempos é, normalmente utilizados dois modelos de cronómetro com retorno a zero e partida automática e o cronómetro vulgar de leitura contínua. Existem ainda os de leitura fixa.

Cronometragem contínua

O cronómetro é posto em marcha no início do primeiro elemento do primeiro ciclo e só para no final do estudo. No fim de cada elemento, o agente de estudo de tempos regista a leitura do cronómetro. Os diversos tempos elementares são obtidos por subtracções sucessivas após o estudo terminado.

Cronometragem com retorno a zero

O cronómetro é posto a trabalhar no início do primeiro elemento do primeiro ciclo e é simultaneamente lido e retornado a zero no fim desse elemento, iniciando imediatamente a contagem do tempo do elemento seguinte, e assim sucessivamente. Deste modo, os tempos elementares são obtidos sem necessidade de se efectuarem as subtracções, necessárias na cronometragem contínua.

Cronometragem de leitura fixa

No cronómetro de leitura fixa, um dos ponteiros pára quando se carrega num disparador suplementar, enquanto o outro continua a andar. Carregando uma segunda vez neste disparador o ponteiro parado alcança o que está em movimento e ambos continuam a avançar. Deste modo, os resultados são lidos com o ponteiro parado e não em movimento, como acontece nos dois métodos anteriores, o que aumenta, evidentemente, a precisão da leitura. [13,15]

Folhas de observações ou de cronometragem

É necessário elaborar folhas de observações pois estas irão permitir registar e recolher os dados de uma forma sistematizada e de fácil consulta. As folhas de observações mais utilizadas dividem-se em duas categorias:

- Impressos de campo, nos quais se registam as observações nos locais de trabalho.
- Impressos de cálculo, de análise e de resumo dos resultados do estudo, usados no gabinete.

9.4. Experimentação

Nesta parte do trabalho será feito a análise dos métodos e tempos envolvidos na produção de peças por laser na empresa. Inicialmente procedeu-se ao estudo dos métodos e tempos empregues pela empresa. Após a elaboração deste estudo, decidiu-se, se possível, aperfeiçoar o método e os tempos de trabalho.

9.4.1. Fluxograma e mapa do processo

Numa primeira fase, observou-se e registou-se todos os passos efectuados pelo método actual da empresa para a obtenção de um produto por corte laser. De seguida, com auxílio dos dados registados da observação, referida anteriormente, elaborou-se um fluxograma do processo (ver anexo C) e um mapa onde é possível visualizar o posicionamento dos objectos necessários e as movimentações da chapa e do operador para a execução do processo.

A tabela 20 demonstra o número de operações, transporte, inspecção, espera e armazenagem utilizados pelo método actual da empresa, retirado a partir do fluxograma efectuado anteriormente.

Tabela 20: Total de operações, transporte, inspecção, espera e armazenagem

Nº de Operações	9
Nº de Transporte	2
Nº de inspecção	1
Nº de Espera	4
Nº de Armazenagem	2

As figuras 48 e 49 representam as posições dos elementos necessários para produção das peças cortadas no equipamento de corte por laser e movimentação da chapa e do operador respectivamente. As chapas são colocadas consoante as necessidades.

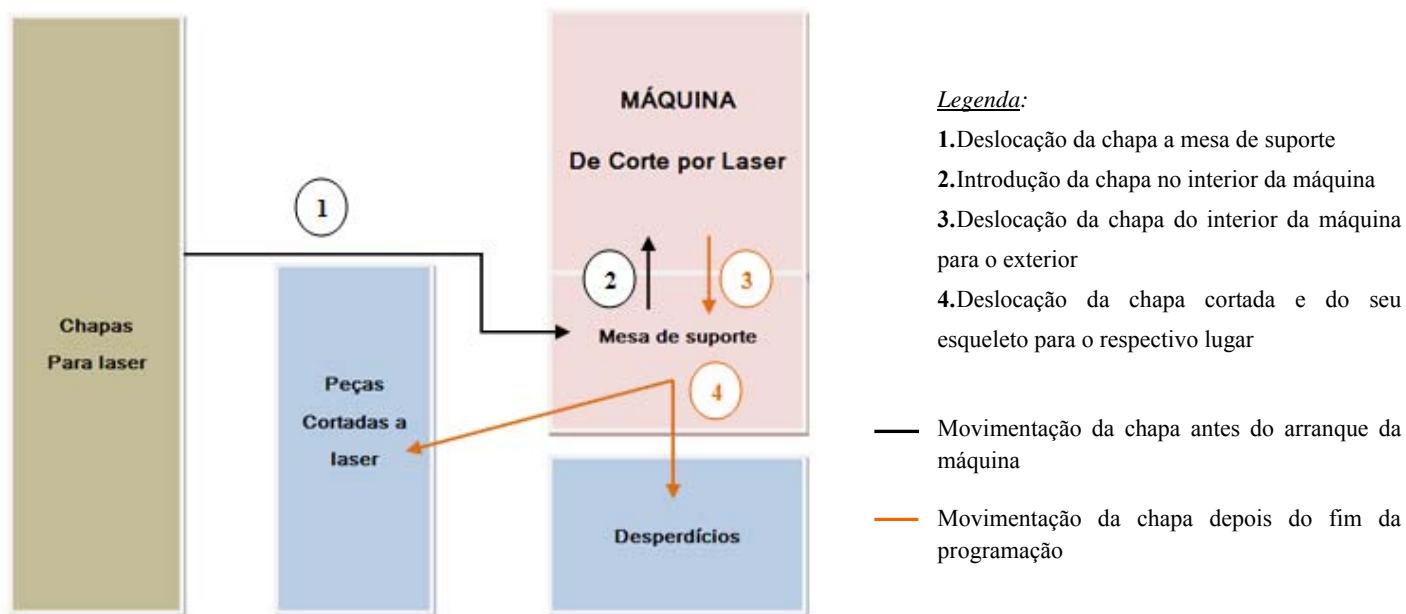


Figura 48: Posicionamento dos elementos/ objectos e movimentações da chapa

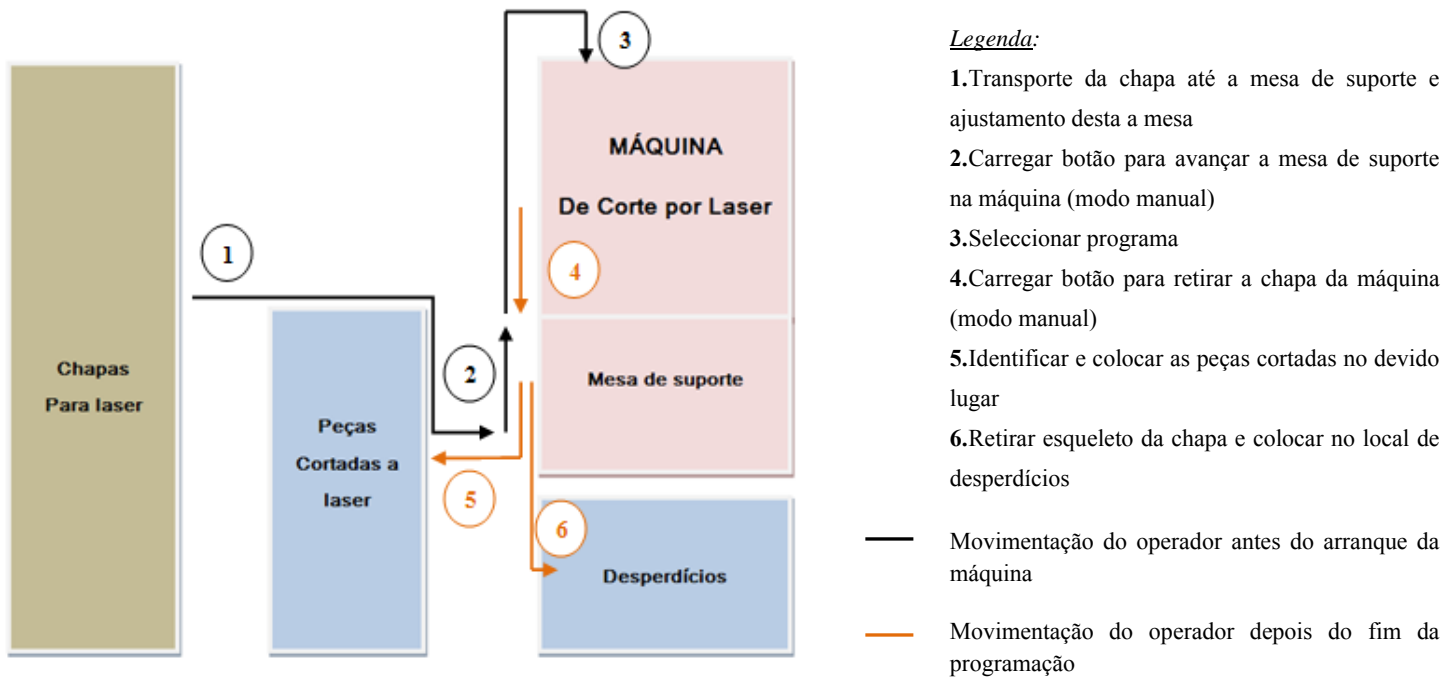


Figura 49: Posicionamento dos elementos/objectos e movimentações do operador

9.4.2. Divisão do processo em elementos

Após ter observado o método, decidiu-se estudar os tempos executados pelo(s) operador(es) antes da introdução da chapa e depois da extracção das peças obtidas por laser. Desde modo, dividiu-se o processo em quatro elementos, sendo estes os seguintes:

- ***Elemento 1:*** Colocação da chapa no meio de transporte

Neste elemento foi contabilizado o tempo requerido pelo(s) operador(es) desde o momento de chegada do meio de transporte até a colocação da chapa neste.

- ***Elemento 2:*** Colocação da chapa na mesa de suporte

Neste elemento foi contabilizado o tempo requerido pelo(s) operador(es) para colocar a chapa na mesa de suporte, incluindo o transporte da chapa desde do seu lugar de armazenamento até a mesa.

- ***Elemento 3:*** Verificar e ajustar a chapa a mesa de suporte

Neste elemento foi contabilizado o tempo requerido pelo(s) operador(es) para ajustar a chapa a mesa, consistindo em deslocar a chapa para certificar-se do seu bom posicionamento e prender esta a mesa para que a chapa não se movimenta durante a execução das peças.

- ***Elemento 4:*** Retirar esqueleto da chapa da mesa de suporte

Neste elemento foi contabilizado o tempo requerido pelo(s) operador(es) a retirar o esqueleto da chapa da mesa de suporte para o local onde se coloca os desperdícios.

O tempo requerido pelo(s) operador(es) a retirar as peças obtidas não será contabilizado, uma vez que não são efectuadas as mesmas peças periodicamente.

9.4.3. Folhas de cronometragem e de cálculo

Elaborou-se uma folha de cronometragem (figura 50) no intuito de registar os tempos requeridos pelo(s) operador(es) a executar os elementos enunciados anteriormente e uma folha de cálculo (figura 51) para efectuar os cálculos necessários para a obtenção do tempo padrão de cada elemento.

Fernando Jesus Mourão & C^o. Lda.

Operação: Corte por laser
(Método aplicado na empresa)

Estudo n^o
Medição n^o

Folha de Cronometragem

Executante: Maria Silva
Data:

Início:
Fim:
Tempo passado:

DESCRIÇÃO DO ELEMENTO	Leitura cronómetro	Ritmo	Observação
Colocação da chapa no meio de transporte			
Colocação da chapa na mesa de suporte			
Verificar e ajustar a chapa a mesa de suporte			
Retirar esqueleto da chapa			

Outras observações:

Figura 50: Folha de observação ou cronometragem utilizada

Fernando Jesus Mourão & C^o. Lda.

Operação: Corte por laser

Medição de Cálculo para cálculo do tempo padrão

Estudo nº
Data

Executante

		TC									
		Med.1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Med.6	Med.7	Med.8	Med.9	Med.10
Elem.1											
Elem.2											
Elem.3											
Elem.4											

		V									
		Med.1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Med.6	Med.7	Med.8	Med.9	Med.10
Elem.1											
Elem.2											
Elem.3											
Elem.4											

		TN									
		Med.1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Med.6	Med.7	Med.8	Med.9	Med.10
Elem.1											
Elem.2											
Elem.3											
Elem.4											

TN méd	Correcção	TP
	0,1	
	0,1	
	0,1	
	0,1	

Figura 51: Folha de cálculo utilizada

Os tempos foram retirados recorrendo a utilização de um cronómetro. Optou-se por se utilizar a cronometragem com retorno a zero.

Para a obtenção do tempo padrão foram utilizadas as seguintes equações:

a) Tempo Normalizado (TN)

$$TN = TC \times V$$

Em que:

TC – Tempo Cronometrado (segundos)

V – Velocidade (também designado por ritmo) do operador ao executar o elemento

V < 100% Velocidade Lenta

V = 100% Velocidade Normal

V > 100% Velocidade Rápida

b) Tempo Normalizado Médio ($TN_{méd}$)

$$TN_{méd} = \frac{\sum TN}{N}$$

Em que N corresponde ao número de observações efectuadas.

Precisão da amostra

Quando se efectua um estudo de tempos, verifica-se que, mesmo que o trabalhador tente manter um ritmo constante, há sempre diferenças entre os tempos cronometrados para o mesmo elemento. Deste modo, tornou-se necessário verificar se a amostra escolhida é a mais acertada para o caso em estudo.

Para se verificar a precisão da amostra utilizou-se a seguinte equação:

$$N' = \left(\frac{40\sqrt{N \sum X^2 - (\sum X)^2}}{\sum X} \right)^2$$

Em que:

N' – número de elementos necessários

N – número de elementos cronometrados

X – tempos cronometrados

Se $N' < N$ diz-se que a amostra é *suficiente* e se $N' > N$ diz-se que é *insuficiente*, sendo necessário efectuar mais cronometragens do elemento.

c) Tempo Padrão (TP)

$$TP = TN_{méd} \times (1 + \%correcções)$$

Nota: na maioria das situações poderemos aplicar uma % de correcção entre 10 e 15% consoante o esforço (peso e facilidade de manipular os objectos) e condições (temperatura e humidade) envolvidos. Decidiu-se aplicar uma correcção de 10%.

9.4.4. Resultados obtidos do tempo padrão de cada elemento

Inicialmente, decidiu-se elaborar o estudo efectuando 10 observações, mas verificou-se que $N' > N$ sendo necessário efectuar mais cronometragens dos elementos. Deste modo, foram necessárias 15 observações para tornar a amostragem eficiente.

Os resultados retirados e calculados dos tempos requeridos pelo(s) operador(es) para os elementos constituintes da actividade encontram-se disponíveis no anexo D.

A tabela 21 mostra os valores do tempo normalizado médio e do tempo padrão dos elementos em estudo.

Tabela 21: Valores do $TN_{méd}$ e o TP em segundos

	$TN_{méd}$ (s)	TP (s)
Elemento 1	53	58
Elemento 2	32	38
Elemento 3	14	16
Elemento 4	16	17

9.4.5. Análise e discussão dos resultados obtidos

A partir do tempo padrão obtido dos elementos enunciados anteriormente conclui-se que os dois elementos iniciais, isto é colocação da chapa no meio de transporte e na mesa de trabalho, são os que requerem maior duração.

Análise do elemento 1

Constatou-se que o(s) operador(es) requerem mais tempo para executar este elemento, uma vez que a colocação da chapa no meio de transporte é constituída por diversas etapas, isto é: descer o meio de transporte até ao nível da chapa, colocar as patas do meio de transporte na chapa e verificar estabilidade da chapa no meio de transporte para permitir a sua deslocação em segurança.

Análise do elemento 2

O(s) operador(es) demoram também mais tempo a executar este elemento, uma vez que este também é constituído por etapas, sendo elas as seguintes: transporte da chapa até a mesa de suporte, colocação da chapa na mesa de suporte e retirar patas do meio de transporte a chapa.

Foram identificadas algumas questões que foram objecto de investigação.

RECOMENDAÇÕES:

- Diminuir número de operações, transporte, inspecção, espera e armazenamento.
 - Questões: É possível? Se sim, como?
- Diminuir o tempo padrão dos elementos.
 - Questões: Como?
- Melhorar o armazenamento das chapas.
 - Questões: Como? Espaço requerido? Espaço disponível?

Recomendação nº1: Eliminar o elemento 1

Numa primeira análise, surgiu a ideia de eliminar o primeiro elemento que consiste em colocar a chapa no meio de transporte, tentando transportar a chapa manualmente desde o local de armazenamento até a mesa de transporte. Por questões ergonómicas e devido ao peso das chapas ao executar este elemento, esta hipótese foi de imediato anulada.

Recomendação nº2: Implementação de um sistema de automatização de tarefas

Averiguou-se na possibilidade de inserir um sistema de automatização de tarefas que permite um fácil manuseamento das chapas. Existem estudos que apontam que uma das tarefas mais dispendiosas no corte por laser é a carga e a descarga das chapas. Estima-se que, numa máquina sem qualquer dispositivo de auxílio ao manuseamento da chapa, o tempo útil de produção é de cerca de 50%. No tempo restante, a máquina tem de aguardar pela descarga do material já cortado e pela carga de uma chapa nova. Os sistemas de troca de mesas permitiram uma melhoria muito significativa, mas ainda e cada vez mais insuficiente, pois muitas vezes, a máquina é mais rápida a processar do que o operador a fazer a carga e a descarga. A utilização de sistemas automáticos de carga e descarga permitem aumentar o tempo útil de produção para valores compreendidos entre 80 e 90%.

Para uma maior automação do processo produtivo, especialmente para produção em larga escala em materiais de características e espessuras variadas, é possível optar por diferentes sistemas de carga, descarga e armazenamento, como é possível observar na figura 52:

- O *Lift-Adiramatic*: é um sistema de carga de chapa, a partir de uma paleta de entrada.
- O *Lift-Adiramatic-Plus*: para além de carregar chapas novas permite ainda descarregar chapas já cortadas em paletes de saída, enquanto a máquina corta outras chapas.
- O *Adiramatic Tower*: o carregamento da chapa a cortar e o descarregamento da chapa cortada podem desencadear-se de modo automático, sem intervenção do operador.



Figura 52: Máquina de corte laser com sistemas de carga, descarga e armazém automático da Adira [17]

Este tipo de sistema requer espaço e é útil para a produção em grande série. Exige que as chapas devem ser de excelente qualidade e destinadas a corte laser.

Devido ao elevado espaço que este tipo de equipamento requer esta proposta foi colocada de parte. De notar também que nem sempre as chapas destinadas ao corte por laser apresentam boas qualidades, sendo um dos motivos de uma não implementação deste tipo de sistema na empresa.

Recomendação nº3: Verificar o número de operadores necessários para efectuar os elementos (Influência do número de operadores no tempo padrão de cada elemento)

Actualmente, os elementos em estudo nem sempre são efectuados pelo mesmo número de operadores (no máximo 2 por cada elemento). Analisando os dados obtidos anteriormente, separou-se os dados referentes a execução dos elementos por um operador e por dois operadores e procedeu-se a determinação do tempo padrão dos elementos quando estes são efectuados por um e por dois operadores de modo idêntico ao estudo inicial.

Observação: o elemento 4 não será analisado nesta proposta uma vez que se constatou que este elemento depende da dimensão da chapa, isto é para chapas de grande dimensão são necessários dois operadores e para chapas de menor dimensão é necessário apenas um operador.

Tabela 22: Valores de TP em segundos quando os elementos são executados por um e dois operadores

Elemento	1 OPERADOR	2 OPERADORES
	TP (s)	
1	62	56
2	38	34
3	17	15

RECOMENDAÇÕES FINAIS:

Para otimizar o processo em estudo e obter um bom tempo padrão dos elementos, verificou-se que seria necessário o seguinte número de operadores:

- *Elemento 1:* dois operadores para colocar a chapa no meio de transporte. Os operadores deverão se posicionar na extremidade da chapa e colocar as patas do meio de transporte a chapa;

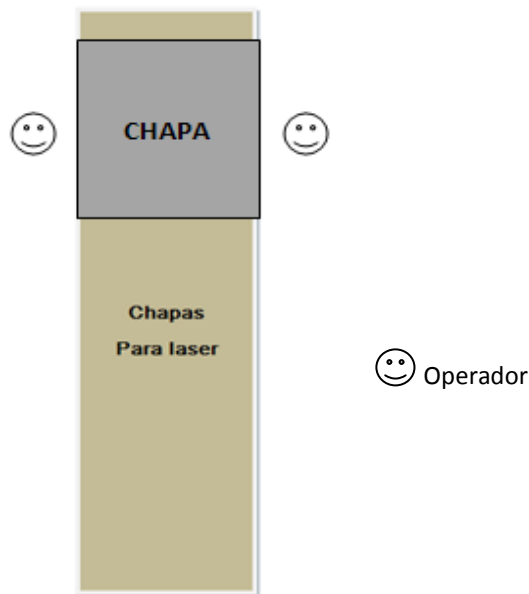


Figura 53: Quantidade e posicionamento do(s) operador(es) referente ao elemento 1

- *Elemento 2:* dois operadores para colocar a chapa na mesa de suporte, um responsável pelo transporte e ambos responsáveis para retirar as patas do meio de transporte na chapa, a fim desta ser colocada na mesa de suporte;

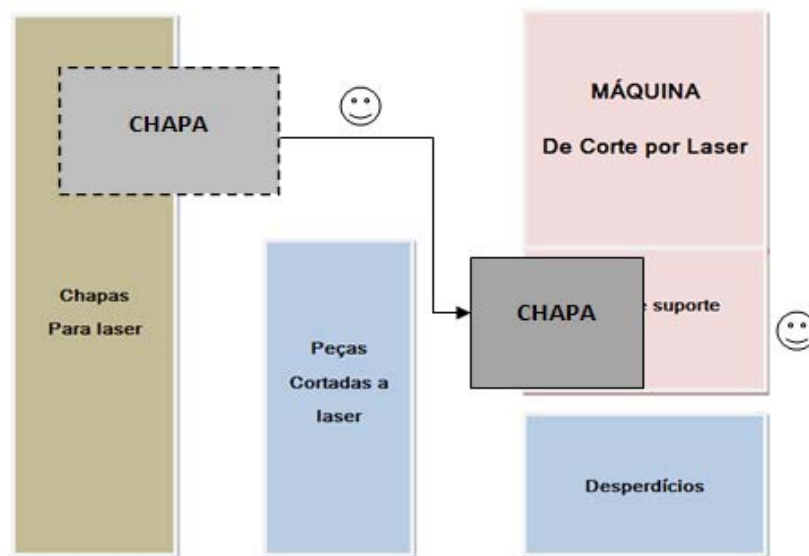


Figura 54: Quantidade e posicionamento do(s) operador(es) referente ao elemento 2

- **Elemento 3:** dois operadores para ajustar a chapa, colocados em lados opostos e um deles responsável pelo bloqueio da chapa a mesa de suporte;

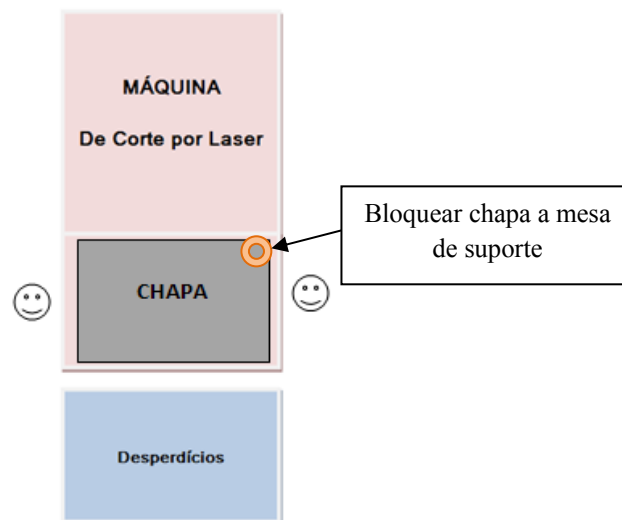


Figura 55: Quantidade e posicionamento do(s) operador(es) referente ao elemento 3

- **Elemento 4:** como referido anteriormente, um ou dois operadores consoante a dimensão da chapa.

Em suma, verificou-se que o método utilizado pela empresa é aceitável, mas é recomendável que os elementos enunciados neste trabalho sejam realizados por dois operadores no máximo, seguindo o posicionamento destes segundo as figuras 53, 54 e 55.

10. ESTUDO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO *ACTIVITY BASED COSTING* NA EMPRESA

10.1. Método *Activity Based Costing*

Os gestores devem reconhecer a importância do custo na elaboração dos planos estratégicos, ou seja precisam de estabelecer a “liderança do custo” ou a “redução do custo” como meta. Para tal, este estudo tem por objectivo apresentar o sistema *Activity Based Costing* (ABC) como um método estratégico para apurar custos.

Nesta parte do trabalho será focalizado os seguintes aspectos:

- Principais conceitos do sistema ABC;
- Comparação em relação a outros métodos de apuração de custos de contabilidade tradicional;
- Vantagens e desvantagens da implementação do método ABC;
- Etapas de implementação.

10.1.1. Principais conceitos

“As diversas actividades consomem recursos e os produtos, por sua vez, consomem actividades.”

Conceito do método ABC, segundo Kaplan [18]

Método criado nos meados dos anos 80 por *Robin Cooper, Thomas Johnson e Robert Kaplan*, parte do princípio que os produtos não consomem custos, mas actividades, o que implica uma análise integral das características da empresa e dos trabalhos que esta realiza. É uma ferramenta que permite uma melhor visualização dos custos através das actividades executadas dentro da empresa e suas respectivas relações com os produtos.

Alternativa à maneira tradicional da contabilidade, permite analisar o custo e de identificar as actividades que adicionam valor agregado e as que não adicionam podendo a empresa melhorar a sua eficiência. A figura 56 ilustra um modelo que permite avaliar se uma actividade acrescenta valor agregado ou não, permitindo deste modo melhorar ou mesmo eliminar as actividades que não acrescentam valor agregado para a empresa.

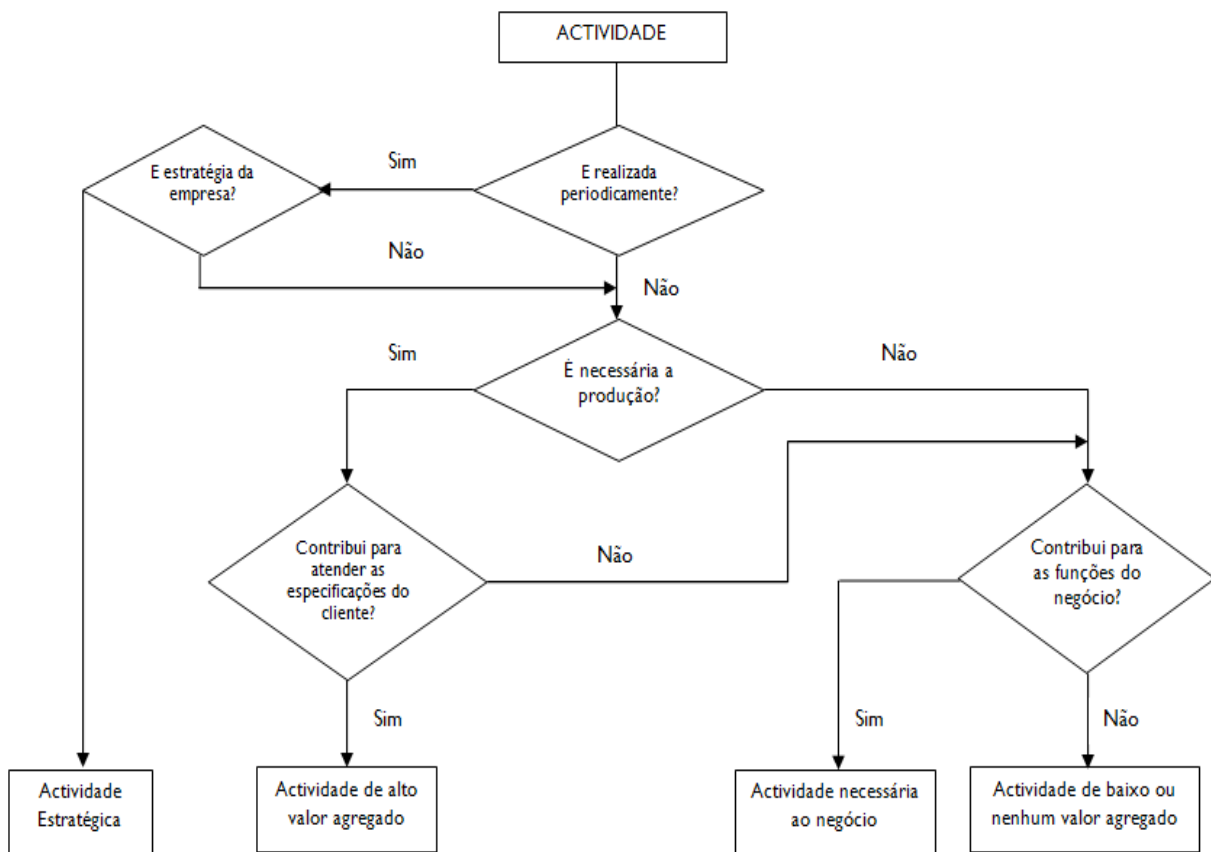


Figura 56: Modelo conceptual para a avaliação do valor agregado de uma actividade [19]

Este método surge em virtude do avanço tecnológico e da crescente complexidade dos sistemas de produção com uma grande diversidade de produtos fabricados pelas empresas, permitindo a estas cortar desperdícios, melhorar serviços, avaliar iniciativas de qualidade e calcular com adequada precisão o custo dos produtos. Revela-se uma importantíssima ferramenta da gestão empresarial, permitindo uma maior exactidão na elaboração dos custos, esta informação é de extrema importância para elaborações de orçamentos mais precisos e decisões quanto a preços, descontos e lucros. Para estabelecer o controlo dos custos, este método analisa e avalia as actividades necessárias para a produção de produtos, identificando os seus custos e quais as actividades que podem ser melhoradas, e se alguma pode ser anulada. [19, 20]

Conceitos:

- Actividade: combinação de pessoas, de tecnologias, de materiais e de métodos que permitem a produção de um determinado produto. Tem por função converter os recursos (matéria-prima, mão de obra e tecnologia) em produção (produtos).

Exemplos de algumas actividades: comprar materiais, receber mercadorias, controlar produção, cortar matéria-prima, montar produto, etc.

As actividades são subdivididas em três categorias:

- *Actividades de produção*: este tipo de actividade contribui directamente a realização do produto.
- *Actividades de suporte*: estas ajudam as outras actividades a cumprir os seus objectivos (exemplos: informática, gestão dos recursos humanos e manutenção das máquinas).
- *Actividades de estruturas*: estas actividades contribuem à determinação dos objectivos, definição e aplicação da estratégia (exemplo: direcção, qualidade).

▪ **Recurso**: tudo o que é aplicado ou utilizado para a realização de uma actividade dentro de uma empresa, do ponto de vista económico.

Exemplos de alguns recursos: energia eléctrica, despesas de compras e vendas, salários, etc.

▪ **Direccionadores** (também designado por *cost drivers*): Identificador da ocorrência de uma actividade, ou seja é o causador do custo, portanto ao estabelecer um direccionador de custo, identifica-se a causa e o custo da actividade. Existem dois tipos de direccionadores de custo:

- *Direccionadores de primeiro estágio*: identificam a maneira como as actividades consomem os recursos e permitem calcular o custo de cada actividade.

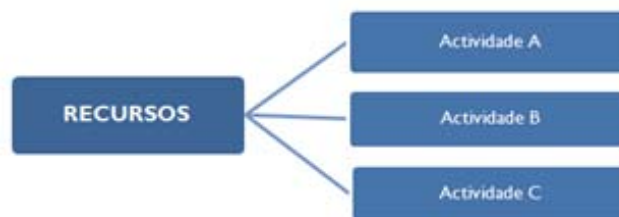


Figura 57: Direcção de custo – 1º estágio [21]

- *Direccionadores de segundo estágio*: identificam a maneira como os produtos consomem as actividades e permitem calcular o custo dos produtos finais.



Figura 58: Direcção de custo – 2º estágio [21]

- Objectos de custos: razão pela qual a actividade é realizada.

Exemplo: um produto é um objecto de custo, pois para que ele seja produzido, vendido e distribuído é necessário realizar várias tarefas. [20,21]

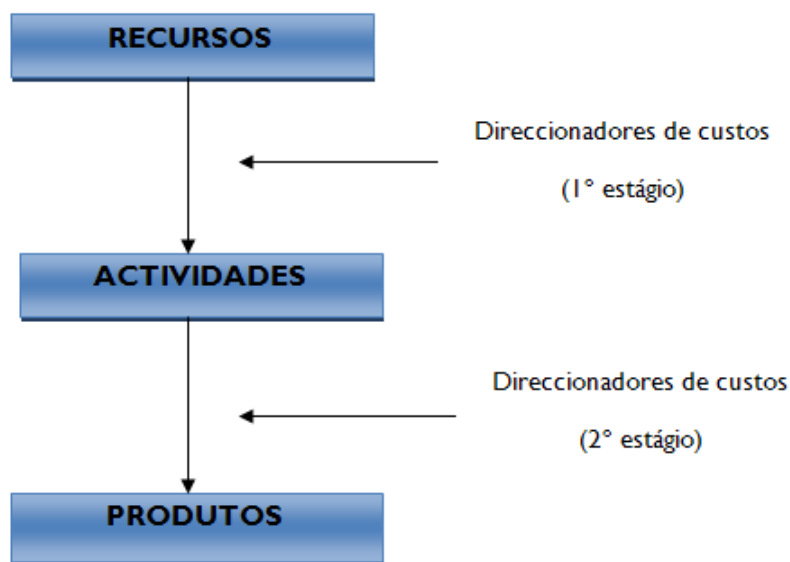


Figura 59: Critério ABC, uma visão global [22]

O método ABC demonstra a relação entre recursos consumidos (isto é, o que foi gasto: água, energia, salários, matéria-prima, etc.), actividades executadas (isto é, onde foi gasto: produção, informática, vendas, etc.) e os objectos de custos (isto é para que foi gasto: produto X, produto Y, actividade A, etc.). [21,23]

10.1.2. Comparação entre os sistemas tradicionais da contabilidade analítica e o sistema Activity Based Costing.

Os sistemas tradicionais de contabilidade analítica repartem proporcionalmente os custos indirectos com o número de horas de trabalho manual, número de horas por máquina ou à área ocupada por cada centro de custo, enquanto que no sistema ABC os critérios de repartição destes custos diferem consoante o tipo de actividade.

SISTEMAS TRADICIONAIS

Assume que os produtos consomem recursos



SISTEMA ABC

Assume que as actividades consomem recursos e os objectos de custo consomem actividades

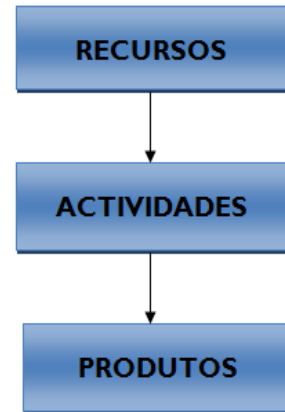


Figura 60: Comparação entre os sistemas tradicionais e o sistema ABC [23]

10.1.3. Vantagem e desvantagem da utilização do método ABC

De um modo geral, o método ABC está mais adaptado as empresas que apresentam as seguintes características:

- Alta tecnologia;
- Várias actividades diversificadas;
- Fortemente automatizadas e informatizadas.

O sistema ABC apresenta a grande vantagem do que se uma actividade existir apenas para produzir um único produto, somente aquele produto receberá o seu custo; se por outro lado a actividade existir para beneficiar todos os produtos da empresa, todos receberão uma parte do custo desta actividade de acordo com a procura de cada um pela empresa. Também é um método aplicável a todo o tipo de empresas, permitindo identificar os custos a reduzir e eliminar as actividades não geradoras de valor acrescentado.

Este método apresenta como inconveniente a exigência de um levantamento exaustivo de muitos dados, bem como o seu elevado custo de implementação. [19,20,21]

10.2. Etapas e realização do teste de implementação do método ABC

A elaboração deste estudo foi efectuada seguindo as etapas abaixo numeradas.

1ª Etapa - Definir onde será aplicado o método ABC

Inicialmente, definiu-se o âmbito de análise, isto é determinou-se se a aplicação do método vai ser efectuada em toda a empresa ou apenas num sector. Deste modo, decidiu-se que iremos apenas tratar dos produtos efectuados pelo equipamento de corte por laser em estudo.

2ª Etapa – Entendimento do processo

É necessário que, antes de se efectuar um levantamento dos processos e actividades, seja feito um estudo da empresa em questão através de: organograma, fluxograma, dentro de outras formas de obtenção de informação.

a) Organograma da empresa (*figura 1*, página 1)

b) Fluxograma

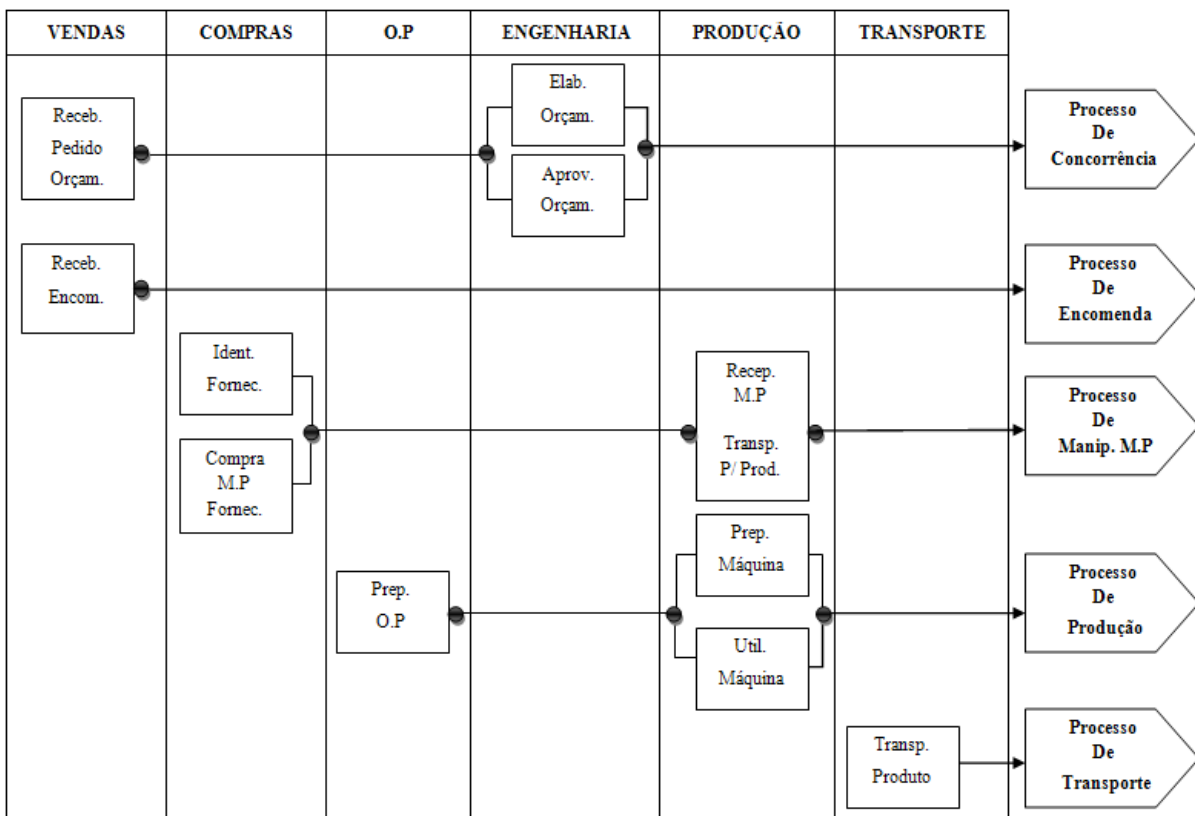


Figura 61: Fluxograma das actividades do processo

Como é possível observar no fluxograma da figura 61, dividiu-se o processo para a obtenção de um produto final por laser em cinco processos, sendo estes os seguintes:

- Processo de concorrência: neste processo estão incluídos as actividades de recebimento de orçamento, sua elaboração e aprovação do cliente;
- Processo de encomenda: neste processo, tal como o nome indica, está incluído o recebimento de encomendas;
- Processo de manipulação da matéria-prima: este processo inclui diversas actividades, desde da identificação da matéria-prima até o seu transporte interno para a produção;
- Processo de produção: processo durante o qual a matéria-prima é transformada em produto, desde da preparação da ordem de produção ao corte por laser da chapa. É considerado o processo mais importante, pois é nele que o produto começa a ganhar forma.
- Processo de transporte: neste processo está incluída a actividade de transporte do produto final para o cliente.

3ª Etapa – Ferramenta de implementação

Apesar de existirem disponíveis no mercado softwares adaptados para a aplicação do método ABC, optou-se por se utilizar uma folha de cálculo realizada no *Excel* da *Microsoft*.

4ª Etapa – Determinação das actividades

Nesta etapa identificou-se quais eram as actividades envolvidas no caso em estudo. As actividades descrevem o modo como a empresa utiliza seu tempo e recursos para alcançar os seus objectivos.

5ª Etapa – Identificação e selecção dos direccionadores de custos

Nesta quinta etapa, decidiu-se quais eram os direccionadores de custo para as actividades identificadas anteriormente, uma vez que os direccionadores de custos medem a utilização de recursos pelas diversas actividades.

Tabela 23: *Actividades e respectivos cost drivers do processo em estudo*

Nº	Actividades	Cost drivers ou Direcçionadores
1	Receber pedido de orçamento	Nº de orçamentos
2	Elaborar orçamento	Horas de execução
3	Receber encomendas	Nº de encomendas
4	Identificar fornecedores	Nº de fornecedores
5	Comprar matéria-prima	Quantidade
6	Receber e transportar M.P para a produção	Quantidade
7	Preparar ordem de produção	Nº de O.P
8	Preparar máquina	Horas de preparação da máquina
9	Utilizar máquina (cortar M.P)	Horas de utilização da máquina
10	Transportar produto	Nº de km

6ª Etapa – Determinação do custo unitário por cada actividade

A partir do estudo efectuado acerca dos recursos utilizados e da quantidade média de direcçionadores de custo de cada actividade é possível chegar ao custo unitário por actividade.

Tabela 24: *Custo das actividades*

Nº Act.	Custo da Act. (€)	Quantidade de direcçionadores	Custo da actividade (por direcçionadores)
1	10,50	35	0,30
2	26,50	5,8	4,57
3	108,00	180	0,60
4	5,50	10	0,55
5	75,00	200	0,38
6	81,25	200	0,75
7	75,25	75	0,35
8	123,80	215	2,25
9	1.162,00	176	6,60
10	250,00	1000	0,25

Observação: *para a determinação do custo de cada actividade foram por vezes utilizados valores aproximados.*



Figura 63: Resumo das etapas necessárias para a implementação do método ABC [24]

Devido à falta de conhecimento do método ABC e de modo a facilitar a sua implementação considerou-se que as cotações pedidas e realizadas são todas aprovadas, e que o transporte dos produtos é efectuado apenas pelos veículos da empresa.

10.3. Discussão dos resultados obtidos

Com a evolução da economia para um mercado cada vez mais competitivo, melhorar a eficiência e a eficácia da empresa tornam-se metas comuns no moderno ambiente de negócios. O conhecimento exacto dos custos passa a ser uma necessidade das empresas para a tomada de decisões estratégicas, e consequentemente, fazer melhor uso dos recursos organizacionais. O método ABC é uma poderosa ferramenta, que permite uma melhor visualização dos custos, em função da análise das actividades executadas na empresa.

Foi possível elaborar um sistema que gera resultados e interesse para a administração da empresa, uma vez que permite visualizar o custo de cada actividade envolvida na obtenção do corte por laser. Mas é de notar que este tipo de método não é de facto o melhor para a determinação do custo do produto para a empresa em estudo, sendo um método adequado para empresas de grande estrutura. Verificou-se também que este método é mais credível para a determinação do custo de uma peça a produzir em grande série.

As maiores dificuldades encontradas ao longo da implementação foram as relacionadas com a veracidade dos direccionadores de custo (peça fundamental da metodologia). Muitos dos dados não estavam a disposição e algumas aproximações foram necessárias. Para a obtenção de um resultado mais preciso e se a empresa desejar recorrer a este método para a determinação do custo dos seus produtos, esta deverá efectuar um estudo mais complexo, analisando vários meses e analisando em pormenor os recursos que cada actividade exige.

11. REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA

[1] *Manual da Qualidade*, Fernando Jesus Mourão & C^a. Lda., 2007.

[2] *Corte por laser*, J. F. Oliveira Santos, L. Quintino, R. M. Miranda, Edições Técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), 1993.

[3] <http://educar.sc.usp.br/licenciatura/2001/laser/rubilaser.gif>

[4] *Processamento de materiais por feixe de electrões laser e jacto de água*, J. F. Oliveira Santos, L. Quintino, R. M. Miranda, Edições Técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), 1991.

[5] *Estudo da optimização de corte por laser de alta velocidade em chapa metálica*, Tiago Maria Carvalho Cunha de Brito e Faro, Porto 2006.

[6] www.bibvirt.futuro.usp.br/content/download/6386/52349/file

[7] *Tecnologia dos materiais metálicos*, João Paulo Davim, José Joaquim Grácio, Universidade Aberta, 1999.

[8] *Novas Tecnologias de Corte*, Dietmar Appelt, A. A. Fernandes, A. Barata da Rocha, J. Ferreira Duarte, J. Touro Pereira, Associação Portuguesa das Tecnologias de Conformação Plástica (APTCP).

[9] http://www.lexellaser.com/lexel_images/8595/gas-ion_tem_charts.gif

[10] <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/50207/1/TN-C2.pdf>

[11] *Manual de instruções*, Centro de Corte por laser tipo CCL, ADIRA, 2006

[12] *Surface Texture Analysis*, The Handbook, Hommelwerke

[13] *Métodos e Tempos*, Manual Pedagógico PRONACI (Programa Nacional de Qualificação de Chefias Intermédias), Exertus, Lda. 2003.

[14] *Eng. De Métodos e Produtividade*, Técnicas de melhoria da produtividade, Daniel C. Amaral

[15] *Estudo dos tempos e métodos*, Alexandre Fernandes Machado, Carlos Alberto Hueb, Soldagem e Qualidade

[16]
<http://www.poli.usp.br/pro/disciplinas/docs/pro2421/p2421cro%20Apostila%20Cronoan%C3%A1lise.pdf>

[17] ADIRA, http://www.adira.pt/pt/index_pt.htm

[18] *O modelo ABC matricial como instrumento de apoio a tomada de decisões*, Paulo Sérgio Lima Pereira Afonso; António Maria Vieira Paisan
(<http://sanpi.dps.uminho.pt/pdf/abc%20matricial.pt>)

[19] *Apuração de custos: o Activity-Based Costing (ABC) como uma metodologia estratégica*, Dimitri Pinheiro; Flávia Dalmácio; Luciene Laurett, Márcio Castro; Álvaro Ricardino.
(http://www.fucape.br/_admin/upload/centro_pesquisa/apura%C3%A7%C3%A3o.pdf)

[20] *Gestão & Produção, Metodologia ABC: Implantação numa microempresa*, Orlando Duran, Lucas Radaelli, 2000.

[21] *Viabilidade da implementação do custeio baseado em actividades (CBA) nos diversos sectores de actividade*, Conceição Gomes, Gestão e Desenvolvimento, 12 (2004).

[22] *Operation Management for competitive advantage*, Chase, Richard B.; Jacobs, F. Robert; Aquilano, Nicholas J., 10th Edition, Mc Graw-Hill Irwin, 2004

[23] http://www.ctoc.pt/downloads/files/1174303219_52a58.pdf

[24] <http://www.mdeie.gouv.qc.ca/index.php?id=2268>

ANEXO A: Cabeçalho da folha de observação da qualidade de corte

QUALIDADE DAS PEÇAS OBTIDAS POR LASER	
<i>Fernando Jesus Mourão & C^a. Lda.</i>	
Trabalho efectuado por: Maria Silva	
Data:	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"><i>Estudo n^o</i></div>	
<i>Designação:</i> Peça	
Material:	
Espessura:	
Gás de assistência:	
Manutenção do laser	
Data:	
Intervalo:	
<i>Observações:</i>	

ANEXO B: Conteúdo da folha de observação da qualidade de corte segundo a norma DIN 2310

Qualidade das peças segundo a norma DIN 2310

Tolerância de perpendicularidade e de inclinação (u)

❖ Cálculo de u:

$$0,1 + 0,015 \times a \text{ (nível 2)}$$

$$u < _ \text{ mm}$$

Rugosidade Média (Rz)

❖ Cálculo de Rz:

$$30 + 3 \times a \text{ (nível 2)}$$

$$Rz < _ \mu\text{m}$$

❖ Localização dos pontos de medida: 2/3a

<i>Medição (μm)</i>	<i>Rz (μm)</i>
Rz1	
Rz2	
Rz3	



















Desvio entre estrias (n)

Macrografia

Arredondamento da aresta superior da superfície de corte

- Aresta viva
- Aresta fundida com ou sem garganta
- Aresta com material fundido e garganta

ANEXO C: Fluxograma do processo (estudo métodos e tempos)

<i>Simbologia</i>	<i>Descrição</i>
	Armazenamento da chapa
	Colocar chapa no meio de transporte
	Transporte da chapa até a mesa de suporte
	Colocar chapa na mesa de suporte
	Esperar na mesa de suporte
	Ajustar chapa a mesa de suporte
	Esperar na mesa de suporte
	Introduzir a mesa de suporte no interior da máquina
	Esperar no interior da máquina
	Selecionar programa
	Arranque da máquina
	Máquina em funcionamento
	Retirar a mesa de suporte no interior da máquina
	Retirar peças cortadas a laser
	Identificação da peça
	Retirar esqueleto da chapa
	Transportar esqueleto da chapa até o devido local
	Armazenamento do produto

ANEXO D: Valores de TC obtidos nas 15 medições efectuadas aos elementos da actividade de corte por laser

Estudo n° 1
Medição n° 1

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	51	100	2
2	39	100	1
3	15	100	1
4	17	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 2

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	60	100	1
2	32	100	2
3	14	100	2
4	16	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 3

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	50	100	2
2	33	100	2
3	15	100	1
4	18	100	1

Estudo n° 1
Medição n° 4

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	53	100	2
2	36	100	1
3	14	100	2
4	18	100	1

Estudo n° 1
Medição n° 5

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	55	100	1
2	34	100	1
3	15	100	2
4	15	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 6

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	54	100	1
2	28	100	2
3	16	100	1
4	14	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 7

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	44	100	2
2	30	100	2
3	17	100	1
4	16	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 8

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	55	100	1
2	35	100	2
3	15	100	1
4	15	100	2

Instalação, Teste e Lançamento de um equipamento de corte por laser

Estudo n° 1
Medição n° 9

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	52	100	2
2	35	100	2
3	13	100	2
4	17	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 10

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	55	100	2
2	32	100	2
3	12	100	2
4	14	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 11

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	51	100	2
2	31	100	2
3	13	100	2
4	18	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 12

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	52	100	2
2	28	100	2
3	14	100	2
4	16	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 13

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	58	100	1
2	29	100	2
3	13	100	2
4	12	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 14

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	48	100	2
2	33	100	1
3	16	100	1
4	15	100	2

Estudo n° 1
Medição n° 15

Elemento	TC	Ritmo %	N° operador
1	53	100	2
2	30	100	1
3	12	100	2
4	13	100	2

ANEXO E: Valores de TN e $TN_{méd}$ e TP calculados para os elementos da actividade de corte por laser

TC = TN (ritmo ou velocidade 100%)															
	<i>Med.1</i>	<i>Med.2</i>	<i>Med.3</i>	<i>Med.4</i>	<i>Med.5</i>	<i>Med.6</i>	<i>Med.7</i>	<i>Med.8</i>	<i>Med.9</i>	<i>Med.10</i>	<i>Med.11</i>	<i>Med.12</i>	<i>Med.13</i>	<i>Med.14</i>	<i>Med.15</i>
Elem.1	51	60	50	53	55	54	44	55	52	55	51	52	58	48	53
Elem.2	39	32	33	36	34	28	30	35	35	32	31	28	29	33	30
Elem.3	15	14	15	14	15	16	17	15	13	12	13	14	13	16	12
Elem.4	17	16	18	18	15	14	16	15	17	14	18	16	12	15	13

	TN méd	Correcção	TP
Elem.1	53	0,1	58
Elem.2	32	0,1	36
Elem.3	14	0,1	16
Elem.4	16	0,1	17

ANEXO F: Precisão da amostra (verificação do nº de medições efectuadas)

		TC														
		Med.1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Med.6	Med.7	Med.8	Med.9	Med.10	Med.11	Med.12	Med.13	Med.14	Med.15
Elem.1		51	60	50	53	55	54	44	55	52	55	51	52	58	48	53
Elem.2		39	32	33	36	34	28	30	35	35	32	31	28	29	33	30
Elem.3		15	14	15	14	15	16	17	15	13	12	13	14	13	16	12
Elem.4		17	16	18	18	15	14	16	15	17	14	18	16	12	15	13

	ΣX	ΣX^2	$(\Sigma X)^2$	N'	N	N' < N
Elem.1	791	41923	625681	8	15	✓
Elem.2	334	11244	111556	13	15	✓
Elem.3	146	2150	21316	14	15	✓
Elem.4	160	2580	25600	13	15	✓